

MONITORAMENTO DE FAIXA DE DUTOS: UMA ABORDAGEM QUE UTILIZA TÉCNICA DETECÇÃO DE MUDANÇAS E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Mara Lúcia MARQUES¹

Mateus Vidotti FERREIRA²

Paulina Setti RIEDEL³

Resumo

O objetivo deste estudo foi desenvolver um procedimento metodológico para o monitoramento de faixa de dutos utilizando técnica de detecção de mudanças e a abordagem baseada em objetos para classificar o uso e cobertura da terra a partir de imagens de alta resolução espacial. O sensoriamento remoto viabiliza o diagnóstico e acompanhamento de inspeção externa de dutos e as mudanças no uso e cobertura da terra, contribuindo para a identificação de elementos que possam representar risco para os dutos. O procedimento foi aplicado em duas áreas: Área A, que abrange 11,82 km² e Área B, com 0,54 km². Os resultados mostram que o processo de detecção de mudanças e as classificações de cobertura da terra nestas áreas obtiveram um bom índice de concordância. As principais mudanças que ocorreram foram de solo exposto para vegetação rasteira, causada por variações sazonais na atividade agrícola, áreas de extração de areia e construção de rodovias. A diferença entre os resultados obtidos para áreas A e B ocorre devido à menor variabilidade espectral dos objetos na Área B. A detecção de alterações e procedimento de classificação mostrou-se viável para o monitoramento e não foram identificadas atividades que possam comprometer a integridade física da faixa de dutos.

Palavras Chave: Faixa de dutos. Análise baseada no objeto. cobertura da terra. GeoEye.

Abstract

Pipeline monitoring: an approach using change detection technique and high resolution images

The objective of this study was to develop a methodology for monitoring pipelines using the change detection technique, which relies on object based analysis of high spatial resolution images to classify land use and cover in. Remote sensing is essential for the diagnosis and monitoring of external inspection of pipelines and changes in land use and cover, contributing to the identification of elements that may pose a risk to the pipeline. The change detection procedure was applied in two areas: Area A, which covers 11.82 km², and Area B, measuring 0.54km². The results show that the change detection procedure and the classifications of land cover in the change areas obtained a high level of agreement. The main changes that occurred were from Bare Soil to Grassland, caused by variations in seasonal agricultural activity, areas of grit extraction, and highway construction. The difference in the results obtained for Areas A and B is due to lower spectral variability of the objects in Area B. The change detection and classification procedure proved to be feasible for monitoring and no activities were identified that could compromise the physical integrity of the pipeline.

Key words: Pipeline. Object based image analysis. Land cover. GeoEye.

¹ Pós-doutoranda junto ao Departamento de Geologia Aplicada IGCE/UNESP - E-mail: maralucia.marques@hotmail.com

² Doutorando em Geociências e Meio Ambiente IGCE/UNESP - E-mail: mateusvidotti@yahoo.com.br

³ Docente do Departamento de Geologia Aplicada IGCE/UNESP - Av. 24A, 1515 , Rio Claro, SP - 13506-900 - E-mail: psriedel@rc.unesp.br

INTRODUÇÃO

Nas atividades dutoviárias, a prevenção e respostas aos acidentes são funções do sistema de monitoramento da faixa de dutos, que é composto pelos setores de inspeções interna e externa dos dutos. No Brasil, a principal empresa responsável por estas atividades é a empresa Transpetro/Petrobras. O setor inspeção interna é responsável pelo controle de variáveis como: pressão; vazão; temperatura; densidade e volume, durante o processo de transferência de produtos. O setor de inspeção externa é composto por observações aéreas e terrestres que percorrem toda a extensão das faixas de servidão (aproximadamente 20m) e áreas adjacentes. Realizam-se inspeções geológico-geotécnicas e verificação de irregularidades que possam causar esforços mecânicos anormais nas tubulações ou colocar em risco as instalações, tais como: erosão; movimentos de massa; desmoronamento; tráfego de veículos e/ou equipamentos pesados sobre a faixa; crescimento de vegetação; deficiência do sistema de drenagem da faixa; queimadas; ocupação da faixa por terceiros; realização de obras nas proximidades; deficiência na sua demarcação e sinalização de advertência; afloramento do duto; travessia de cursos d'água e cruzamentos com rodovias, ferrovias, redes elétricas e as condições de tráfego das estradas de acesso (ZIRNIG; HAUSAMANN; SCHREIER, 2002; HAUSAMANN et al., 2005).

