

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA

ANNA CAROLINA CAVALHEIRO

EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DA CENA URBANA COMBINANDO IMAGENS
RADARSAT-2 E GEOEYE

CURITIBA
2010

ANNA CAROLINA CAVALHEIRO

EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DA CENA URBANA COMBINANDO IMAGENS
RADARSAT-2 E GEOEYE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós -
Graduação em Ciências Geodésicas da
Universidade Federal do Paraná, como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Hideo Araki

CURITIBA
2010

Cavalheiro, Anna Carolina

Extração de informações da cena urbana combinando imagens
geoeeye e radarsat-2 / Anna Carolina Cavalheiro. – Curitiba, 2010.
61 f. : il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas.

Orientador: Hideo Araki

1. Radar em geociências 2. Imagens -- Interpretação. I. Araki,
Hideo. II. Título.

CDD 551.6353

TERMO DE APROVAÇÃO

ANNA CAROLINA CAVALHEIRO

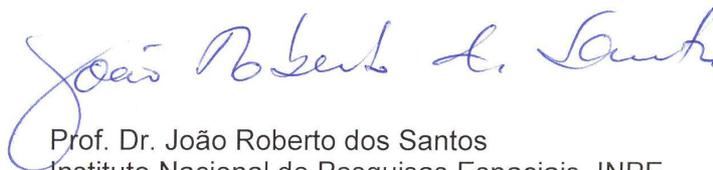
EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DA CENA URBANA COMBINANDO IMAGENS RADARSAT-2 E GEOEYE

Dissertação nº 240 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Hideo Araki
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. João Roberto dos Santos
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 17 de dezembro de 2010.

*Dedico este trabalho à minha família,
especialmente às minhas irmãs,
Roberta e Magda.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Hideo Araki por toda atenção e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Cotlier, Diretor do Centro de Sensores Remotos da Universidad Nacional de Rosário, pelo apoio e disponibilização da imagem radar.

Aos membros da banca Prof. Dr. João Roberto dos Santos e Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes pelas observações e contribuições na melhoria do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

A todos os familiares e amigos, principalmente os do CPGCG, que sempre me acompanharam, incentivaram e deram apoio.

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

Neste trabalho foi analisada a contribuição da fusão de uma imagem RADARSAT-2 com uma imagem do sensor GEOEYE na discriminação de elementos de uma cena urbana. Os sensores radar produzem imagens que precisam passar por uma série de processamentos para se tornarem um produto cartográfico confiável, entre eles a filtragem e a correção geométrica, uma vez que a tomada da imagem é feita lateralmente. A vantagem dessa imagem é que sua tomada independe das condições atmosféricas e a resolução espacial nominal no modo ultrafino é de 3 metros. Já as imagens multiespectrais, mesmo sendo de alta resolução, não permitem identificar todos os elementos que compõe uma cena urbana. A banda do infravermelho médio, por exemplo, poderiam auxiliar essa identificação, mas, normalmente não é adquirida com mesma resolução. O objetivo geral deste trabalho foi discriminar elementos da cena urbana utilizando a combinação de informações obtidas de imagem óptica e de radar. Para tanto foi verificado se o modelo de transformação projetiva é adequado para a correção geométrica da imagem radar, foi analisado o efeito dos filtros para redução do speckle na imagem radar e verificou-se também qual a contribuição da imagem radar para a identificação de elementos, como telhados de fibrocimento, barro ou metal, presentes na cena urbana.

Palavras chave: RADARSAT-2, Geoeye, speckle, Fusão de imagens, Imagem radar, Correção geométrica, Classificação de imagens.

ABSTRACT

In this work we analyzed the contribution of fusion of a RADARSAT-2 with a GeoEye image to discriminate elements of an urban scene. The radar sensors produce images that need a series of processing procedures to become a reliable map, including filtering and geometric correction, once the taking of the image is made laterally. The advantage of this image is that the image taken independent on atmospheric conditions and the nominal spatial resolution on ultra fine mode is 3 meters. Multispectral images, even though high resolution, do not identify all the elements that make up an urban scene. The mid-infrared band, for example, could help this identification, but, it is not normally acquired with same resolution. The aim of this study was to discriminate elements of the urban scene using a combination of information obtained from optical and radar image. Therefore it was verified the projective transformation model is suitable for the geometric correction of the picture, we analyzed the effect of filters to reduce speckle in the radar image and there is also the contribution of the radar image for identifying elements, as roofing cement, clay or metal, present in the urban scene.

Keywords: RADARSAT-2, Geoeeye, speckle, Image fusion, Image radar, Geometric correction, Image classification.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA	15
FIGURA 2 - GEOMETRIA SAR.....	16
FIGURA 3 - RETROESPALHAMENTO DAS SUPERFÍCIES.....	18
FIGURA 4 - INTERFERENCIAS DO SINAL.....	19
FIGURA 5 - MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT-2.....	21
FIGURA 6 – SATÉLITE GEOEYE.....	22
FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO	27
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA – PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS	28
FIGURA 9 – VERIFICAÇÃO DE CAMPO.....	33
FIGURA 10 – ÁRVORE DE DECISÃO.....	35
FIGURA 11 – RECORTE DA ÁRVORE DE DECISÃO	38
FIGURA 12 – MATRIZ DE CALIBRAÇÃO.....	40
FIGURA 13 - CALIBRAÇÃO DA IMAGEM RADAR.....	41
FIGURA 14 – IMAGENS FILTRADAS.....	42
FIGURA 15– CORREÇÃO GEOMÉTRICA	45
FIGURA 16 - RECORTES DAS IMAGENS GEOEYE E RADAR	46
FIGURA 17 – DISTRUBUIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS EM CAMPO.....	47
FIGURA 18 – CLASSIFICAÇÃO FINAL	55

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – BANDAS UTILIZADAS POR SENSORES RADAR	14
QUADRO 2 – MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT 1	20
QUADRO 3 – MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT-2.....	21
QUADRO 4 – VALORES DE REFERÊNCIA NA ANÁLISE KAPPA.....	39
QUADRO 5 – ESTATÍSTICA DAS IMAGENS.....	43
QUADRO 6 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - LAGO	43
QUADRO 7 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - VEGETAÇÃO.....	44
QUADRO 8 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - SOLO	44
QUADRO 9 - VALORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO	45
QUADRO 10 – VALORES (EM METRO) DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS COLETADOS EM CAMPO.....	47
QUADRO 11 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM ORIGINAL GEOEYE	49
QUADRO 12 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM GEOEYE COMBINADA COM A IMAGEM RADARSAT-2.....	49
QUADRO 13 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM SEGMENTADA GEOEYE ..	50
QUADRO 14 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM SEGMENTADA COMBINADA COM A IMAGEM RADARSAT-2	50
QUADRO 15 – VALORES DO INDICE KAPPA DA CLASSIFICAÇÃO.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. FUNDAMENTOS.....	13
2.1 Sensoriamento remoto por micro-ondas ativas	13
2.2 Imagem RADARSAT	19
2.3 Imagens GeoEye	21
2.4 Caracterização da cena urbana.....	22
2.5 Estado da Arte	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Localização da área de estudo	26
3.2 Materiais	27
3.3 Procedimentos metodológicos.....	28
3.3.1 Calibração	28
3.3.2 Filtros	29
3.3.3 Correção geométrica.....	31
3.3.4 Levantamento em campo de elementos identificáveis.....	32
3.3.5 Segmentação da imagem	34
3.3.6 Classificação por Árvores de Decisão.....	34
3.3.7 Avaliação da classificação	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1 Processamento da Imagem Radar	39
4.1.1 Calibração	40
4.1.2 Filtragem	41
4.1.3 Correção Geométrica.....	44
4.2 Classificação das imagens	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6. REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

As imagens orbitais geradas por sistemas de imageamento por microondas têm sido objeto de estudo de pesquisas aplicadas a diversos fenômenos. O sistema RADAR (*RAdio Detection and Ranging*) é um sistema ativo, que gera imagens utilizando energia eletromagnética na faixa de micro-ondas.

Um exemplo de sistema sensor ativo é o RADARSAT-2, lançado em 2007 pela CSA, *Canadian Space Agency*. Este sensor possui resolução espacial nominal de 3 metros com direção de visada à esquerda ou à direita e receptores GPS a bordo. Além disso, é possível programar a aquisição de imagens selecionando o valor da frequência, o ângulo de incidência e a polarização de acordo com o enfoque do estudo a ser realizado, (CCRS). O uso de sensores como o RADARSAT-2 para aquisição de imagens proporciona uma grande vantagem em relação aos sensores ópticos, pois, independe das condições atmosféricas.

O sensor imageador do RADARSAT-2 é do tipo SAR (Radar de Abertura Sintética). As imagens adquiridas por este sensor têm sido aplicadas na medição de movimentos da superfície terrestre e em estudos relacionados ao uso do solo e ao planejamento territorial.

Técnicas de PDI (Processamento Digital de Imagens) devem ser aplicadas na preparação da imagem SAR, para que esta se torne um produto cartográfico confiável. As principais etapas desse processamento são: a filtragem da imagem para eliminação de ruídos e a correção geométrica.

Como a imagem *radar* é adquirida através de uma varredura com visada lateral, é necessário que se aplique uma transformação matemática adequada a essa geometria para ortorretificá-la. Mesmo após o processamento as imagens *radar* são de complexa interpretação, não há uma cognição visual intuitiva como numa imagem óptica.

As imagens multiespectrais, mesmo sendo de alta resolução, não permitem identificar todos os elementos que compõe uma cena urbana. Outras faixas de imageamento como a do infravermelho médio, por exemplo, poderiam auxiliar essa identificação, mas não são adquiridas com mesma resolução. Os dados obtidos de uma imagem *radar* fornecem informação relativa à orientação das vias, rugosidade da superfície e geometria dos objetos imageados. A combinação da imagem

multiespectral com a imagem *radar* pode resultar em uma fonte de informações mais completa e assim permite um estudo mais aprofundado da região de interesse.

Problema de pesquisa: Qual a contribuição da fusão de imagens RADARSAT e GEOEYE na discriminação de elementos de uma cena urbana?

Hipótese:

Se: houver a integração de imagens e de alta resolução,

Então: através da combinação de informações presentes na imagem de *radar* e na imagem multiespectral de alta resolução é possível a identificação dos elementos presentes numa cena urbana,

Por que: agregando as informações multiespectral e *radar* ocorre melhor discriminação entre os diferentes elementos presentes na cena.

1.1 Objetivo geral

Discriminar elementos da cena urbana utilizando a combinação de informações obtidas de imagem óptica e de *radar*.

1.2 Objetivos específicos

- a) Verificar se o modelo de transformação projetiva é adequado para a correção geométrica da imagem *radar*;
- b) Analisar o efeito dos filtros para redução do *speckle* na imagem *radar*;
- c) Verificar qual a contribuição da imagem *radar* para a identificação de elementos, como telhados de fibrocimento, barro ou metal, presentes na cena urbana.

2. FUNDAMENTOS

2.1 Sensoriamento remoto por micro-ondas ativas

Em Sensoriamento Remoto os sistemas ativos de aquisição de imagens são aqueles que não necessitam de energia externa para operação, ou seja, possuem fonte de energia própria que permite a aquisição de imagens independente da presença de luz natural, nuvens ou poeira na atmosfera no momento da aquisição.

A maioria dos radares de sensoriamento remoto funcionam em comprimentos de onda entre 0,5 cm e 75 cm. As bandas nestas faixas do espectro eletromagnético têm sido arbitrariamente identificadas por letras. As bandas mais freqüentemente utilizadas por radares imageadores são as seguintes:

Banda	Comprimento de onda	Imageador	Aplicações
Banda X:	2,4 a 3,75 cm (12,5 a 8 GHz)	TerraSar.	Aplicações em reconhecimento militar e, a nível comercial, em levantamentos geográficos.
Banda C	3,75 a 7,5 cm (8 a 14 GHz)	ERS-1 e RADARSAT	Imagens meteorológicas sobre os oceanos, regiões polares, zonas costeiras e terrestres.
Banda L	15 a 30 cm (2 a 1 GHz)	SEASAT e ALOS/PALSAR	Monitoramento de fenômenos oceanográfico, coleta dados sobre a superfície do mar, geleiras e da topografia dos oceanos.
Banda P	30 a 100 cm (1 a 0,3 GHz)	NASA JPL AirSAR	Detecção de florestas, áreas desérticas, e neve.

QUADRO 1 – BANDAS UTILIZADAS POR SENSORES RADAR
FONTE: CCRS (2008)

A capacidade de penetração da onda através da chuva ou em uma camada superficial de um alvo aumenta quanto maior for o comprimento de onda. Os radares que operam com comprimentos de onda superiores a 2 cm não são significativamente afetados pela camada de nuvens. A chuva torna-se um fator adverso em comprimentos de onda inferiores a 4 cm.

Os sistemas imageadores de micro-ondas, chamados RADAR (*Radio Detection and Ranging*), consistem de: um equipamento gerador de pulsos, um transmissor, um seletor que coordena a transmissão e a recepção da energia das micro-ondas, uma antena, um receptor, um equipamento de gravação.

A partir da década de 1950 foram desenvolvidos os *radares aerotransportados de visada lateral (side-looking airborne radar - SLAR)* com capacidade de mapeamento em faixas contínuas, concebidos a princípio para uso militar. Este sistema possui a grande vantagem de recobrir uma ampla região à

direita ou a esquerda da aeronave. Existem dois tipos básicos de SLAR: radar de abertura real e radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*), FIGURA1, sendo que a palavra “abertura” se refere à antena. (JENSEN, 2000).