O trabalho de inspeção externa dos dutos é realizado por acesso terrestre ou sobrevoo. A frequência de visitas é programada pela intensidade de atividade humana sobre a área de influência da faixa. A demanda por inspeções deve aumentar devido à tendência de intensificação das atividades dutoviárias, promovida pelo desenvolvimento do setor petroquímico no Brasil. O processo de inspeção pode ser auxiliado pelo emprego dos produtos de sensoriamento remoto.

A utilização dos produtos e a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto (SR) se mostram fundamentais no diagnóstico e monitoramento do processo de ocupação do espaço, na medida em que as imagens constituem importante fonte de informação sobre os fenômenos que ocorrem na superfície da terra e são essenciais na compreensão e modelagem das dinâmicas das mudanças no uso e cobertura da terra, o que contribui na identificação de elementos que podem constituir risco ao duto. A utilização do sensoriamento remoto, assim como do sistema de informação espacial (SIG) potencializa a detecção de mudanças (sensoriamento remoto), permitindo uma melhor frequência de aquisição de informação sistemática e ferramentas que possibilitam a integração e análise dos dados espaciais (ROPER; DUTTA, 2005).

A aplicação dos produtos de sensoriamento remoto no processo de detecção de mudanças requer a seleção de imagens com a mesma resolução espacial e espectral, que possibilitam a identificação de feições para comparações entre as imagens (LU et al., 2004). A detecção de mudança pode ser descrita como um processo de identificação e quantificação de alterações em objetos ou fenômenos espaciais a partir de observações multitemporais (SINGH, 1989; COPPIN; BAUER, 1994; SETO et al., 2002; LU et al., 2004).

Para Zirnig et. al. 2001, o emprego de técnicas de detecção de mudanças torna-se uma estratégia para detectar alterações na vizinhança de uma faixa de duto, considerando que na detecção de mudanças os dados de da imagem são comparados com os dados correspondentes na imagem anterior, a partir de cada pixel das imagens. As mudanças na paisagem são refletidas por diferenças entre os pixels correspondentes. Porém, a comparação por este método pode resultar em problemas devido às mudanças naturais na vegetação, iluminação e condições da superfície, como a ocorrência de neve ou chuva, que resultam em alterações radiométricas nos pixels. Assim, importantes correções são necessárias para reduzir a elevada proporção de falsas mudanças geradas pela detecção automática a partir de imagens de alta resolução espacial.

As imagens orbitais com alta resolução espacial apresentam uma tecnologia de rápida evolução, que propicia a obtenção de informações espaciais e temporais sobre os diferentes objetos da superfície, com resoluções cada vez mais detalhadas e mais frequentes e permitem o mapeamento feições específicas, bem como um acompanhamento mais eficiente dos processos dinâmicos, entre os quais se enquadra o uso da terra.

A complexidade dos elementos presentes na superfície terrestre torna-se um problema para classificação digital do uso e cobertura da terra, a partir de imagens de alta resolução, pois ocorre mistura espectral de objetos na imagem. Desta forma, a análise de imagem baseada no objeto procura definir os objetos pela associação da resposta espectral aos atributos espaciais e de contexto, gerando segmentos com homogeneidade espectral, geométrica, textura e posição dos elementos da imagem (ENCARNAÇÃO, 2004).

Na classificação do uso e cobertura da terra pela análise baseada no objeto a estruturação das classes requer a elaboração de uma rede hierárquica fundamentada na rede semântica e nas características físicas dos objetos que compõe determinada classe. A rede semântica representa uma estrutura lógica que relaciona os objetos ou classes a partir dos seus significados e relações (ANTUNES, 2003).