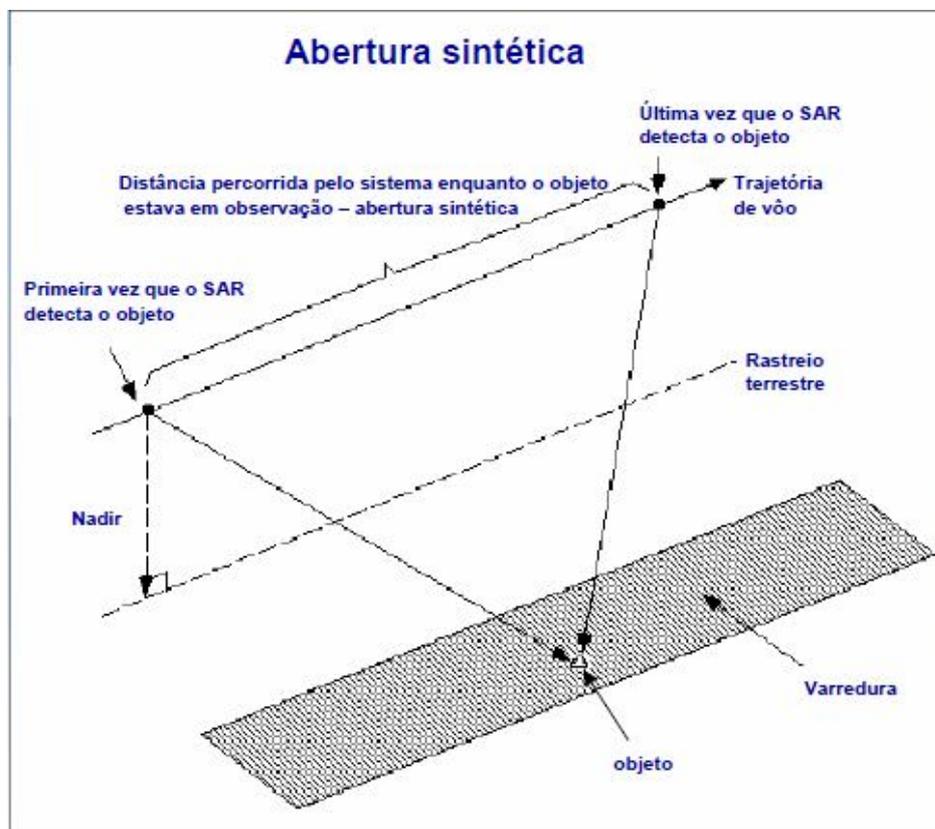
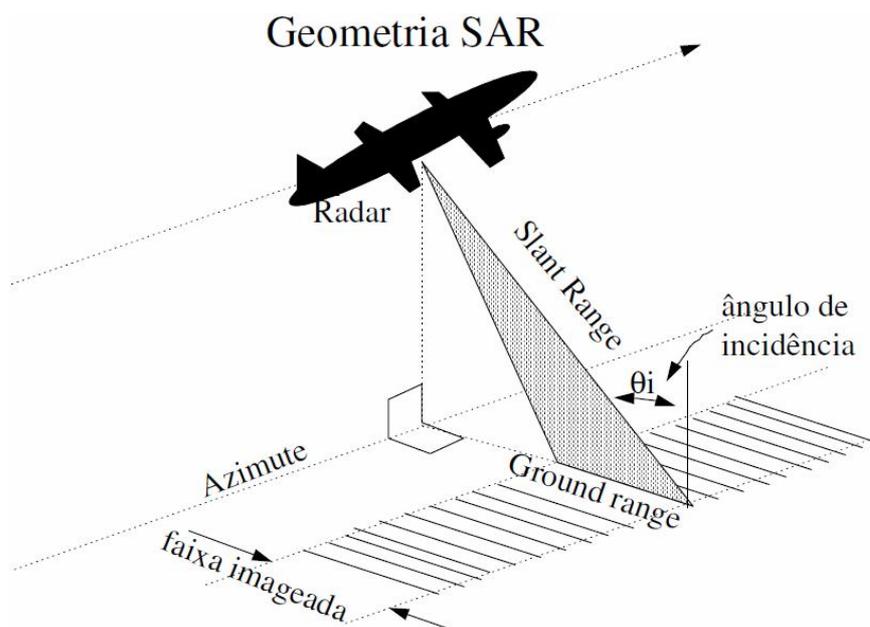


FIGURA 1 - RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA
FONTE: CCRS (2008)

A aquisição de imagens pelo sensor RADARSAT é composta por três fases que consistem em transmitir pulsos de microondas em direção a uma cena; receber parte da energia transmitida que é retroespalhada pela cena e registrar a intensidade e a defasagem dos pulsos de retorno.

O pulso pode ser direcionado, fazendo uma varredura transversal do terreno que aliada ao deslocamento da plataforma no sentido longitudinal, permite a obtenção de imagens de uma faixa da superfície. A resolução real do sensor tem duas dimensões: a resolução em azimute e a resolução de alcance (range) FIGURA2.



Onde: θ – ângulo de incidência

Azimute – direção de deslocamento da plataforma

Ground range – direção de alcance

FIGURA 2 - GEOMETRIA SAR
 FONTE: CCRS (2008)

A resolução de alcance de um SAR é determinada por limitações de construção do radar e do processador, ambos atuando no domínio do alcance inclinado. A resolução de alcance depende do comprimento do pulso processado; pulsos mais curtos resultam em uma resolução “maior”. Os dados de radar são criados no domínio do alcance inclinado, mas normalmente são projetados sobre o plano do alcance no terreno quando processados em uma imagem.

Em um radar de abertura real, a resolução em azimute é determinada pela largura angular do feixe (varredura) da faixa de terreno iluminada pelo feixe de radar. Para que dois objetos sejam discriminados numa imagem, devem estar separados em azimute por uma distância superior à largura do feixe no solo. O SAR recebeu esse nome porque permite através de processamento aumentar sua resolução em azimute, podendo atingir uma resolução centenas de vezes menor que a largura do feixe da antena transmitido.

Ângulo de Incidência refere-se ao ângulo entre a direção de iluminação do radar e a normal à superfície do solo. O ângulo de incidência varia entre o alcance

próximo e o alcance distante, dependendo da altura da trajetória do radar. Essa mudança de ângulo afeta a geometria de visada.

Uma importante característica dos sistemas SAR é a polarização que se refere à orientação, fase relativa e repetibilidade dos campos elétricos e magnéticos das ondas eletromagnéticas. As antenas de um sistema de radar podem ser configuradas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada horizontal ou verticalmente.

A polarização é definida como paralela quando os pulsos transmitidos e recebidos são polarizados na mesma direção. HH indica pulsos transmitidos e recebidos horizontalmente; VV indica pulsos transmitidos e recebidos verticalmente. A polarização é definida como cruzada quando os pulsos transmitidos e recebidos são polarizados na direção ortogonal. Por exemplo: HV indica pulsos transmitidos horizontalmente e recebidos verticalmente; VH indica pulsos transmitidos verticalmente e recebidos horizontalmente.

Quando o pulso do radar incide em uma superfície e é refletida, a polarização pode ser modificada, segundo as propriedades da superfície. Tal modificação afeta o modo como a cena aparece nas imagens polarimétricas de radar e o tipo de superfície pode freqüentemente ser deduzido da imagem.

A tonalidade de uma imagem radar, ou seja, cada nível de cinza distinguível entre o preto e o branco, é proporcional à intensidade do retroespalhamento do radar. Alvos com superfícies suaves, como as águas calmas, aparecem com tonalidades escuras, alvos difusos, como alguns tipos de vegetação, aparecem com tonalidades intermediárias, alvos artificiais (edifícios, navios) podem produzir tonalidades claras, dependendo de sua forma, orientação e/ou materiais constituintes. (Figura 3)

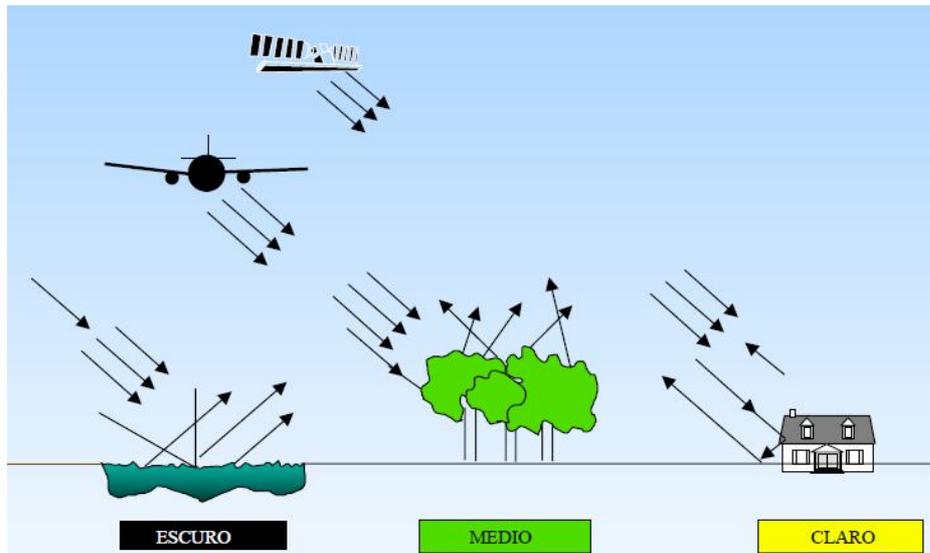


FIGURA 3 - RETROESPALHAMENTO DAS SUPERFÍCIES
 FONTE: CCRS (2008)

As propriedades dielétricas dos materiais também influenciam as características do sinal retroespalhado. A constante dielétrica de uma superfície está inversamente relacionada à condutividade superficial e diretamente relacionada com sua capacidade de reflexão. Já em alvos como vegetação e solo o que mais influencia na resposta do sensor é o teor de umidade.

O sinal do RADAR pode sofrer degradação devido à presença de ruído *speckle*. O *speckle* é um processo inerente ao sistema e reduz a qualidade da imagem. A interferência que provoca o *speckle* ocorre devido à variação no atraso da fase do eco, causada por alvos múltiplos em uma célula de resolução com variações de alcance menores que um comprimento de onda. As interferências locais, construtiva e destrutiva, aparecem na imagem com tonalidades claras e escuras, respectivamente, figura 4.

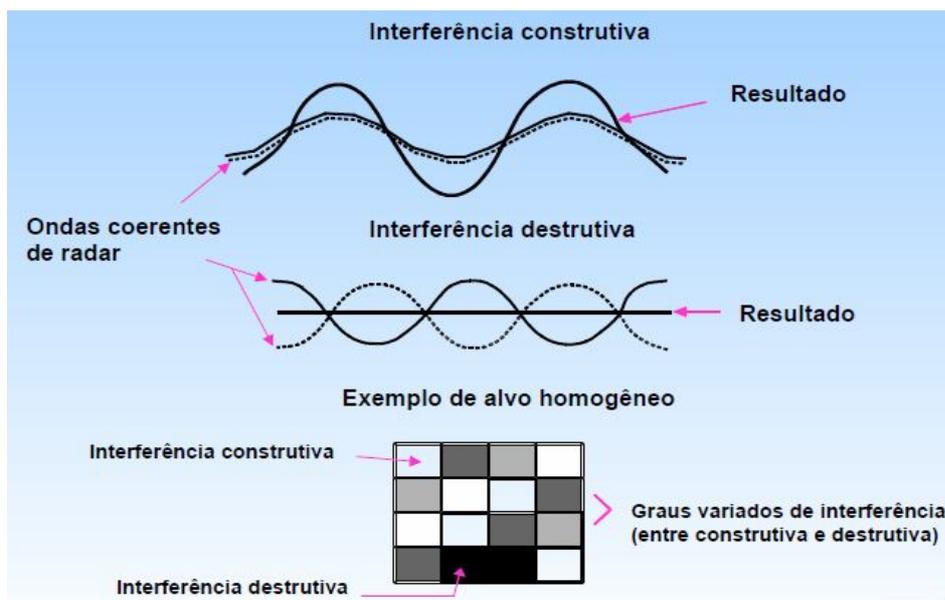


FIGURA 4 - INTERFERENCIAS DO SINAL
 FONTE: CCRS (2008)

Os efeitos de *speckle* podem ser significativamente reduzidos através da utilização de um conjunto independente de dados para estimar o valor de pixel de uma mesma área de terreno, o que pode ser feito através de filtros de múltiplas visadas, esta técnica reduz a intensidade do ruído *speckle* através de uma média de valores em cada posição da imagem e pode ser realizados tanto no domínio espacial quanto no domínio da freqüência.

2.2 Imagem RADARSAT

O RADARSAT-1 foi lançado pela Agência Espacial Canadense em novembro de 1995, em uma órbita quase polar heliossíncrona a 798 km da superfície da Terra. A órbita do satélite tem um ciclo de 24 dias, mas pode ser programado para um ciclo de revisita mais freqüente. O sensor de micro-ondas ativas opera na banda C e sua antena possui 15 x 1,5m. Sua configuração permite uma grande variação de resoluções espaciais e de áreas de cobertura. É possível adquirir imagens em 7 modos diferentes conforme o quadro 2.

Modo	Resolução Nominal (m)	Número de posições do feixe	Largura da faixa (Km)	Ângulo de incidência
Fino	8	15	45	37° - 47°
Standard	30	7	100	20° - 49°

Largo	30	3	150	20° - 45°
ScanSAR estreito	50	2	300	20° - 49°
ScanSAR largo	100	2	500	20° - 49°
Feixe estendido alta incidência	18 – 27	3	75	52° - 58°
Feixe estendido baixa incidência	30	1	170	10° - 22°

QUADRO 2 – MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT 1
 FONTE: CCRS (2008)

A obtenção dos dados pelo sensor utiliza um intervalo de ângulos de incidência que varia de menos de 20° (ângulo íngreme) a quase 60° (ângulo rasante). Para cada modo de aquisição da cena está disponível um determinado número de posições com intervalos de ângulos de incidência. A escolha do modo de aquisição depende da aplicação, do tipo de terreno, da necessidade de estereoscopia, da resolução espacial desejada e da frequência da área de cobertura.

O RADARSAT-2 é a continuidade do projeto RADARSAT-1, foi lançado em dezembro de 2007, foi projetado com avanços tecnológicos significativos que incluem: resolução ultrafina de 3 metros, direção de visada à esquerda ou à direita, possibilidade de seleção da polarização pelo usuário e receptores GPS a bordo. Oferece todos os modos de imageamento do RADARSAT- 1 além de muitas capacidades adicionais.

Entre as inovações do RADARSAT – 2 podemos citar os modos de imageamento com polarização paralela (HH e VV) e cruzada (HV e VH); o sensor também pode imagear à esquerda ou à direita do nadir, a presença de receptores GPS a bordo que monitoram a posição do satélite e permitem retificação mais precisa das imagens. O RADARSAT - 2 possui os mesmos 7 modos de aquisição do RADARSAT – 1 e o acréscimo do modo de resolução ultrafino, figura 5.

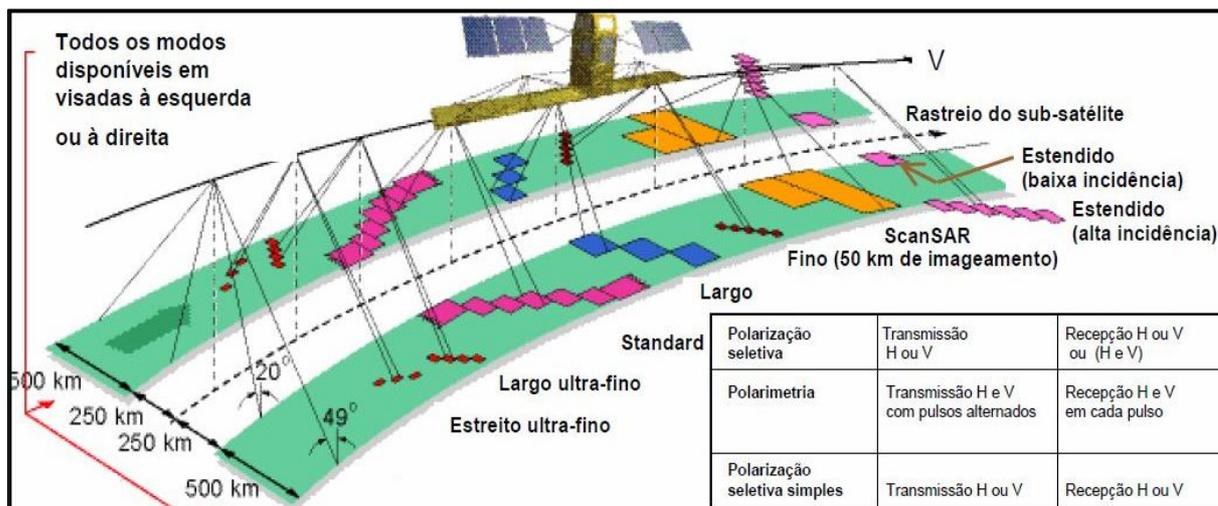


FIGURA 5 - MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT-2
FONTE: CCRS (2008)

O modo ultrafino do RADARSAT-2 adquire imagens com uma resolução espacial de 3 metros, a melhor resolução espacial disponível atualmente, porém não permite a seleção de polarização paralela, estando disponível somente a polarização cruzada HV ou VH, conforme o quadro 3:

Polarização	Modo de aquisição	Ângulo de incidência	Largura de faixa	Resolução aproximada	Número de visadas
Polarização seletiva transmissão H ou V recepção H e/ou V	Fino	37° - 49°	50 km	10 x 9 m	1 x 1
	Standard	20° - 49°	100 km	25 x 28 m	1 x 4
	Baixa incidência	10° - 23°	170 km	40 x 28 m	1 x 4
	Alta incidência	50° - 60°	150 km	25 x 28 m	1 x 4
	Largo	20° - 45°	100 km	25 x 28 m	1 x 4
	ScanSAR estreito	20° - 46°	300 km	50 x 50 m	2 x 2
	ScanSAR largo	20° - 49°	500 km	100 x 100 m	4 x 4
Polarização seletiva única transmissão H ou V recepção H ou V	Ultra-Fino	30° - 40°	20 km	3 x 3 m	1 x 1
	Fino com multivisada	30° - 50°	50 km	11 x 9 m	2 x 2

QUADRO 3 – MODOS DE AQUISIÇÃO RADARSAT-2
FONTE: CCRS (2008)

Ao utilizar o modo ultrafino, o RADARSAT-2 opera na Banda C, com largura de faixa limitada entre 10 e 30 km a fim de não exceder a capacidade de gravação. Este modo é útil para detectar objetos com mais clareza e melhorar a discriminação entre a superfície observada, facilitando assim a análise e interpretação dos dados.