De acordo com Hofmann (2001), na abordagem baseada no objeto, as classes podem ser estruturadas em três tipos de redes hierárquicas: (a) hierarquia com hereditariedade – as classes são agrupadas a partir dos atributos físicos dos objetos (cor, textura, forma), as subclasses herdam as características das superclasses; (b) hierarquia de grupos – refere-se às relações semânticas entre as classes, podem ser agrupadas em uma única superclasse, subclasses com diferentes características físicas, mas com significado semântico coerente; (c) grupos estruturados – possui função de agrupar classes de objetos após o processo de segmentação baseado em classificação, é utilizada na operação de refinamento dos objetos.

No processo de detecção de mudanças, a utilização de imagens de alta resolução espacial requer um estudo mais detalhado das suas propriedades geométricas e espectrais, devido à complexidade de informações e variação espectral dos objetos e a resolução radiométrica das imagens, que são características que exigem avaliação e definição de atributos e limiares adequados para o processamento e classificação digital das imagens.

A pesquisa possui como objetivo o desenvolvimento e avaliação da aplicabilidade de um procedimento metodológico de detecção de mudanças da cobertura da terra para o monitoramento de faixa de dutos. O procedimento utiliza a abordagem baseada no objeto para a detecção e classificação das áreas de mudanças nas imagens orbitais de alta resolução espacial.

ÁREA DE ESTUDO

A partir do traçado da faixa de duto Rio de Janeiro-Belo Horizonte, foi delimitado um setor com extensão de 30,7km e 400m de largura, compreendendo uma área de 11,89km², que cruza os municípios de Duque de Caxias e Nova Iguaçu (RJ) (Figura 1).

A área de estudo está inserida na região metropolitana do Rio de Janeiro, a qual possui 10.787.333 habitantes (IBGE, 2010) e se constitui na segunda maior área metropolitana do Brasil. Os municípios de Duque de Caxias e Nova Iguaçu estão entre os mais populosos, apresentando uma dinâmica socioeconômica acelerada devido à presença de grandes parques industriais e proximidade da capital. A densidade de ocupação da terra é muito irregular. A infra-estrutura urbanística e a oferta de equipamento social inexistem ou são muito precárias. Este fato é agravado pela política de investimento ter como alvo preferencial o núcleo da metrópole, o que apenas faz aumentar o contraste existente entre o núcleo e a periferia.

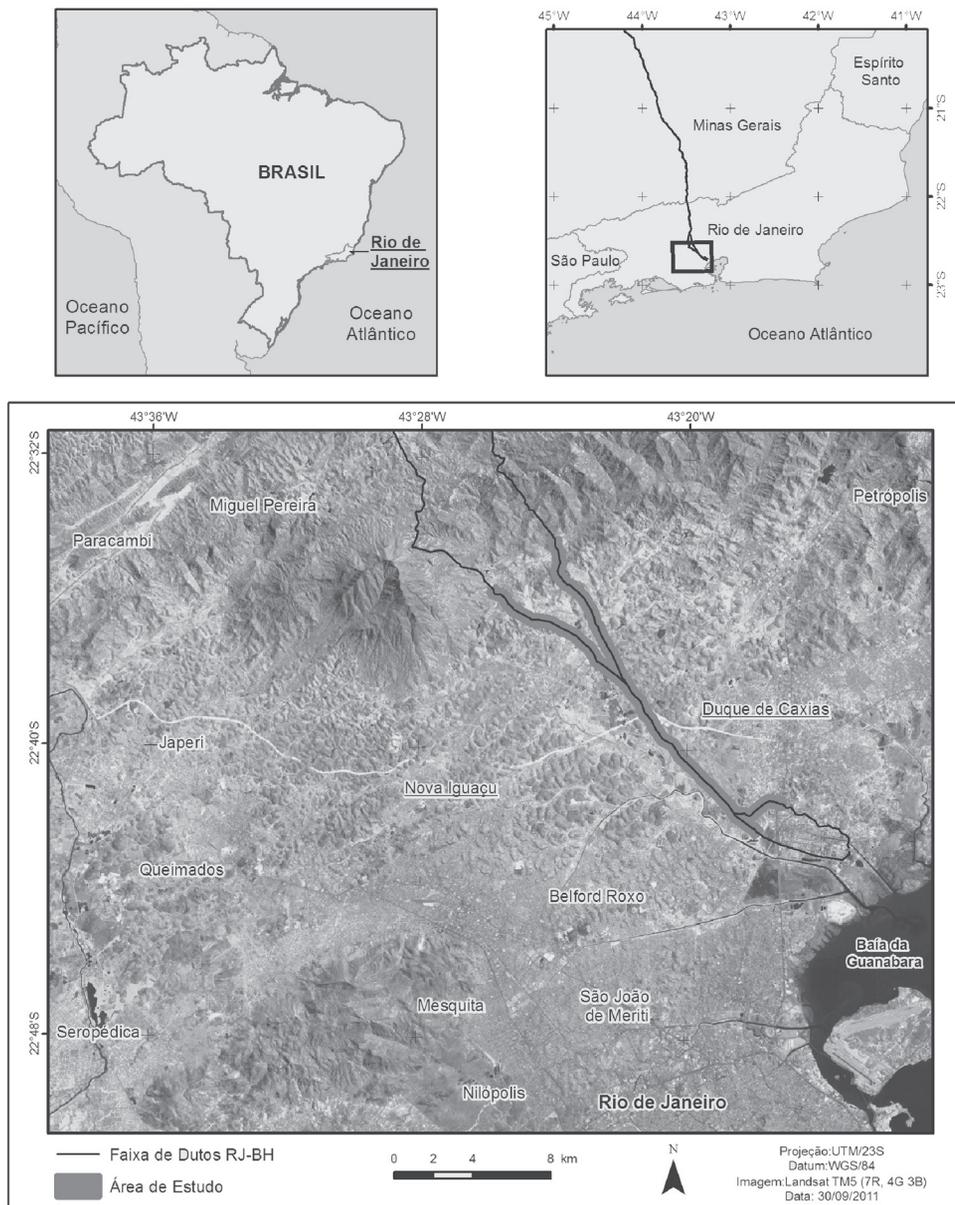


Figura 1 - Localização da Área de Estudo A

Na área de estudo ocorrem diferentes sistemas de relevo: planícies aluviais, planície alúvio-colúvio marinhas, colinas isoladas, colinas associadas a morros baixos e escarpas serranas. Observa-se que as aglomerações urbanas ocuparam as áreas de planícies fluviais, marinhas e lagunares, seguido pelas áreas de colinas e morros baixos, enquanto que a vegetação natural encontra-se melhor preservada em regiões das escarpas serranas. O trecho selecionado como área de estudo é localizado na área periférica da região metropolitana e é caracterizado por apresentar uma baixa densidade de ocupação urbana, ocorrendo uma concentração urbana no sul e um pequeno núcleo de ocupação no norte da área.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Material

As imagens GeoEye possuem resolução radiométrica de 11 bits e são compostas por quatro bandas multiespectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), com resolução espacial de 1,65m e uma banda pancromática, com resolução espacial de 0,41m, reamostrada para 0,5m. Os parâmetros de aquisição das imagens GeoEye utilizadas estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de aquisição das imagens GeoEye

Data	Ângulo de Elevação do Imageamento	Azimute do Imageamento	Ângulo de Elevação Solar	Azimute Solar
03/01/2010	62,34	140,41	62,43	96,19
28/04/2010	62,09	133,67	45,40	42,85

Desenvolvimento da pesquisa

As etapas de desenvolvimento da pesquisa estão apresentadas no diagrama na figura 2.

Pré-processamento de imagem

No pré-processamento de imagem, foram realizados os seguintes procedimentos: (a) as correções geométricas - o processo de ortoretificação foi realizada utilizando o Coeficiente Polinomial Rational (RPC) para janeiro e abril de 2010, e (b) fusão de imagem - as imagens GeoEye de janeiro e abril passaram por um processo de fusão de bandas multiespectrais (2m) com a banda pancromática (0,5 m), obtendo imagens com resolução espacial de 0,5 m para todas as bandas.