2.3 Imagens GeoEye

O Satélite GeoEye foi lançado em 2008 pela base militar de Vandenberg, Califórnia (EUA). É atualmente o sistema de imageamento orbital com maior resolução espacial, sendo o valor nominal do pixel de 0,41 metros na imagem pancromática e 1,6 metros no modo multiespectral. A imagem multiespectral possui quatro bandas que abrangem as faixas do visível (RGB), e do infravermelho próximo.

O satélite, figura 6, possui órbita polar e tempo de revisita de três dias ou mais cedo, dependendo do ângulo de visada utilizado. A altitude de vôo é de 681 km com uma velocidade orbital de cerca de 7,5 km/s ou 16.800 km/hr. Sua órbita helio-síncrona permite que ele passe sobre uma determinada área por volta das 10h30 hora local a cada dia.

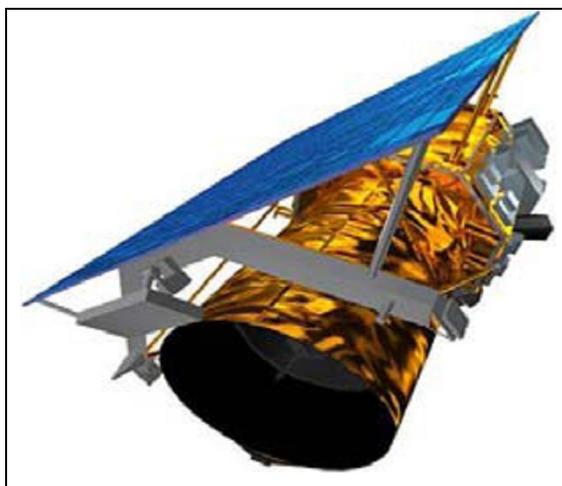


FIGURA 6 – SATÉLITE GEOEYE
FONTE: GeoEye (2010)

A área imageada pode chegar até a 350 quilômetros quadrados de terreno por dia. Os sensores foram desenvolvidos pela empresa GeoEye, especializada em tratamento de imagens digitais e o satélite foi construído pelo programa NextView da Agência Geoespacial Nacional dos Estados Unidos. (GEOEYE 2010).

2.4 Caracterização da cena urbana

O mapeamento urbano com imagens radar pode ajudar a delimitar a distribuição de aglomerações urbanas e elementos importantes para aplicações como prevenção de desastres ou modelagem de impactos. Várias pesquisas

utilizando características da imagem SAR, como textura e interferometria, aliadas a técnicas de fusão vem sendo realizadas. (MOLCH 2009).

Os dados SAR são diferentes dos dados de sensores ópticos não só na forma como a informação é coletada, mas também na geometria de aquisição. A geometria da visada lateral introduz efeitos como a distorção de relevo, principalmente quando há muitas variações no terreno ou edificações altas. O ângulo de incidência local esta associado à resolução variável na distância de alcance.

O sensor mede parâmetros diferentemente do sistema óptico, sendo a resposta predominante variável de acordo com a geometria e a constante dielétrica do material. As características da antena, o mecanismo do retroespalhamento e o processo de formação da imagem introduzem padrões a pixel que resultam na imagem SAR. Por essa razão, a imagem radar não é comparável com a informação contida na imagem óptica. Métodos de classificação, baseados em similaridade radiométrica, utilizados em dados ópticos não são adequados aos dados radar.

A representação de uma área urbana sofre influência dos parâmetros de formação da imagem, são eles:

1. Comprimentos de onda e polarização;
2. Geometria da aquisição, incluindo direção da orbita, ângulo de incidência local e posição do sensor;
3. Propriedades de alvos e vizinhança, incluindo rugosidade e espaçamento.

Os sensores ativos podem adquirir imagens tanto na órbita ascendente quanto na descendente e também no período da noite. O sensor RADARSAT-2 é programado para adquirir imagens tanto na visada à esquerda quanto na direita e também se pode selecionar a resolução da aquisição. (MOLCH 2009).

Nas imagens obtidas com sensor radar, as edificações geralmente apresentam alta resposta, ou seja, valor de pixel elevado, com exceção de áreas que não são alcançada pelo sensor, como alguns cantos de muro, ou em materiais não refletivos como plástico e madeira. A vegetação tem forte influência na representação de áreas urbanas, o sinal absorvido e refletido é afetado pelo volume do espalhamento provocado pela rugosidade do alvo e grau de atenuação do sinal. Assim, quanto maior o retroespalhamento do alvo menor será o retorno ao sensor.

Algumas construções perceptíveis em imagens ópticas não são tão evidentes em imagem radar. A combinação entre o material do alvo, da superfície vizinha e a presença de vegetação resulta em atenuação do sinal. Além disso, a resposta do

alvo (valor numérico registrado pelo sensor) sofre influência da direção da órbita, do ângulo de incidência e do posição do alvo em relação à direção de visada e o azimute.

2.5 Estado da Arte

Existem muitos tipos de sensores remotos: ópticos, multiespectrais, hiperespectrais, SAR, LIDAR, etc. Cada um possui especificações e aplicabilidades como: levantamento de uso do solo, planejamento urbano, monitoramento ambiental, modelo digital elevação, etc. A principal razão para o uso combinado de SAR com outro tipo de imagem é justamente aliar as informações específicas de cada imagem para extrair informações confiáveis sobre as áreas de interesse.

As imagens de RADAR proporcionam uma visão mais complexa de uma cena urbana, se comparada a uma imagem óptica, uma vez que ao se trabalhar com estas imagens temos como valor de pixel o valor do retorno das micro-ondas emitidas pelo sensor. O valor da resposta é diferente para cada tipo de material imageado, superfícies metálicas apresentam valores de retorno altos, já áreas úmidas apresentam baixo valor de retorno. A polarização da onda tem grande influência sobre imagem resultante, pois, favorece a reflexão múltipla que evidencia ou suaviza determinada feição.

Quando as imagens SAR recebem tratamento adequado, como calibração, correção geométrica e filtragem, diferentes tipos de feições urbanas podem ser detectadas. Em áreas de grande adensamento urbano (aglomeração de edificações), o retroespalhamento é grande. Nas áreas de baixa densidade urbana (área residencial, área industrial), o retroespalhamento é inferior, em média, aos valores das áreas mais densas, especialmente na área industrial, onde as construções são de grande porte, em se tratando de imagens com resolução de 13 metros. (BASLY 1998).

Segundo o estudo realizado por BASLY (1998), é evidente a alta complexidade de interpretação das imagens SAR, pois, essas imagens não são tratadas no nível de pixel como as imagens ópticas e sim através de vizinhanças abordadas de forma estatística ou por sua textura. Ainda segundo o autor, uma abordagem com múltiplas passagens, múltiplas polarizações e múltiplos ângulos de incidência permitiria a extração de informações de maneira mais confiável, não

sendo necessário fazer a filtragem para minimização do “*speckle*”, pois este apresentará efeito semelhante sobre as imagens e minimizará os efeitos sobre o resultado.

Um estudo sobre o efeito do ângulo de incidência e da polarização no retorno do sinal RADAR em cenas urbanas realizado por HUSSIN (1995), conclui que, não só a polarização e ângulo de incidência influenciam na resposta do sensor, mas também, a orientação dos objetos da cena. Segundo o autor, edificações em posição perpendicular ou paralela ao ângulo de incidência do sensor apresentam valores altos para a refletância na imagem polarizada horizontalmente.

Segundo ESTEVAN (2006) o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto trouxe o aumento nas opções de uso de produtos orbitais, principalmente com significativa melhoria nas resoluções espacial e temporal. Porém, um pré-requisito para extrair informações desses produtos é o conhecimento do comportamento espectral dos objetos da superfície a serem analisados e os fatores que interferem neste comportamento.

Com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, a autora propôs um método que tem por objetivo, analisar a aplicabilidade da classificação orientada a objetos para classificação de cobertura das áreas de favela em imagens de alta resolução. A classificação foi realizada numa imagem fusão da banda pancromática com as multiespectrais para melhorar a visualização da imagem. Para auxiliar na classificação foi utilizado o índice de vegetação e foram feitas visitas as regiões de estudo pra conhecimento da região de estudo e posteriormente para validação do resultado obtido.

A combinação das imagens de alta resolução espacial com a RADAR tem como vantagem o fato desta não ser afetada por fenômenos meteorológicos e condições de iluminação. Além disso, a imagem radar tem respostas diferentes de acordo com a disposição geométrica dos alvos (paralelos ou perpendiculares a passagem do sensor), a rugosidade e a umidade; o que pode oferecer vantagens na extração de informações sobre uma determinada área (HALL 2001). Em seu estudo, HALL reúne imagens RADARSAT-1, imagens do satélite Landsat TM além de vetores e informações topográficas em um SIG (Sistemas de Informação Geográfica), para identificar conhecidos bolsões de pobreza urbana. O objetivo deste estudo foi comprovar que dados de sensoriamento remoto, especialmente de

radar de abertura sintética, podem ser integrados num SIG com sucesso para fins de planejamento urbano.

De acordo com Hall, os resultados deste estudo foram encorajadores, pois mostram coerência entre as áreas classificadas nas imagens como sendo de pobreza e sua real localização. A análise do SIG, baseada em dados censitários associados comprovou os resultados da classificação. Metodologicamente, o estudo apresentou uma forma funcional de integração de sensoriamento remoto e SIG em um ambiente comum. No entanto, o processo utilizando inicialmente dois ambientes de *software* que, posteriormente, convergiram em um SIG, sugere que a unificação destas tecnologias ainda precisa ser aprimorada.

Conforme COTLIER (2009), a combinação de uma imagem RADARSAT-2 com uma imagem SPOT apresenta bons resultados na identificação de áreas de pobreza na cidade de Rosário – Argentina. A metodologia aplicada naquela pesquisa permitiu diferenciar as áreas de interesse devido à configuração das edificações, com telhado de zinco e próximas a vegetação.

A comparação de imagens RADARSAT-1 com imagens IKONOS, apresentada por WEYDAHL (2005), comprovou que, apesar da resolução de 9 metros, a imagem radar contribuiu para identificação de alguns elementos da cena urbana.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização da área de estudo

A área de estudo abrange a porção nordeste da cidade de Curitiba, capital do Estado do Paraná, cujo marco zero encontra-se na latitude 25°25'48" S e longitude 49°16'15" W, na região sul do país, figura 7.

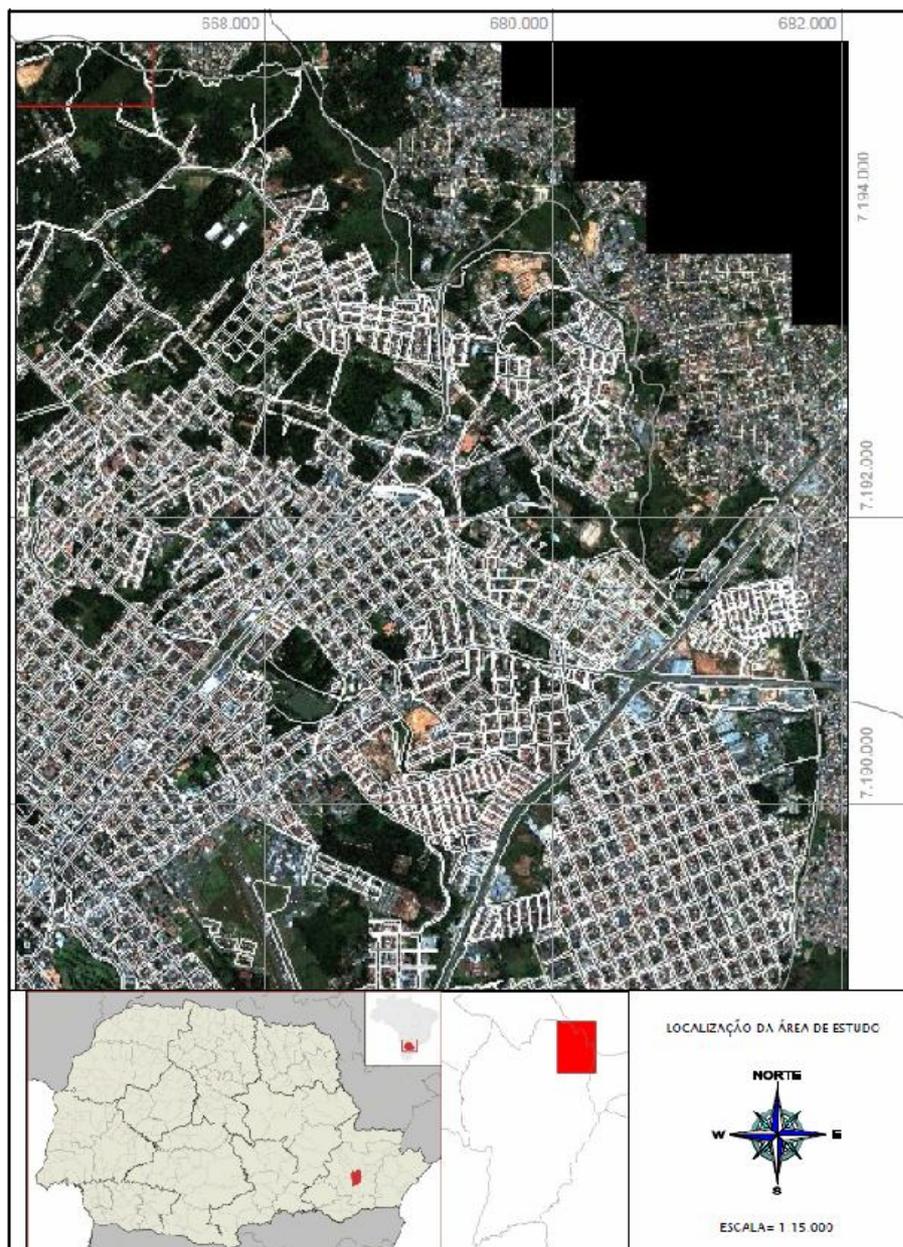


FIGURA 7 – ÁREA DE ESTUDO
 FONTE: O autor (2010)

3.2 Materiais

Utilizou-se neste trabalho uma imagem RADARSAT-2 com polarização horizontal (HH) e resolução espacial nominal de 3 metros. Esta imagem foi calibrada, filtrada e corrigida geometricamente conforme os procedimentos descritos na seqüência. Para correção geométrica utilizou-se um Modelo Digital de Terreno gerado a partir de curvas de nível fornecidas pelo IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba), e um mosaico de ortofotos georreferenciadas da área de estudo fornecido pelo mesmo Instituto.

Também foi utilizada uma imagem GeoEye com resolução espacial nominal de 0,5 metros, contendo as 3 bandas do visível e a do infravermelho próximo. Esta imagem foi registrada e reamostrada para a resolução de 2.5 metros para compatibilização com a imagem radar.

Além das imagens foram utilizados os softwares ArcGis, EDSON, ENVI, Matlab MultiSpec e Weka para o processamento.

3.3 Procedimentos metodológicos

As etapas realizadas para desenvolvimento dos experimentos estão resumidas no fluxograma, figura 8, onde estão apresentados os procedimentos aplicados nas imagens antes de cada experimento e ao final é feita a avaliação dos mesmos. Cada um dos passos apresentados será detalhado nos capítulos seguintes.

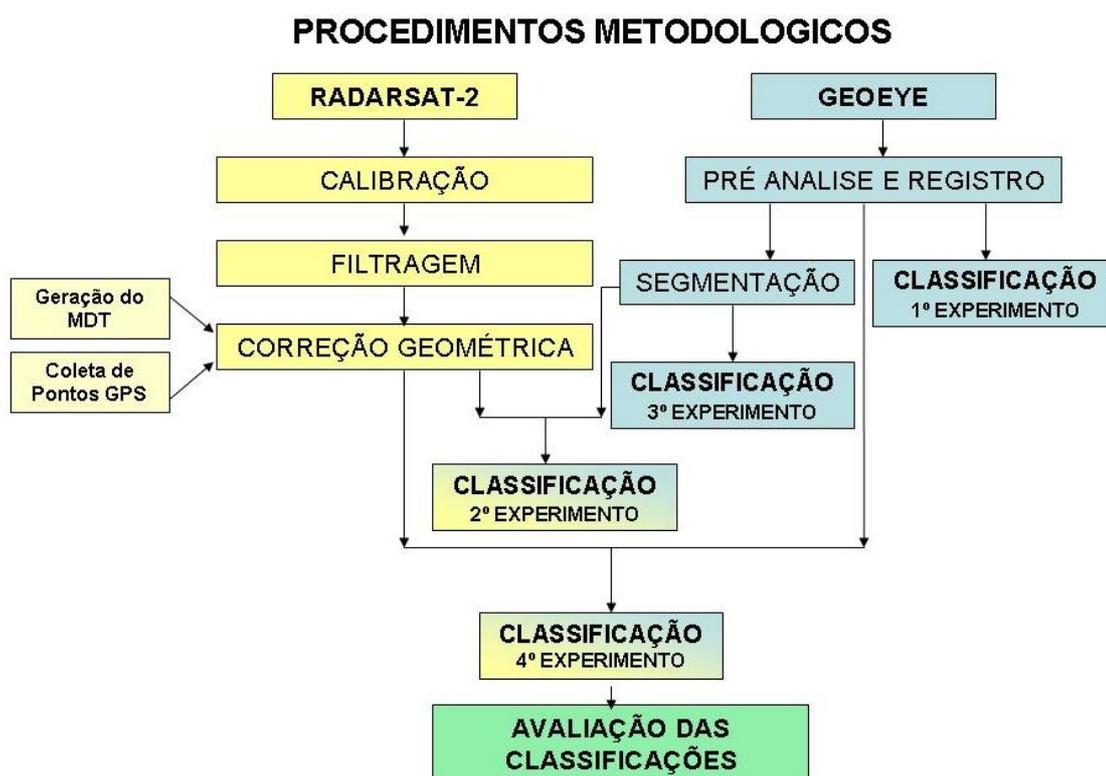


FIGURA 8 – FLUXOGRAMA – PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS
FONTE: O autor (2010)

3.3.1 Calibração

A calibração de uma imagem radar é um processo importante para garantir que os valores presentes na imagem tenham equivalência em uma escala numérica com unidade de medida em decibéis. O resultado da calibração é uma imagem em escala de decibéis, um bel corresponde a uma diferença unitária em logaritmos de base 10 entre dois números. Um decibel (dB) é 0.1 bel, isto é, uma diferença de 0.1 na base logarítmica 10 entre dois números (SOARES, 2010). A calibração garante que o retorno de qualquer objeto da cena possa ser comparado ao retorno de outros objetos.

As imagens RADARSAT-2 vêm acompanhada de uma tabela para escalonamento dos valores originais chamadas LUT *file*. Esta tabela fornece valores que permitem converter os valores digitais originais para a escala sigma-zero, aplicando uma constante de compensação entre a distancia entre o sensor e o alvo.

Cada coluna da imagem possui um valor correspondente na tabela. Para se obter o valor calibrado da imagem o valor original deve ser elevado ao quadrado, depois adicionado a uma constante (B), fornecida pelo fabricante, e dividido pelo valor do ganho (A) correspondente ao valor da coluna do pixel na tabela de correção, como demonstra a equação a seguir.

$$\text{Valor calibrado} = \frac{(\text{valor digital})^2 + B}{A} \quad (3.1)$$

O fator da correção aumenta de acordo com a distância entre o alvo e a antena.

3.3.2 Filtros

Os efeitos de *speckle* podem ser significativamente reduzidos através da utilização de filtros adequados. A redução desses efeitos melhora a resolução radiométrica em detrimento da resolução espacial.

Os filtros não-adaptativos consideram os parâmetros do sinal de toda a imagem, e não as propriedades locais do retroespalhamento do terreno ou a natureza do sensor. Não são apropriados para filtragens de sinais provenientes de alvos móveis.

Os filtros adaptativos tradicionais normalmente requerem o cálculo de médias locais e seus respectivos desvios-padrões (coeficiente de variação). Os filtros adaptativos produzem uma estimativa precisa do coeficiente de retroespalhamento em áreas homogêneas (estacionárias), além de preservar as bordas e as estruturas texturais em cenas não-estacionárias. Acomodam alterações nas propriedades locais do retroespalhamento de terreno. Modelam o *speckle* como sendo estacionário, porém, o sinal do alvo pode não ser estacionário, pois o retroespalhamento médio muda de acordo com o tipo de alvo. São exemplos destes filtros os de Frost, Lee, Map Gama, média local e média na local.

O filtro de Lee é baseado no cálculo do desvio padrão do ruído da janela móvel. Este filtro produz um valor próximo ao da média local em áreas uniformes e um valor próximo ao valor original em regiões de contraste, ocorre suavização em áreas homogêneas enquanto bordas são mantidas.

O filtro de Frost assume distribuição exponencial, realiza o cálculo da média e da variância local para atribuir um novo valor ao pixel. Esse filtro suaviza áreas homogêneas e mantém em áreas heterogêneas.

A maioria das técnicas de filtragem para redução do *speckle* utiliza filtros lineares baseados em estatística local. O principal pode ser descrito pelo cálculo da média ponderada calculada usando janelas variáveis de dimensões entre 3x3 e 15x15. Quanto maior a janela do filtro mais suavizado será o resultado da imagem filtrada. Essas técnicas assumem que o modelo do ruído *speckle* tem uma forma multiplicativa dada pela equação:

$$\log(y_{i,j}) = \log(x_{i,j}) + \log(n_{i,j}) \quad (3.2)$$

nesta convenção, $\log(y_{i,j})$ é o valor corrigido, $\log(x_{i,j})$ e $\log(n_{i,j})$ são os valores originais do pixel da imagem e do ruído em escala logarítmica,

Os filtros que utilizam estatística de primeira ordem, como variância e média de uma vizinhança, podem ser descritos através da equação:

$$f_{ij} = g + k_{ij}(g_{ij} - g) \quad (3.3)$$

onde f_{ij} é a estimativa do valor do pixel livre do ruído, g_{ij} é o valor do ruído do pixel na janela móvel, g é o valor da média local de uma região $N \times N$. O fator k_{ij} é uma função estatística local da janela móvel.

Para efeito de avaliação dos filtros serão calculadas as médias normalizadas de regiões homogêneas, que consiste na divisão da média da imagem filtrada pela

média da imagem original. Quanto mais homogênea for a região, mais próximo de 1 será o resultado.

Outra medida para avaliação dos filtros é o desvio padrão da média, calculado através da divisão do desvio padrão pela média. Esta medida determina a habilidade do filtro em reduzir o *speckle* em uma região homogênea. Quanto menor o valor do desvio padrão da média maior a capacidade de redução do *speckle*.

3.3.3 Correção geométrica

Uma imagem bruta usualmente apresenta distorções geométricas significativas e por isso não pode ser utilizada com finalidade cartográfica antes que sejam aplicadas as devidas correções. Existem várias fontes de distorção como variação de altitude, atitude e velocidade do sensor. O propósito da correção geométrica é compensar a distorção introduzida por esses fatores e dar à imagem a integridade geométrica de um mapa (LILLESAND).

Os modelos para correção geométrica podem ser físicos ou generalizados. Nos modelos físicos, cada parâmetro tem um significado físico e tem relação com a posição e a orientação do sensor com relação a um sistema de coordenadas do espaço-objeto. Nos modelos generalizados, a transformação entre os espaços imagem e objeto é representada como uma função geral como, por exemplo, um polinômio. Em geral, por não precisarem de conhecimento da geometria do sensor, os modelos generalizados podem ser aplicados a diferentes tipos de sensores (ARAKI, 2005).

Os parâmetros da transformação geométrica são calculados utilizando-se o método dos mínimos quadrados (MMQ) para um conjunto de pontos conhecidos nos dois espaços, imagem e terreno, denominados de pontos de controle. Um modelo utilizado na correção geométrica de imagens de alta resolução espacial é o de polinômios racionais, cuja equação geral é:

$$\begin{aligned} L_n &= P_1(X_N, Y_N, Z_N) / P_2(X_N, Y_N, Z_N) \\ C_n &= P_3(X_N, Y_N, Z_N) / P_4(X_N, Y_N, Z_N) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde L_n é a coordenada de imagem linha e C_n a coordenada de imagem coluna normalizadas, correspondentes a um ponto objeto cujas coordenadas normalizadas são X_n , Y_n , e Z_n .

A relação entre as coordenadas do mosaico de ortofotos e MDT (E , N , H) e da imagem radar (E' , N'), pode ser descrita geometricamente por uma transformação projetiva que, matricialmente se apresenta como:

$$\begin{pmatrix} E' \\ N' \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ N \\ H \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

onde termos a_{ij} são os parâmetros da transformação projetiva.

Uma alternativa para a correção geométrica de imagens são os modelos generalizados que utilizam informação do terreno, a vantagem deste método é que o efeito da visada não nadiral do sensor pode ser corrigido. Estes modelos de transformação tem a vantagem de não necessitar de um grande número de pontos de controle. (ARAKI, 2005)

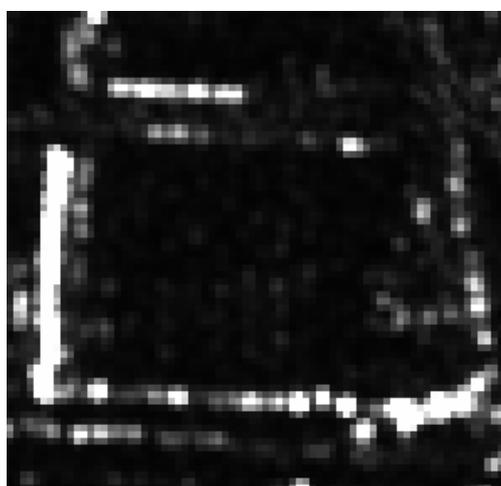
Para correção da imagem RADARSAT-2 será aplicada a transformação projetiva, que relaciona coordenadas tridimensionais de um objeto com a sua representação no espaço bidimensional. Para isso foram coletadas em campo as coordenadas de pontos de controle bem definidos na imagem e distribuídos de maneira homogênea.

A imagem GEOEYE passou pelo processo correção geométrica conhecido como registro, que é realizado para compatibilizar duas imagens diferentes de uma mesma área. Neste processo uma imagem é tomada como referencia e as demais são corrigidas com base no sistema de referencia da imagem adotada. Para o registro foi utilizada a técnica imagem-mapa sendo o que a referencia foi o mapa de arruamento fornecido pelo IPPUC.

3.3.4 Levantamento em campo de elementos identificáveis

Para diferenciar as coberturas existentes foi feito um levantamento de campo levando em conta o material e configuração de áreas com maior refletância selecionadas na imagem radar. As áreas visitadas eram majoritariamente de edificações com dimensões maiores que 200m², com telhado metálico ou telhas de fibrocimento. Esse tipo de cobertura é muito comum em grandes galpões, áreas industriais e também aparece em áreas residenciais.

A maioria das regiões selecionadas por apresentarem maior refletância correspondeu à cobertura de zinco, porém, algumas edificações eram cobertas com telhas de fibrocimento, como o exemplo apresentado na figura 9.



a) imagem RADARSAT-2



b) Imagem GeoEye



c) fotos da fachada



d) fotos da fachada

FIGURA 9 – VERIFICAÇÃO DE CAMPO
FONTE: O autor (2010)

Na figura 9-a, temos a refletância alta nas bordas da edificação, isso ocorre pela existência de chapas metálicas na lateral do prédio. Neste exemplo, ficaram

mais evidentes as bordas esquerda e inferior, devido à orientação da edificação em relação à direção da passagem do sensor.

3.3.5 Segmentação da imagem

A segmentação de imagem é um processo que visa dividir a imagem em regiões com aspecto semelhante. Alguns objetos de interesse em uma imagem e podem ser isolados dos pixels que não fazem parte desses objetos.

A segmentação Mean shift, desenvolvida por SONKA, é uma técnica que agrupa por região as cores semelhantes estatisticamente, diminuindo a quantidade total de cores na imagem.

É um procedimento para localizar os máximos de uma função densidade a partir de dados discretos amostrados desta função. Dada uma imagem, as informações sobre um determinado objeto são extraídas a partir de sua vizinhança e mapeadas em um espaço segundo os atributos escolhidos. Objetos significativos na imagem correspondem, então, a regiões com alta densidade neste espaço. Assim a análise espacial de atributos pode ser entendida como o procedimento de recuperar os centros das regiões com alta densidade, isto é, as características dos objetos significativos na imagem. (MACHADO, 2006).

O software EDISON, *Edge Detection and Image Segmentation System* é um programa onde está implementada a técnica *mean shift* disponibilizado pela Universidade de New Jersey. Neste *software* as imagens são segmentadas com base na cor e na quantidade de pixels. Cada segmento é colorido com a cor média dos pixels que a constituem, É possível definir o tamanho máximo de cada segmento bem como a distância a partir da qual duas cores são consideradas distintas. (PIMENTA 2008).

Para auxiliar na extração de informações da imagem GeoEye será realizada a segmentação a fim reduzir o volume de dados e obter apenas as características significativas da imagem.

3.3.6 Classificação por Árvores de Decisão

As árvores de decisão são mecanismos de categorização de dados através de divisões hierárquicas com o objetivo de facilitar o entendimento das relações entre as variáveis envolvidas. As variáveis em estudo são rotuladas e representas

em forma de árvore invertida separando os diferentes níveis de classificação em níveis hierárquicos.

Quando aplicada aos dados de imagem multiespectral, o desenho de uma árvore de decisão é baseado no conhecimento das propriedades espectrais de cada classe e as relações entre as mesmas.

Um classificador hierárquico é um algoritmo para rotular padrões desconhecidos usando uma seqüência de decisões. A árvore de decisão é composta por um nó raiz, um conjunto de nós interiores e os nós terminais chamados folha. Os nós terminais representam a classificação final. O processo de classificação é formado por um conjunto de regras que determinam o caminho a ser seguido começando do nó raiz até chegar às folhas. A figura 10 ilustra um exemplo simples de árvore de decisão usando como valor de entrada a refletância de pixels da imagem a ser classificada em árvore, arbusto, pântano ou água. A natureza das decisões é definida pela seqüência de atributos que ocorrem dentro de uma árvore e afetará o resultado da classificação Assim, sabe-se que a eficiência e o desempenho desta abordagem é fortemente afetado pelo algoritmo para indução adotado.