Elaboração do mapa temático T1

A definição de classes de cobertura da terra, apresentadas na tabela 2, ocorreu em função da identificação das atividades que possam causar risco à integridade da faixa de duto. A partir desta definição a determinação das classes foi baseada nas características espectrais dos objetos. Para a análise de mudanças sobre a faixa de duto, foi elaborado o mapa de cobertura da terra inicial, a partir da interpretação visual da imagem de janeiro de 2010.

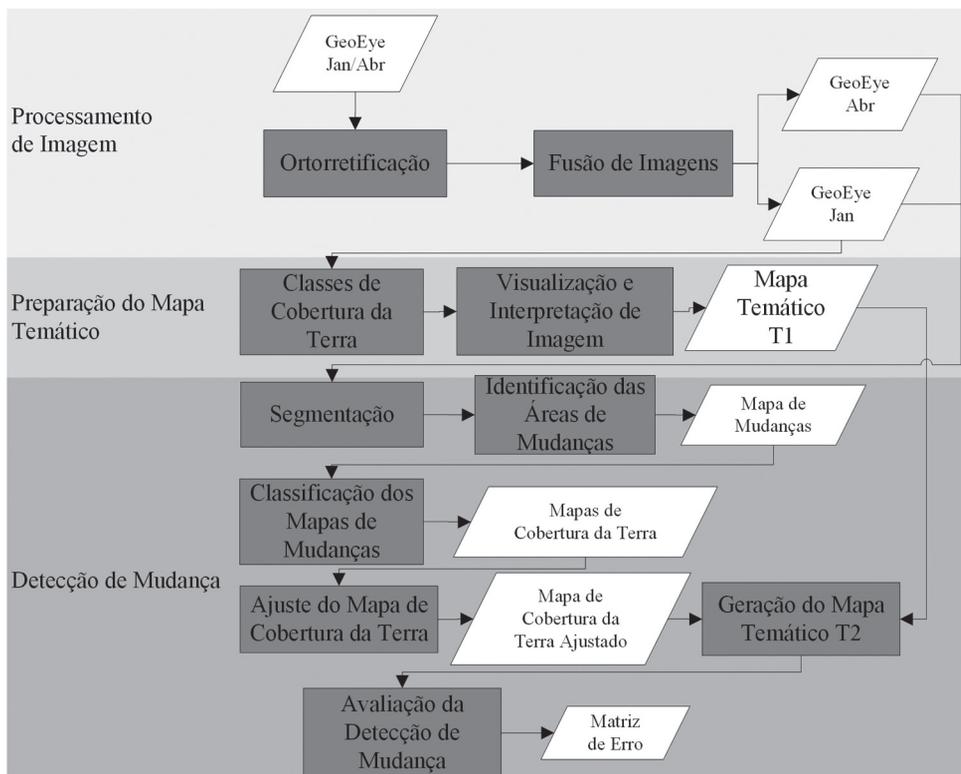


Figura 2 - Fluxograma da pesquisa

Tabela 2 - Descrição das classes de cobertura da terra

Classe	Descrição
Sombra	Sombra de elementos naturais e construídos
Asfalto	Rodovias e arruamentos pavimentados com cobertura asfáltica
Solo Exposto Claro	Áreas sem construções e sem cobertura de vegetação com tonalidade clara
Solo Exposto Médio	Áreas sem construções e sem cobertura de vegetação com média tonalidade
Solo Exposto Escuro	Áreas sem construções e sem cobertura de vegetação com tonalidade escura
Vegetação Arbórea	Árvores de porte médio a alto, presentes em áreas florestadas, agrícolas e urbana
Vegetação Rasteira	Áreas composta por gramíneas e pequenos arbustos
Cobertura Clara	Concreto claro em telhado e áreas pavimentadas e telhados de alumínio
Cobertura Média	Telhado cerâmico com media tonalidade
Cobertura Escura	Telhado em concreto e cerâmica escuros e áreas pavimentadas em concreto escuro
Piscina	Piscinas
Área Alagada	Áreas temporariamente cobertas por água
Rio/Reservatório	Cursos de água, lagos e reservatórios

Procedimentos para detecção de mudança

O processo de detecção de mudança foi realizado no software eCognition (DEFINIENS, 2009).