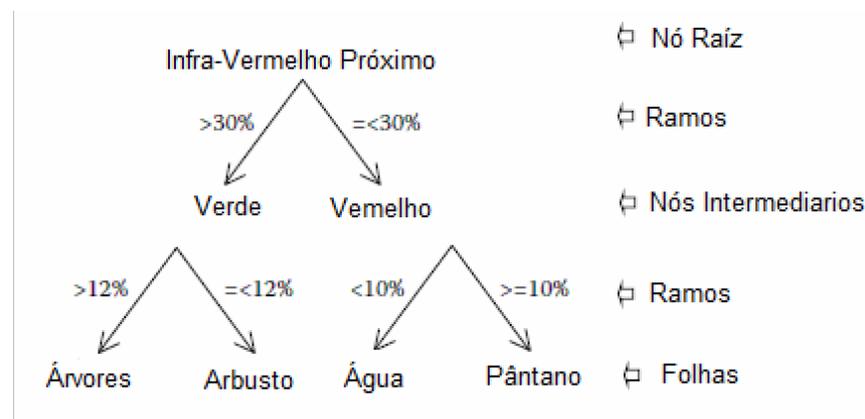


FIGURA 10 – ÁRVORE DE DECISÃO
FONTE: Adaptado de TSO (2001)

Existem duas maneiras de se criar uma árvore de decisão, manualmente ou automaticamente. A abordagem manual é baseada no conhecimento do usuário, e pode gerar resultados insatisfatórios quando se tem um grande volume de dados para analisar.

Com o grande interesse no estudo de métodos automáticos de criação de árvores de decisão classificadores, tais como ID3 (Iterative Dichotomizer 3) e C4.5

por exemplo, tem crescido nos últimos anos pesquisas relacionadas com desempenhos promissores.

O método de indução de decisão, ID3, foi proposto por Quinlan em 1979, que observou que a construção de uma árvore de decisão requer estratégias de “divisão e conquista” através de divisão recursiva de dados para gerar pequenas árvores.

Para um conjunto de várias instâncias S , e um conjunto de n classes $C=\{C_1, \dots, C_n\}$, sendo p_i a proporção de instâncias no conjunto S pertencentes à classe i , a entropia do conjunto S é expressa como:

$$\text{Entropia}(S) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (3.6)$$

A entropia atinge valor máximo igual a $\log_2 n$, quando $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$, expressando a existência de homogeneidade. A medida de ganho de informação tem relação com a redução esperada na entropia se as instâncias no conjunto S forem separadas com um determinado atributo A das instâncias de S , com $\text{Dominio}(A) = \{v_1, v_2, \dots, v_r\} = V$. Considerando que $v \in V$ separa um subconjunto de elementos de S , e denominando esse subconjunto por S_v , a entropia deste novo conjunto é representada por $\text{Entropia}(S_v)$. Realizando esta operação para cada elemento de V , pode-se calcular o quanto é esperado que seja reduzida a entropia. O ganho de informação do atributo A é dado por:

$$\text{Ganho}(S,A) = \text{Entropia}(S) - \sum_{v \in V} \frac{|S_v|}{|S|} \text{Entropia}(S_v) \quad (3.7)$$

O melhor atributo é aquele que proporciona o maior ganho de informação, sendo reduzida a entropia à medida que são divididas as instâncias presentes no conjunto S . (ARAKI 2005)

O algoritmo ID3 não trabalha bem com os valores de atributo numérico e contínuo, e não contempla a ausência ou desconhecimento de atributos, além de não fornecer aos usuários a possibilidade de poda. Quinlan fez uma série de melhorias no algoritmo ID3 que resultou numa versão aprimorada do algoritmo para criação de árvore de decisão chamado C4.5.

O C4.5 é uma extensão do algoritmo ID3 de indução de árvores de decisão desenvolvido por Quinlan para contornar a várias questões não tratadas adequadamente pelo ID3 como mencionado anteriormente. Uma delas é conhecida como superadaptação e ocorre quando os conjuntos de treinamento utilizados são grandes e existe o risco da árvore apresentar uma regularidade incoerente nos dados.

As melhorias incluem a estratégia de *poda da árvore*, que, neste contexto, significa reduzir algumas subárvores a folhas, ou de outra forma, um ramo da árvore, a partir de determinado nó é cortado (transformado em folha). O corte dum ramo da árvore é guiado por um teste estatístico que considera os erros num nó e a soma dos erros nos nós que descendem desse nó. Além de permitir o tratamento do problema da superadaptação, o C4.5 permite lidar com valores numéricos, valores omissos e dados contendo ruído. Outra possibilidade disponibilizada por este sistema é a capacidade de validação. Uma última característica deste sistema que merece ser destacada é a possibilidade de gerar regras de decisão a partir de árvores.

Um exemplo das regras criadas em uma classificação por árvores de decisão pode ser observada na figura 11. A regra é criada com base no valor de um pixel em cada banda e define um roteiro pra que se descubra a que classe este pixel pertence. Os nós representam o valor do pixel na banda e as linhas com valores representam as regras que devem ser atendidas para que o pixel pertença a uma determinada classe.

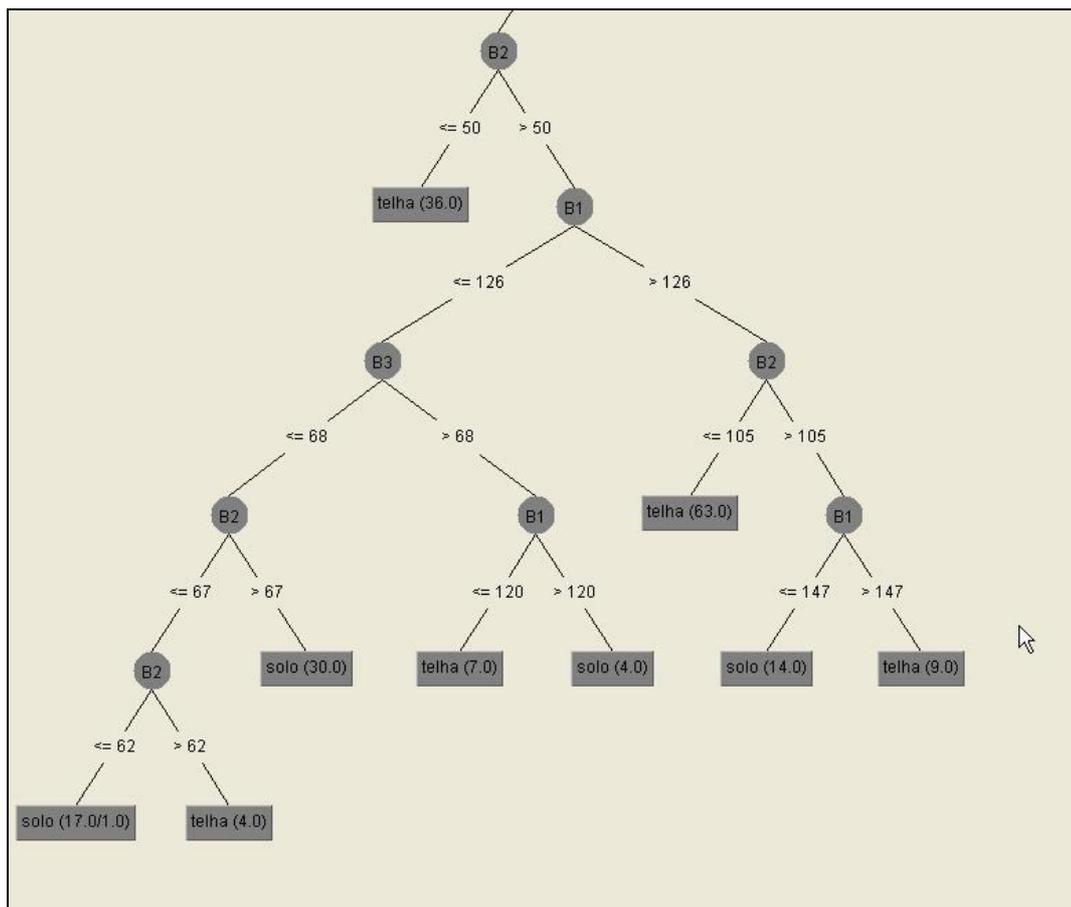


FIGURA 11 – RECORTE DA ÁRVORE DE DECISÃO
FONTE: O Autor (2010)

Neste exemplo, a regra diz que se valor do pixel na banda B2 for menor ou igual a 50 este pixel pertence à classe telha, senão, analisa-se o valor do pixel na banda B1, se este valor for menor ou igual a 126 é necessário verificar o valor da banda B3 e assim sucessivamente até que o pixel seja enquadrado em uma das classes definidas pelas regras.

3.3.7 Avaliação da classificação

Um método comumente utilizado para avaliar os erros nos resultados classificação é matriz de confusão. Este método avalia a qualidade da classificação, pois, apresenta erros de amostra de uma classe atribuída à outra e amostra atribuída a uma classe a qual ela não pertence. (LILLESAND) Outra forma de avaliação é o índice de exatidão global, que resulta da divisão do total de pixels classificados corretamente (diagonal da matriz) pelo número total de pixels da matriz.

O índice *kappa*, desenvolvido por COHEN (1960), é uma medida largamente utilizada para avaliar a acurácia de uma classificação. Este índice reflete a proporção de acerto após a eliminação do acerto por acaso e é calculado a partir da matriz de confusão, com base na diferença entre concordância observada (diagonal principal da matriz de confusão com a exatidão global) e a chance de concordância entre os dados de referência e uma classificação aleatória (produto entre os totais marginais da matriz).

Pelo fato de incorporar em seu cálculo não só os elementos da diagonal principal, mas indiretamente toda a matriz de confusão, o índice *kappa* representa um valor mais confiável e menos otimista do que a exatidão global. (RIBEIRO 2010).

Segundo PINTO (2010), a análise dos resultados do índice *kappa* segue as indicações expressas pelo quadro 4, onde se tem intervalos de valores e a respectiva concordância. Quanto mais próximo de 1o valor de *kappa*, mais acurada está a classificação.

Valor de kappa	Concordância
0	Pobre
0 – 0,20	Ligeira
0,21 – 0,40	Considerável
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Substancial
0,81 – 1	Excelente

QUADRO 4 – VALORES DE REFERÊNCIA NA ANÁLISE KAPPA
FONTE: PINTO (2010)

Serão analisados como forma de avaliação da classificação tanto a matriz de confusão quanto o índice *Kappa*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Processamento da Imagem Radar

A imagem radar requer uma série de procedimentos preliminares à sua utilização, cada um tem sua importância para garantir que a imagem esteja calibrada, corrigida geometricamente e filtrada. Estes procedimentos serão descritos nos itens seguintes.

4.1.1 Calibração

O primeiro procedimento realizado antes da utilização de uma imagem radar é a calibração. A figura 12 apresenta a matriz de calibração, onde se tem maior intensidade de correção (região mais clara), quanto mais distante do sensor estiver o alvo e menor intensidade de correção (região mais escura) quanto mais próximo do sensor estiver o alvo.

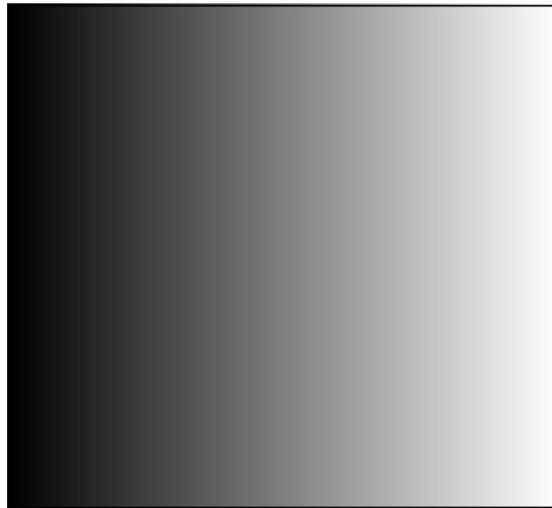
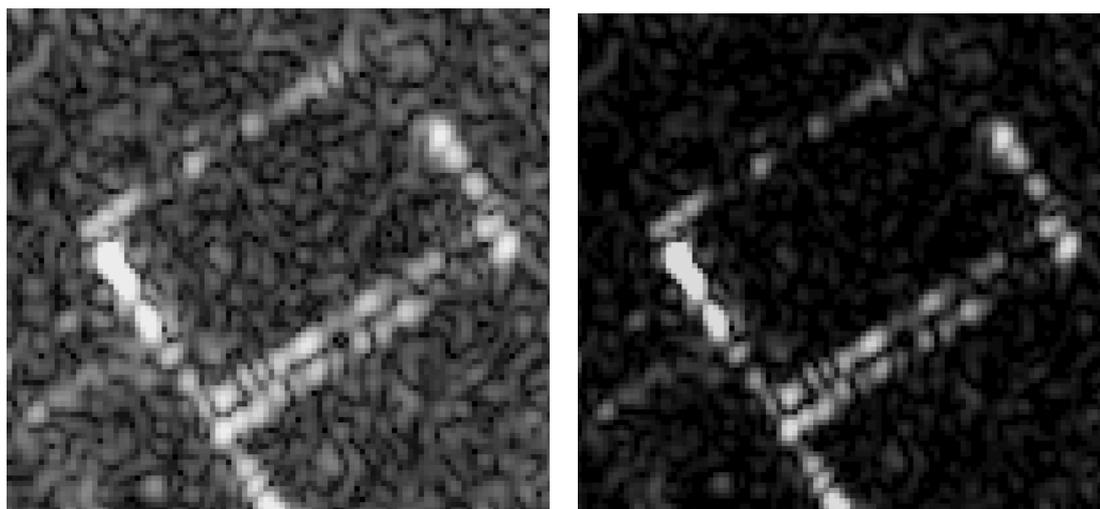


FIGURA 12 – MATRIZ DE CALIBRAÇÃO
FONTE: O autor (2010)

A matriz de calibração foi gerada no Matlab, considerando as colunas inicial e final do recorte da imagem utilizada e estendendo os valores a cada linha da imagem.

A figura 13-a apresenta um recorte da imagem e a 13-b o resultado da calibração correspondente.



a) Imagem original

b) Imagem calibrada

FIGURA 13 - CALIBRAÇÃO DA IMAGEM RADAR.

FONTE: O autor (2010)

Pode-se observar que a imagem calibrada apresenta a mesma feição com maior nitidez do que a imagem original.

4.1.2 Filtragem

Após a calibração foi feita a filtragem para redução do *speckle*. Foram aplicados os filtros Linear com janelas 3x3 e 5x5, filtro Lee e filtro Frost com janelas 3x3. Os filtros foram implementados no *software* Matlab, para possibilitar o processamento os valores de pixel da imagem em decibéis sofreram a aplicação de um fator de escala. O resultado da filtragem é apresentado na figura 14.

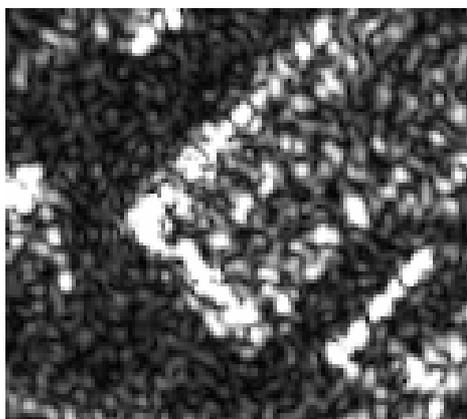


Imagem RADAR original

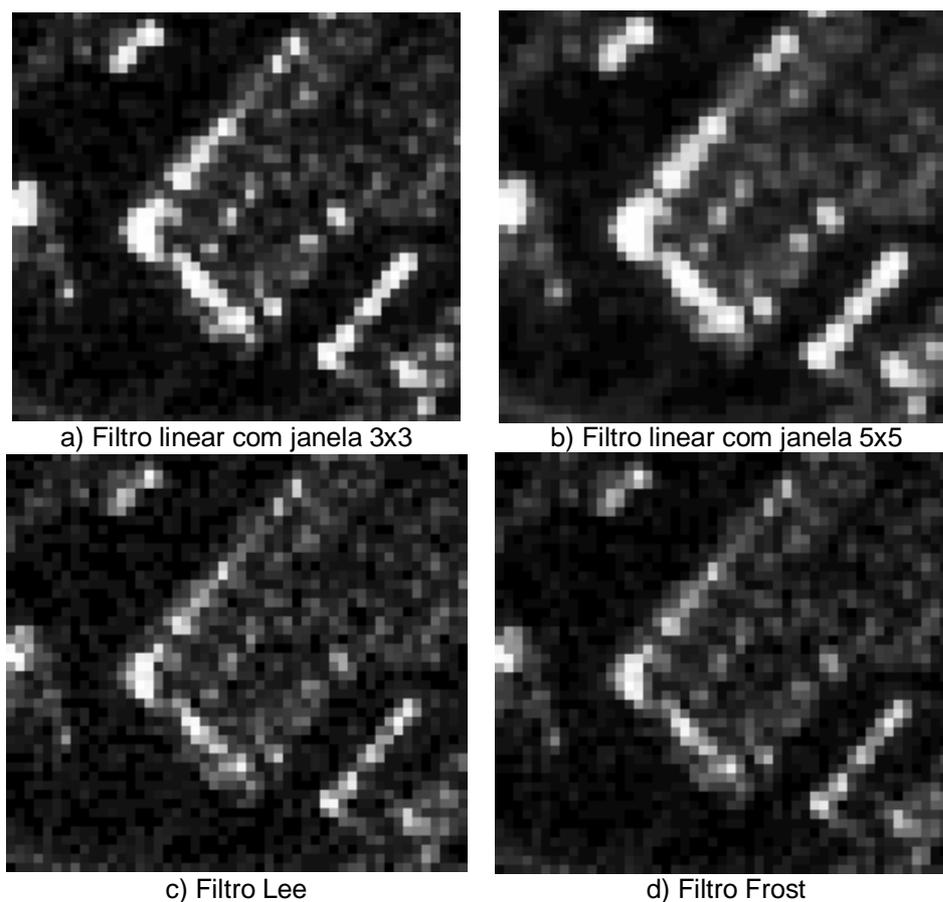


FIGURA 14 – IMAGENS FILTRADAS
 FONTE: O autor (2010)

O recorte apresentado na figura 14 corresponde a uma edificação cuja lateral é recoberta por material metálico. O filtro linear de máscara 3x3, como ilustra a figura 14-a, retirou parte do ruído e não modificou a aparência da feição original. (Já com a máscara 5x5, figura 14-b, ocorre um realce dos contornos do objeto. O mesmo não ocorre com os filtros adaptativos, Lee e Frost, que permaneceram com ruído e apresentaram desvanecimento das linhas da feição imageada.

A aplicação dos filtros resultou em alterações na estatística da imagem, considerando os valores de média e desvio padrão, como podemos observar no quadro 5.

Imagem	Média	Desvio Padrão
Original	602.4	2252.2
Filtro linear3x3	602. 3	2003.6
Filtro linear 5x5	438.0	1232.8
Filtro Lee	588.4	2131.5

Filtro Frost	583.0	1991.0
---------------------	-------	--------

QUADRO 5 – ESTATÍSTICA DAS IMAGENS
FONTE: O autor (2010)

O filtro linear de janela 5x5 apresentou maior variação na média e no desvio padrão em relação à imagem original. O mesmo filtro com janela 3x3 teve a média aproximadamente igual à imagem original.

Também foram analisadas as médias locais para regiões homogêneas, como o lago do Parque Bacacheri, uma área de vegetação e outra de solo exposto. Foram selecionadas amostras de cada área para as quais se calculou a média e a média normalizada. Quanto mais próximo de 1 o valor da média normalizada, melhor a capacidade do filtro de preservar áreas homogêneas.

Outra medida adotada para avaliação dos filtros foi o desvio padrão da média, calculado através da divisão do desvio padrão pela média. Este índice determina a habilidade do filtro em reduzir o *speckle* em uma região homogênea. Quanto menor o valor do desvio padrão da média melhor a capacidade de redução do *speckle* (LEEUW). Os melhores resultados são apresentados em destaque nos quadro 6, 7 e 8.

Imagem	Média	Média normalizada	Desvio padrão	Desvio
Original	102	-	-	-
Filtro linear3x3	91	0,89	48	0.52
Filtro linear 5x5	107	1,04	28	0.26
Filtro Lee	85	0.83	55	0.64
Filtro Frost	92	0.90	61	0.66

QUADRO 6 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - LAGO
FONTE: O autor (2010)

Imagem	Média	Média normalizada	Desvio padrão	Desvio padrão da média
Original	590	-	-	-
Filtro linear3x3	505	0,85	475	0.94
Filtro linear 5x5	450	0.76	200	0.44
Filtro Lee	535	0.90	520	0.97

Filtro Frost	510	0.86	470	0.92
---------------------	-----	------	-----	------

QUADRO 7 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - VEGETAÇÃO
FONTE: O autor (2010)

Imagem	Média	Média normalizada	Desvio padrão	Desvio padrão da média
Original	160	-	-	-
Filtro linear3x3	137	0.85	120	0.87
Filtro linear 5x5	140	0.85	55	0.39
Filtro Lee	155	0.96	85	0.54
Filtro Frost	145	0.90	90	0.67

QUADRO 8 – ESTATÍSTICA DA FILTRAGEM DE ÁREAS HOMOGÊNEAS - SOLO
FONTE: O autor (2010)

Verifica-se que o filtro linear de janela 5x5 foi o que manteve a média local mais próxima do valor original para a região do lago, já nas demais áreas o resultado não foi repetido. Este filtro apresentou o melhor resultado na capacidade de redução do *speckle* em todas as amostras. O filtro de Lee foi o que apresentou maior diferença na média normalizada para a primeira amostra, nas demais o valor ficou mais próximo do ideal, porém, com baixa capacidade de redução do *speckle*.

Analisando o desvio padrão da média percebe-se que o filtro com maior de eliminação do *speckle* foi o filtro linear de janela 5x5, este então será o filtro adotado para as próximas etapas, uma vez que não há necessidade de preservação de áreas homogêneas quando se analisa uma cena urbana.

4.1.3 Correção Geométrica

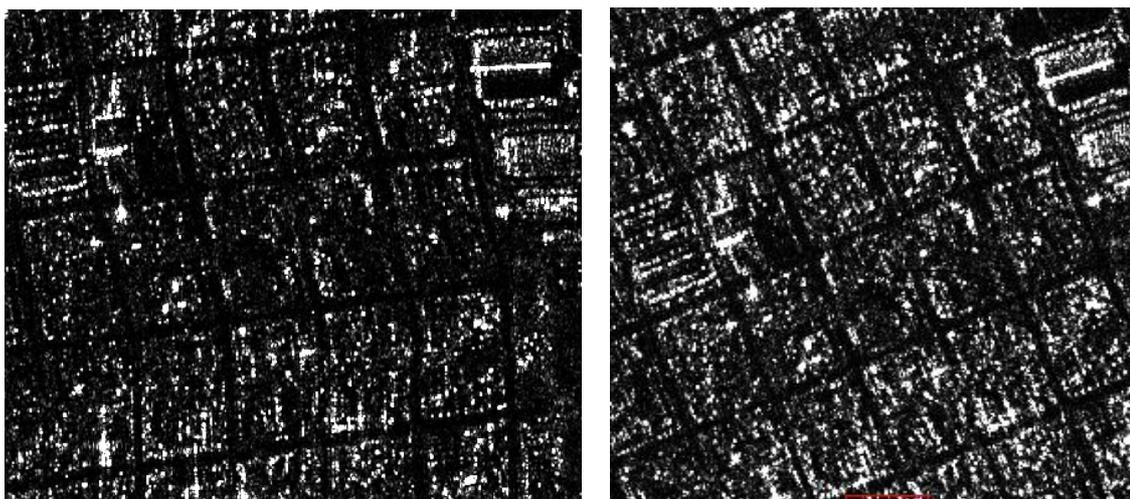
Após a filtragem foi realizada a correção geométrica utilizando o modelo de transformação projetiva foram coletados pontos homólogos na imagem RADAR e no mosaico. Os pontos coletados possuem coordenadas planas do mosaico de ortofotos e informação altimétrica oriunda do modelo digital de terreno gerado a partir das curvas de nível. No total foram coletados 20 pontos distribuídos na imagem de forma a abranger toda a área, 4 foram descartados por apresentarem discrepância em relação ao conjunto. Os pontos foram separados em dois conjuntos de pontos, um para a determinação dos parâmetros de transformação, com 10

pontos, e outro para a verificação com 6 pontos. Os resíduos médios para os dois conjuntos de pontos estão apresentados no quadro 9.

Pontos	Mínimo	Médio	Maximo
Pontos de controle	0,186591	0,921747	1,313599
Pontos de verificação	0,352357	0,988298	2,191417

QUADRO 9 - VALORES DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO
FONTE: O autor (2010)

A imagem resultante da transformação apresentou bom resultado visual principalmente na região do Bairro Alto, figura 15, que aparecia com ondulações na imagem original, figura 15-a, devido à grande variação do relevo no local. Já na figura 15-b nota-se que as ruas foram retificadas.



a) Imagem original

b) Imagem corrigida

FIGURA 15- CORREÇÃO GEOMÉTRICA

FONTE: O autor (2010)

A correção não teve o mesmo resultado em toda imagem, provavelmente pela distribuição ou quantidade de pontos coletados. A figura 16 apresenta recortes homólogos na imagem GEOEYE e da imagem radar, podendo-se perceber que a imagem radar apresenta um leve deslocamento no sentido nordeste em relação à imagem óptica.

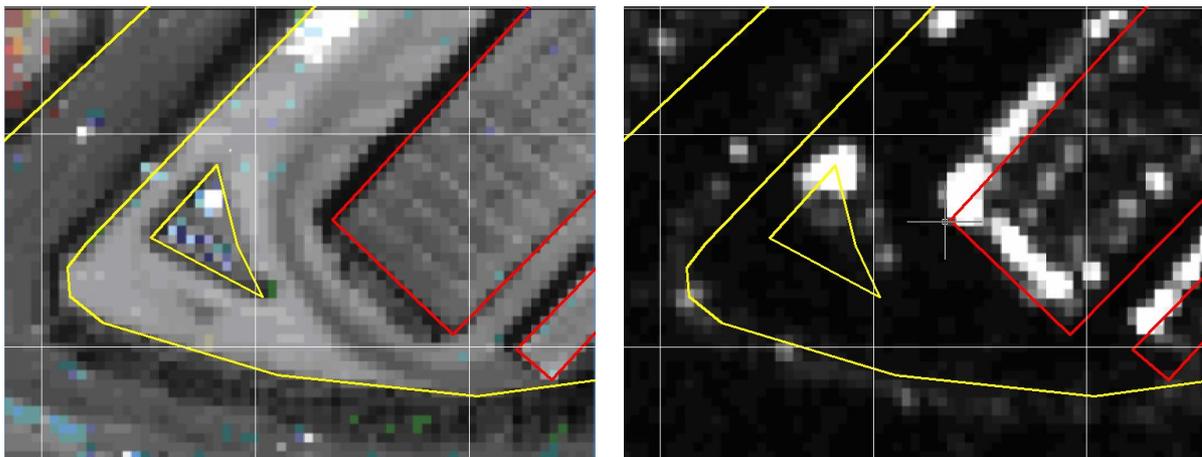


FIGURA 16 - RECORTES DAS IMAGENS GEOEYE E RADAR
FONTE: O autor (2011)

Este efeito não se repete homogeneamente na imagem, pois, outra edificação vizinha à apresentada na figura 16 está perfeitamente corrigida.

Para verificar a qualidade da correção geométrica foi realizado um levantamento de campo com GPS utilizando a técnica de posicionamento relativo estático rápido. Foram coletados 16 pontos distribuídos na área de estudo figura 17. Três desses pontos foram descartados por apresentarem discrepância do conjunto, os demais foram utilizados no cálculo de novos parâmetros.

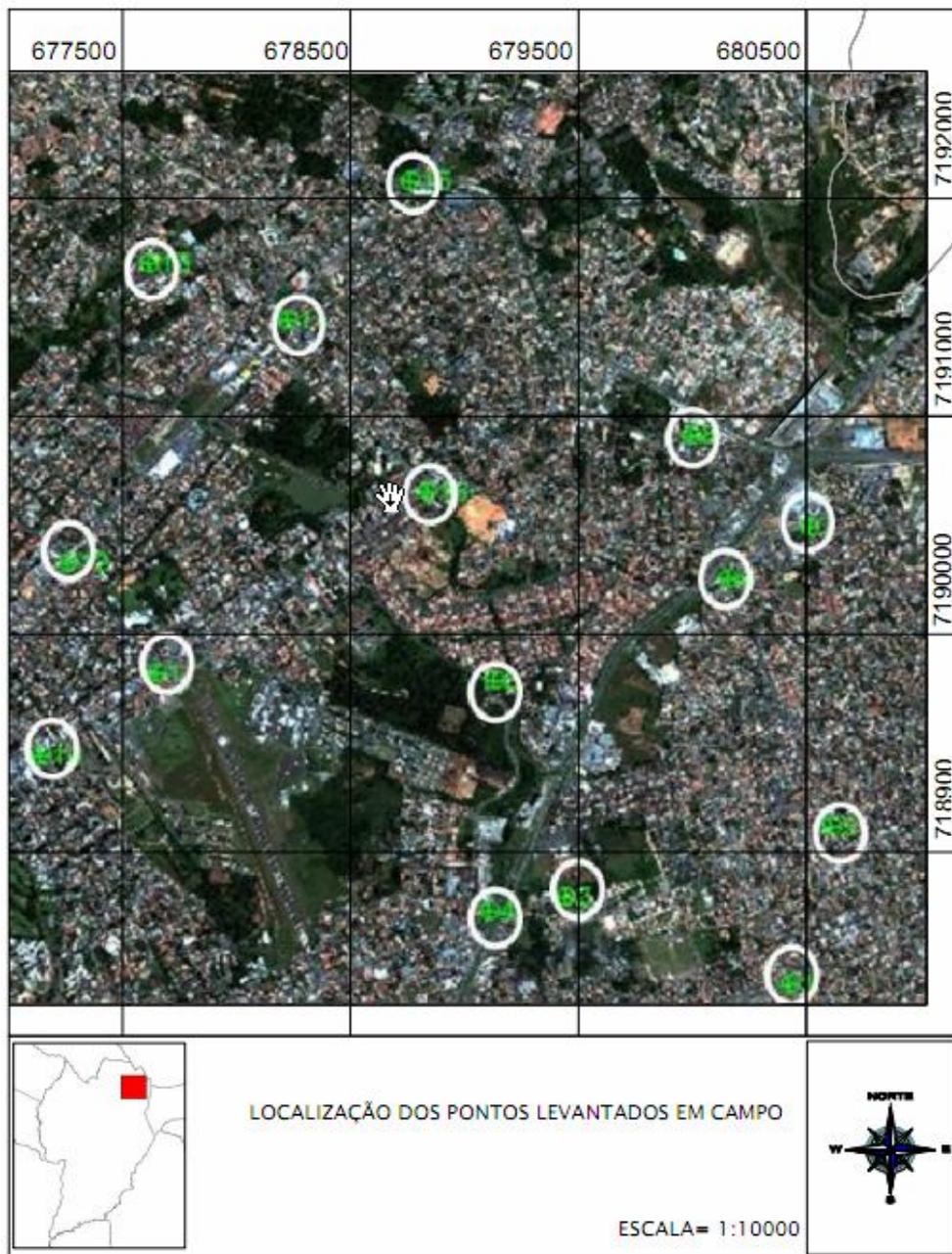


FIGURA 17 – DISTRUBUIÇÃO DOS PONTOS COLETADOS EM CAMPO
 FONTE: O autor (2010)

Os resíduos para os pontos de controle e verificação estão apresentados no quadro 10.