Segmentação

O algoritmo de segmentação multiresolução foi empregado para gerar segmentos com diferentes níveis de detalhe. Esta abordagem usa a segmentação por crescimento de regiões, que consiste no agrupamento de regiões adjacentes de acordo com o critério de similaridade, considerando a heterogeneidade interna das regiões, através da definição dos parâmetros de escala, forma, tonalidade, compacidade, suavidade e bandas espectrais, também pode ser utilizado um plano de informação temático (Baatz e Schaper, 2000). A segmentação foi realizada utilizando as bandas visível: Azul (B), Verde (G) e Vermelho (R) e infravermelho próximo (N) das imagens de Janeiro e Abril (B_T1, G_T1, R_T1, N_T1, B_T2, G_T2, R_T2, N_T2), bem como Mapa Temático T1. Neste processo, o nível mais adequado de segmentação para delinear os objetos foi o Nível III, com os seguintes parâmetros: 40 de escala, forma 0,5 e compacidade 0,5.

Identificação das áreas de mudança (Mapa de Mudança – MM)

Para delimitar as áreas de mudança, foi realizada uma análise da imagem resultante da álgebra multitemporal das bandas do Vermelho (R). Assim, a banda do Vermelho de janeiro (R_T1) foi subtraída da banda do Vermelho de abril (R_T2), levando em consideração três possibilidades de ocorrência: Não Mudança (NM), áreas que permanecem inalterados; Mudança Vermelha (MV), que ocorre quando os objetos têm baixa resposta espectral (tons escuros) na imagem T1 e alta resposta (tom claro) em T2; Mudança Azul (MA), quando os objetos têm alta resposta espectral na imagem T1 e baixa resposta de T2 (Figura 3). Os limiares utilizados para definir estas três possibilidades de ocorrência estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Descrição dos limiares aplicados na determinação das mudanças e não mudanças, Área A

Classe	Jan-Abr
Não Mudança	$-180 \leq NM \leq -80$
Mudança Vermelha	$MV > -80$
Mudança Azul	$MB < -180$

Classificação do mapa de mudança (Mapa de Cobertura da Terra - MCT)

Foram realizadas classificações da cobertura da terra para as áreas identificadas como Mudança Vermelha (MV) e Mudança Azul (MA), a partir da abordagem baseada no objeto, utilizando os parâmetros do comportamento espectral, da característica geométrica e de textura dos objetos. Para este processo de classificação da cobertura da terra foi definida para as áreas de mudança Uma estrutura hierárquica (Figura 4).