Pontos	Mínimo	Médio	Maximo
Pontos de controle	0,1664	0,9500	1,9831
Pontos de verificação	0,2628	0,8050	1,1467

QUADRO 10 – VALORES (EM METRO) DOS RESÍDUOS PARA OS PONTOS COLETADOS EM

CAMPO
FONTE: O autor (2010)

Os resíduos encontrados, tanto para o experimento utilizando as coordenadas do mosaico de ortofotos quanto para o experimento com as coordenadas levantadas em campo foi inferior a um pixel.

Verificou-se que algumas regiões da imagem não ficaram completamente corrigidas, mas, esse resultado pode ter ocorrido devido à resolução do modelo digital de terreno ou mesmo a alterações ocorridas no período entre a geração das curvas e a tomada da imagem.

4.2 Classificação das imagens

Tendo conhecimento da realidade de campo de algumas edificações foram coletadas amostras de tipos de telhado nas imagens. As classes de telhado selecionadas foram: fibrocimento, telhado de cerâmica, telha pintada ou laje e telha metálica. Além dos telhados foram selecionadas amostra das classes asfalto, solo e vegetação. Foram realizados quatro experimentos: o primeiro com as bandas originais da imagem GeoEye, o segundo com a imagem GeoEye combinada com a imagem radar, o terceiro com a imagem GeoEye segmentada e o último com a imagem segmentada combinada com a imagem radar.

A segmentação da imagem foi realizada no *software* EDISON, foram testados os parâmetros de cor, forma e região. Quando se atribui maior peso para cor, ocorre a homogeneização das feições, englobando feições de aparência espectral semelhante numa mesma classe. A segmentação que apresentou melhor resultado foi com peso 9 para forma, 6.5 para cor e região mínima de 15 pixels.

A partir das amostras foi gerada a árvore de decisão que criou as regras para a classificação. Estas regras analisam o valor de pixel em determinada banda, dependendo do valor lhe é atribuída uma classe, ou parte-se para a análise do valor do mesmo pixel em outra banda, e assim sucessivamente até que todos os pixels tenham uma classe correspondente.

Analisando as regras criadas pode-se observar que a banda da imagem radar contribui principalmente na diferenciação entre as classes de telhado metálico, asfalto e fibrocimento. Os quadros 11, 12, 13 e 14 trazem os valores da matriz de confusão para as amostras em cada um dos experimentos realizados.

No primeiro experimento utilizou-se apenas a imagem GEOEYE, o resultado da classificação apresentou confusão principalmente nas classes Metal/Fibrocimento, Metal/Laje e Telha Cerâmica/Solo.

	Fibrocimento	Pintura/Laje	Telha de Cerâmica	Solo	Asfalto	Metal	Vegetação
Fibrocimento	208	0	0	0	50	0	0
Pintura/Laje	0	247	0	2	0	19	0
Telha de Cerâmica	3	0	222	37	1	0	2
Solo	0	2	26	235	0	0	0
Asfalto	67	0	1	1	193	02	0
Metal	0	24	0	0	1	117	0
Vegetação	0	0	0	0	2	0	259

QUADRO 11 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM ORIGINAL GEOEYE
FONTE: O autor (2010)

No segundo experimento utilizou-se a imagem GEOEYE combinada com a RADARSAT-2, o resultado da classificação apresentou confusão principalmente nas classes Asfalto/Fibrocimento e Metal/Laje.

	Fibrocimento	Pintura/Laje	Telha de Cerâmica	Solo	Asfalto	Metal	Vegetação
Fibrocimento	234	0	0	0	24	0	0
Pintura/Laje	0	247	0	2	1	9	0
Telha de Cerâmica	2	0	222	17	1	0	3
Solo	0	2	17	235	1	0	0
Asfalto	39	0	4	1	219	0	0
Metal	0	13	0	0	0	129	0
Vegetação	0	0	0	0	2	0	260

QUADRO 12 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM GEOEYE COMBINADA COM A IMAGEM RADARSAT-2
FONTE: O autor (2010)

No terceiro experimento utilizou-se a imagem GEOEYE segmentada, o resultado da classificação apresentou confusão principalmente nas classes Asfalto/Fibrocimento e Solo/Telha.

	Fibrocimento	Pintura/Laje	Telha de Cerâmica	Solo	Asfalto	Metal	Vegetação
Fibrocimento	251	0	0	0	7	0	0
Pintura/Laje	0	268	0	0	0	0	0
Telha de Cerâmica	0	0	260	5	0	0	0
Solo	0	0	3	260	0	0	0

Asfalto	2	0	0	0	262	0	0
Metal	0	0	0	0	0	142	0
Vegetação	0	0	0	0	0	0	262

QUADRO 13 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM SEGMENTADA GEOEYE
 FONTE: O autor (2010)

No quarto experimento utilizou-se a imagem GEOEYE segmentada combinada com a imagem RADARSAT-2, o resultado da classificação apresentou confusão principalmente nas classes Asfalto/Fibrocimento e Metal/Laje.

	Fibrocimento	Pintura/Laje	Telha de Cerâmica	Solo	Asfalto	Metal	Vegetação
Fibrocimento	251	0	0	0	7	0	0
Pintura/Laje	0	268	0	0	0	0	0
Telha de Cerâmica	0	0	265	0	0	0	0
Solo	0	0	0	263	0	0	0
Asfalto	0	0	0	0	262	0	0
Metal	0	0	0	0	0	142	0
Vegetação	0	0	0	0	0	0	262

QUADRO 14 - MATRIZ DE CONFUSÃO DA IMAGEM SEGMENTADA COMBINADA COM A IMAGEM RADARSAT-2
 FONTE: O autor (2010)

Pode-se observar no quadro 11, que existe confusão entre as classes fibrocimento e asfalto. O mesmo ocorre para solo e telhado de barro que possuem materiais espectralmente semelhantes. A combinação com a imagem radar diminuiu a confusão entre as classes, mas não eliminou completamente a confusão.

Já na matriz de confusão da imagem segmentada, quadro 13, observa-se uma melhor separação entre as mesmas classes. Na combinação entre a imagem segmentada com a radar as únicas amostras que apresentaram confusão foram fibrocimento e asfalto.

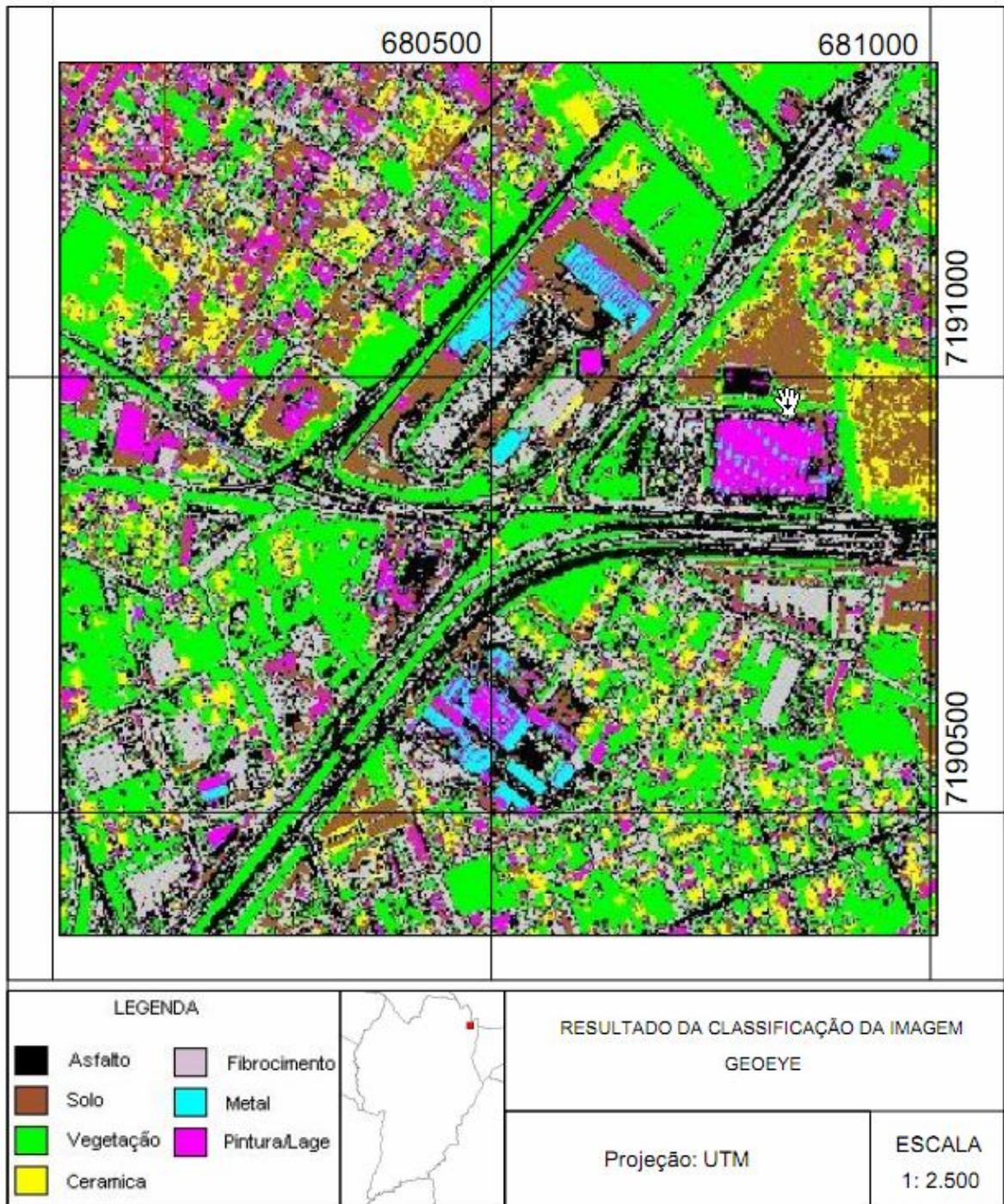
Outra medida de utilizada na avaliação da classificação foi o índice *Kappa* que se refere á acurácia da classificação. Quanto mais próximo de 1 o valor de *kappa*, maior a proporção de acerto da classificação, quadro 15.

Imagem utilizada no experimento	KAPPA	VARIÂNCIA
GEOEYE	0,836466	9,58E-05
GEOEYE+RADAR	0,904561	6,11E-05
GEOEYE Segmentada	0,988425	7,81E-06

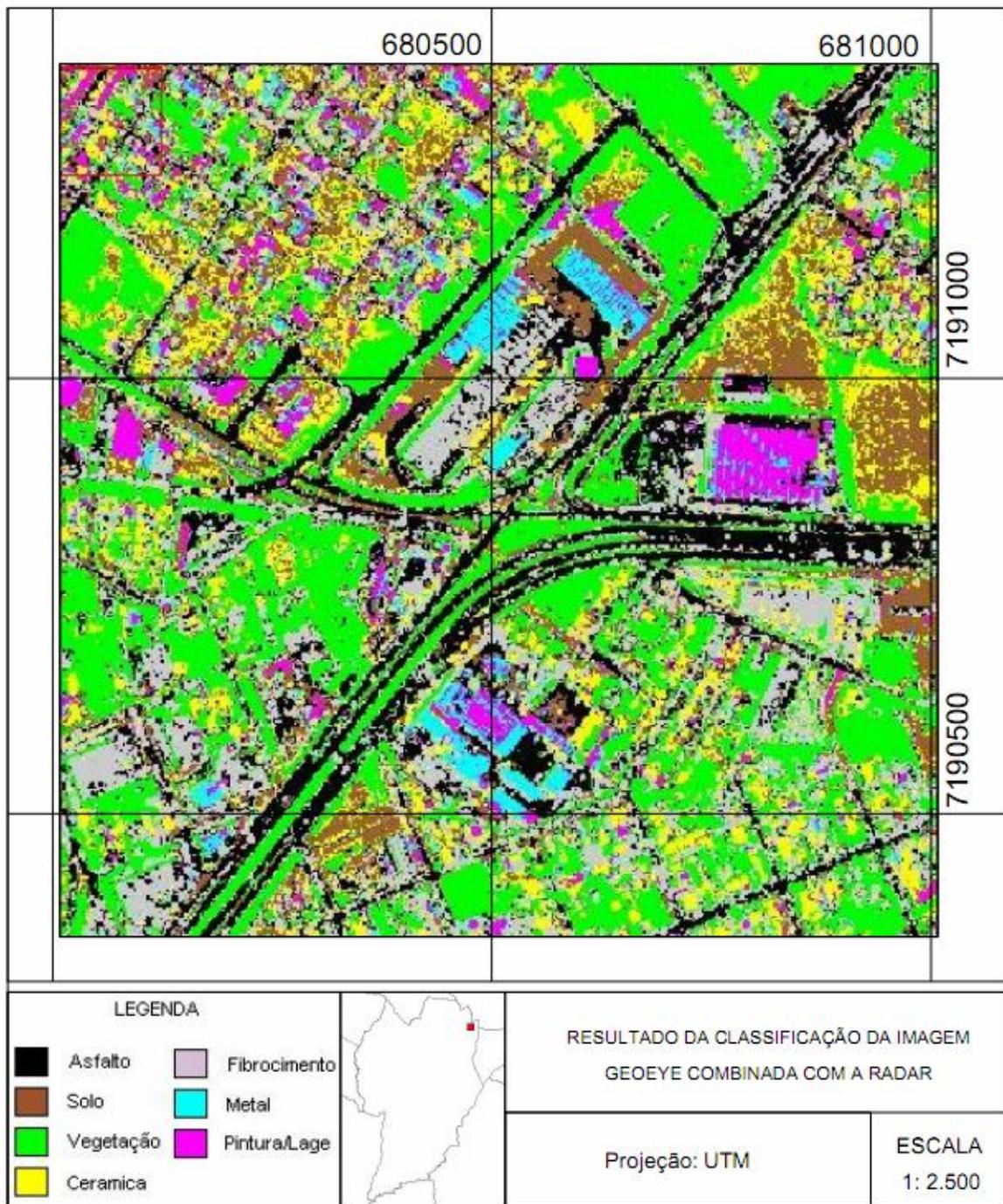
GEOEYE Segmentada+RADAR	0,993195	4,6E-06
-------------------------	----------	---------

QUADRO 15 – VALORES DO INDICE KAPPA DA CLASSIFICAÇÃO
FONTE: O autor (2010)

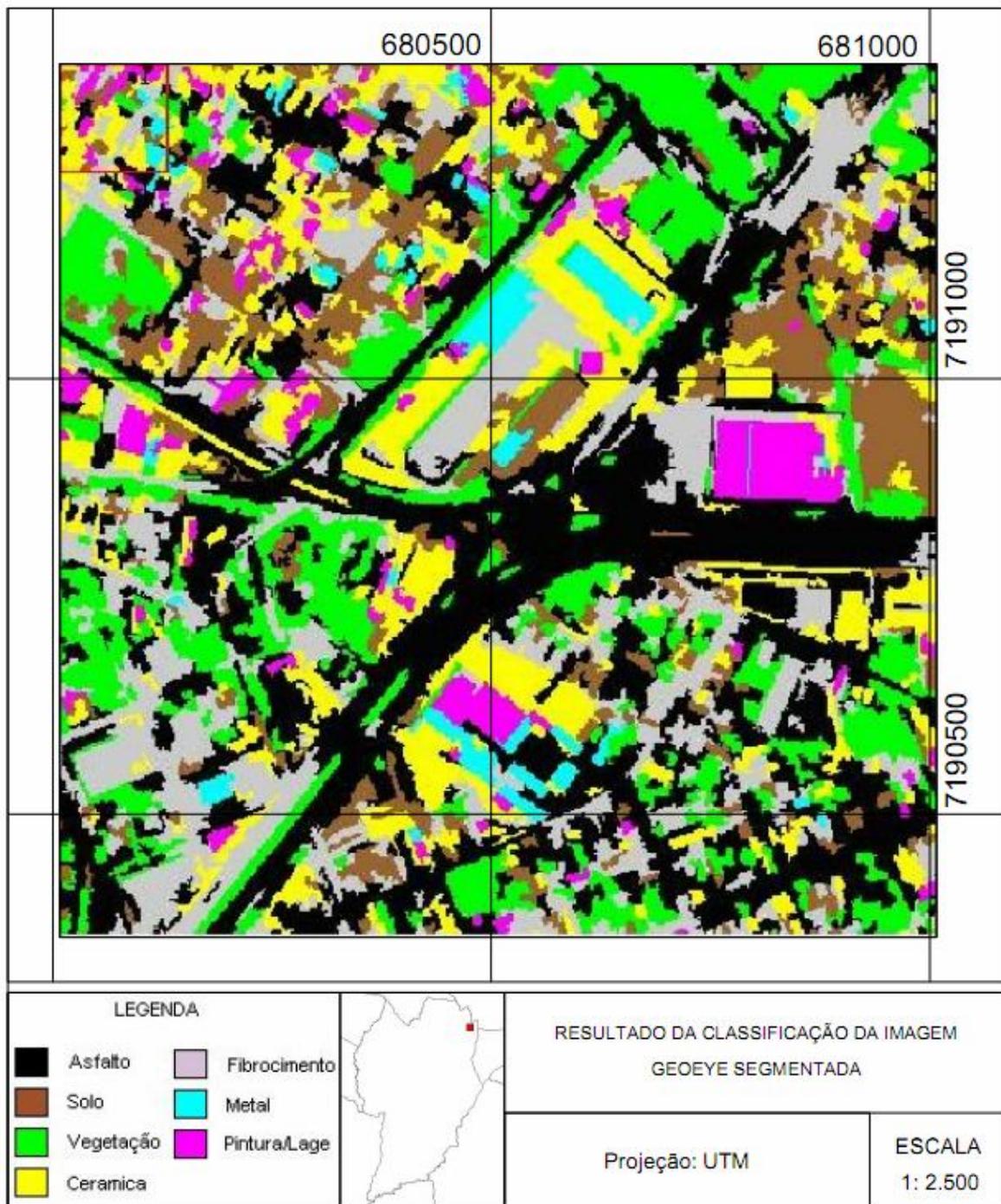
Podemos observar que os experimentos realizados com as imagens combinadas apresentaram maior valor pra o índice *kappa*, o melhor resultado aparece quando se tem a combinação da imagem GEOEYE segmentada com a imagem RADARSAT-2. O resultado final das classificações é apresentado na figura 18.



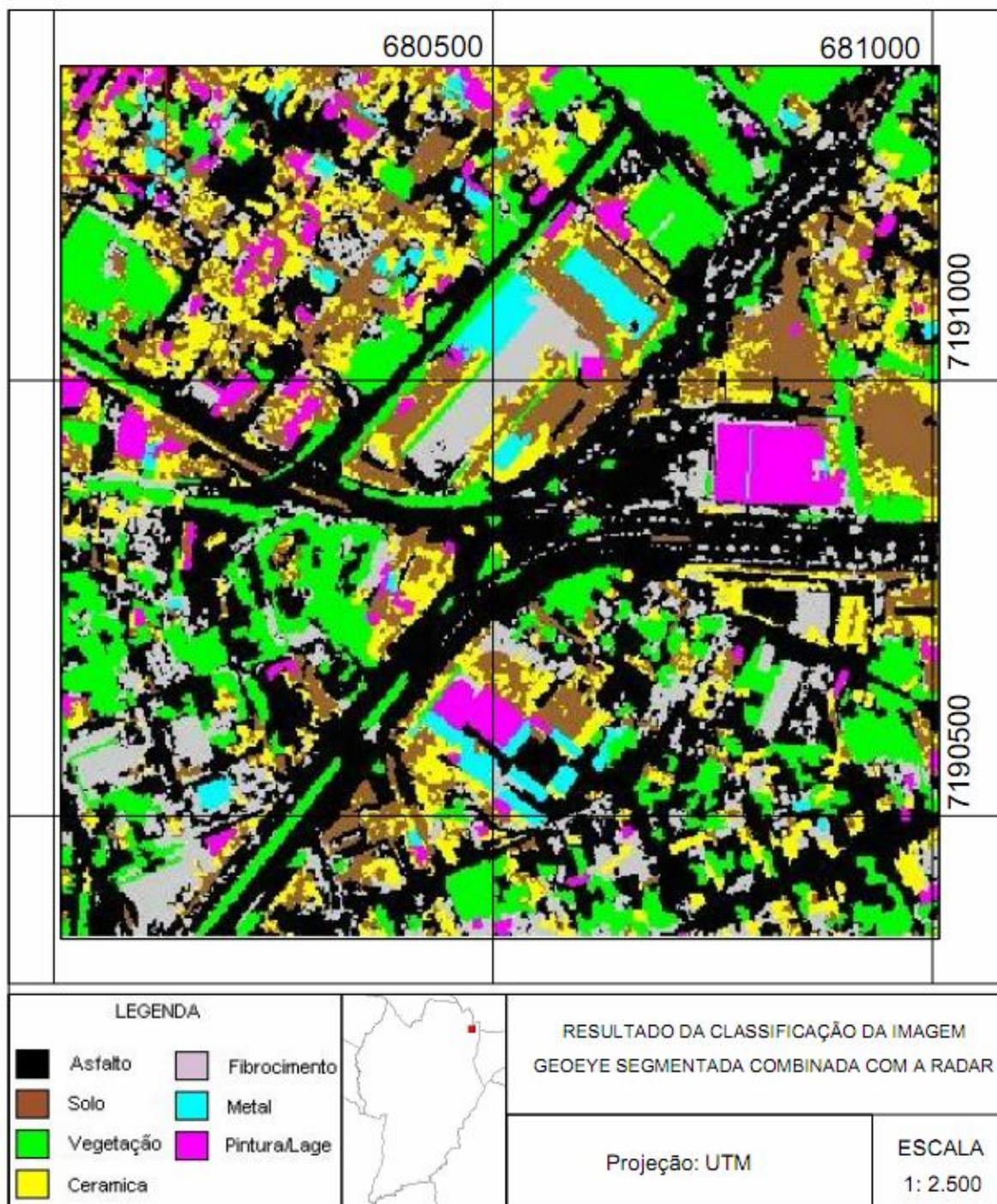
a) Classificação da imagem GEOEYE



b) Classificação da imagem GEOEYE combinada com a imagem RADARSAT-2.



c) Classificação da imagem segmentada



d) Classificação da imagem segmentada combinada com a imagem RADARSAT-2.

FIGURA 18 – CLASSIFICAÇÃO FINAL
FONTE: O autor (2010)

A classificação da imagem GEOEYE, figura 18-a, apresentou grande confusão entre as classes de interesse. No primeiro experimento o efeito “pixelado” visível na imagem classificada causa grande confusão visual. Além, disso boa parte

dos pixels de uma mesma edificação identificada em campo como pertencente a uma determinada classe acabaram sendo classificados em mais de uma classe.

Porém, quando combinamos a imagem GEOEYE com a RADARSAT foi possível melhorar a separação de alguns materiais, como por exemplo, fibrocimento e asfalto, como se observa na figura 18-b.

Quando utilizou-se a imagem GeoEye segmentada houve menor confusão entre as classes, como se pode observar nas figuras 18-c e 18-d. Nestes experimentos as classes estão melhor discriminadas, isto demonstra-se tanto visualmente quanto na análise dos valores do índice *kappa*.

A classificação da imagem segmentada combinada com a imagem radar foi a que apresentou menor confusão, isto é perceptível principalmente entre as classes telhado de cerâmica e solo. A principal contribuição da imagem RADARSAT no resultado final se dá na caracterização de estruturas metálicas que apresentam alto fator de reflexão nesta imagem.

Comparando o resultado da classificação com realidade de campo da região pode-se comprovar que o método de experimentado permitiu a separação das classes de interesse. As amostras coletadas em campo foram corretamente classificadas no experimento que reuniu a informação da imagem GEOEYE segmentada com a imagem RADARSAT-2.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar a viabilidade de combinação de imagens ópticas com imagens radar para discriminar elementos presentes numa cena urbana. Certos cuidados como a calibração, filtragem e a compatibilização geométrica dos dados foram etapas imprescindíveis para não comprometer as análises.

Um dos objetivos específicos foi verificar se o modelo de transformação projetiva é adequado para a correção geométrica da imagem RADAR. A correção geométrica realizada utilizando o modelo de transformação projetiva apresentou um resultado satisfatório na correção da imagem, apesar de o ângulo de visada ser lateral, os valores de resíduos para os pontos de controle e verificação ficaram menores que 1 metro.

Para melhorar a qualidade da classificação tratou-se da eliminação do *speckle*, aplicando filtros. Através do cálculo da média normalizada e do desvio da média verificou-se que o filtro estatístico de média com janela 5x5 foi o que permitiu a eliminação do *speckle* com maior eficiência.

O resultado dos experimentos de classificação utilizando árvore de decisão apresentou-se coerente com a realidade da área de estudo, o melhor resultado foi verificado no experimento utilizando a imagem GEOEYE segmentada combinada com a imagem radar, uma vez que esta imagem contribui para a caracterização de estruturas metálicas que apresentam alto fator de reflexão. O valor do índice *kappa* ficou próximo de 1 para as classes analisadas neste experimento. Foi possível ainda comprovar a confiabilidade da técnica através da visita de campo.

Porém esta técnica depende da habilidade do analista na aquisição de amostras representativas de cada classe para a construção da árvore de decisão. Algumas classes tiveram resultados mais acurados enquanto outras apresentaram confusão. Áreas com menor semelhança espectral ficaram bem definidas, já as áreas semelhantes não repetiram o resultado.

Recomenda-se que em estudos futuros sejam realizados experimentos utilizando outras técnicas de classificação, como por exemplo, lógica fuzzy. Outra possibilidade é a geração de texturas para ajudar na discriminação dos objetos. Recomenda-se ainda realizar estudos comparativos entre as diferentes formas de

polarização, neste trabalho não foi possível pois, a imagem disponível foi adquirida somente com polarização horizontal (HH).

6. REFERÊNCIAS

ARAKI, Hideo. **Fusão de informações espectrais, altimétricas e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução espacial**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2005.

BASLY, L., CAUNEAU, F., RANCHIN, T. e WALD, L. SAR Imagery in Urban Area. In: Simpósio da EARSeL, Sensoriamento Remoto Operacional para o Desenvolvimento Sustentável, 18, 1998. Enschede. **Anais**. Enschede, Holanda, 1998 p.11-14.

CCRS (CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING). Disponível em: <<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>>. Acesso em: 04/08/2008.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento De Imagens Digitais**. 1. ed. Curitiba: Ed. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR, 2004. v. 1. 209 p.

COHEN, J. **A coefficient of an agreement for nominal scales**. Educational and Psychological Measurement, n.20, p. 37-46, 1960.

COTLIER, Carlos G. e LÓPEZ D. A. Detect Urban Poverty Pockets with Ultra Fine Beam Images, POLinSAR, 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, 2009. <<http://earth.esa.int/workshops/polinsar2009/index.html>>

ESTEVAM, Eliane A. **Classificação de áreas de favelas a partir de imagens IKONOS: viabilidade de uso de uma abordagem orientada a objetos**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, 2006.

GEOEYE Product Guide v1.0.1 <<http://www.Geoeye.com/CorpSite/>> Acesso em: 04/10/2010

HALL, G. Brent et all. Integration of Remote Sensing and GIS to Detect Pockets of Urban Poverty: The Case of Rosario, Argentina. **Transactions in GIS**. 2001, v.5, n.3, 2001. p. 235-256.

HUINCA, Suelen Cristina Movio ; ARAKI, Hideo. ; CAVALHEIRO, Anna Carolina. **Correção Geométrica de Imagens Quickbird para Áreas Urbanas Utilizando Modelos Geométricos Generalizados e Dados de Laser Scanning**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. Análise Urbana, 2005. v. 12. p. 4545-4551.

HUSSIN, Yousif A. **Effect of polarization and incidence angle on radar return from urban features using I-band aircraft radar data**. The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, Holanda, 1995.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Especiais) Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/?content=introducao>>. Acesso em: 10/06/2009.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective**. Upper Sadle River New Jersey: Prentice Hall dos EUA, 2000.

LEEUW, M. R. e CARVALHO, L.M. T. Performance evaluation of several adaptative speckle filters for SAR imaging. Em: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009. **Anais**. Natal, Brasil, 2009 p. 7299-7305.

LILLESAND, T. e KIEFER R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Wiley. Terceira Edição. New York, 1994.

LOIZOU, C. P. e PATTICHIS, C. S. **Despeckle Filtering Algorithms and Software for Ultrasound Imaging**. Morgan & Claypool, 2008.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2006.

MOLCH, Katrin. **Radar Earth observation Imagery for Urban Area Characterization**. JRC Scientific and Technical Reports. 2009.

PIMENTA, Nuno R. de C. **PhotoFinder 2 - Classificação e Pesquisa de Fotografias Digitais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2008.

PINTO, Joaquim S. et al. **Métodos para Estimação de Reprodutividade de Medidas**. Disponível em: <http://users.med.up.pt/joakim/intromed/web_t9_g1.htm> . Acesso em 10/01/2011.

RIBEIRO, Bárbara M. G. **Avaliação Das Imagens Worldview-li para o Mapeamento da Cobertura do Solo Urbano Utilizando o Sistema InterIMAGE**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2010

RICHARDS, John A. e JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Springer. Terceira Edição. Berlin, 1999.

SOARES, João V. **Fundamentos de Radar**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/dsr/vianeir/radar/DOCs_PDFs/> . Acesso em: 10/10/2010.

SOERGEL, Uwe. **Radar Remote Sensing Of Urban Areas**. Springer. Berlin, 2010

SONKA, Milan. **Image processing analysis and machine vision**. Thompson. Terceira edição, 2008.

TSO, Brandt e MATHER, Paul M. **Classification Methods for Remotely Sensed Data**. Taylor & Francis Group. Segunda Edição. Londres 2001.

UFPR, **Orientação para Normalização de Trabalhos Acadêmicos** <http://www.portal.ufpr.br/tutoriais_normaliza/modelo_dissertacao.pdf> Acesso em: 10/02/2012

WEYDAHL, D. Johan et all. Comparison of RADARSAT-1 and IKONOS satellite images for urban features detection. **Information Fusion 6. 2005**. p. 243–249.