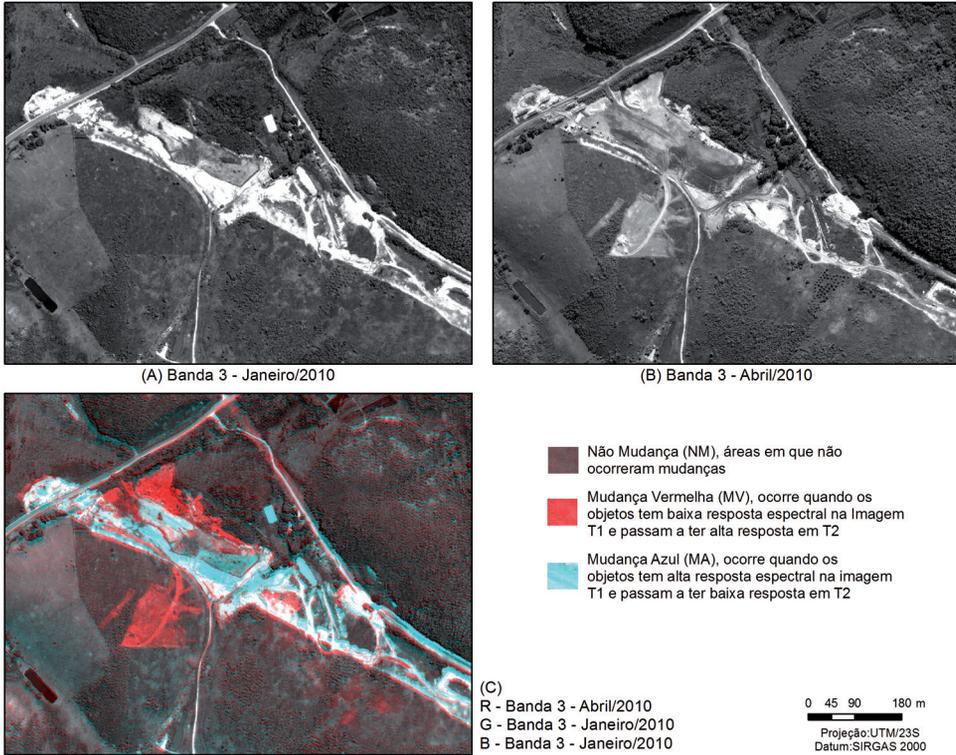


Figura 3 - Definição das áreas de mudança

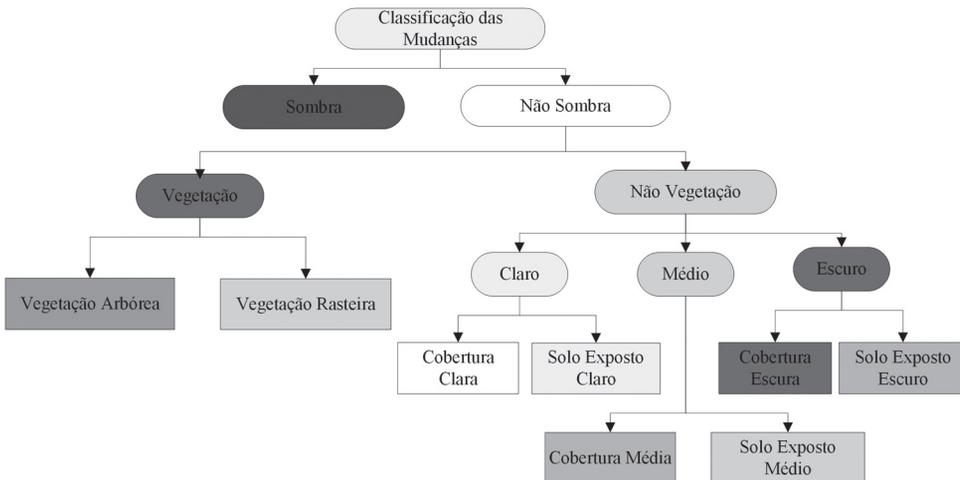


Figura 4 - Estrutura hierárquica da classificação

De acordo com a estrutura hierárquica de classes proposta, foram adquiridas amostras de treinamento de cada classe de cobertura da terra. Estas amostras são necessárias para descrição das classes e do contexto onde estão inseridas, permitindo com a análise dos histogramas de atributos gerados pelo editor de amostras, a escolha dos atributos para a classificação. O processo de classificação foi realizado pelo algoritmo *Assign Class*, utilizando a soma das bandas do visível para separação das áreas de Sombra e Não-Sombra ($Sombra=R+G+B<255$), as áreas de sombra foram consideradas como Não-Mudança. As áreas de Não-Sombra foram classificadas, pelo índice vegetação normalizado, em Vegetação ($NDVI_T2>0,45$) e Não-Vegetação. Para separação de vegetação arbórea de rasteira foi utilizado o atributo de textura homogênea de média das bandas R_T2, G_T2, B_T2 e N_T2 (GLCM Homogeneity-alldir $<0,4$) e a textura do desvio padrão da banda do infravermelho próximo (GLCM Standard deviation $N_T2>3,5$). Para as demais classes de cobertura da terra, incluídas na classe Não-Vegetação, foi realizada a separação entre as respostas espectrais com tonalidade Claro ($R_T2+G_T2>437$), Escuro ($R_T2+G_T2<370$) e Médio ($437d\leq R_T2+G_T2d\leq 370$). A classe Claro foi classificada como Cobertura Branca (Mean $B_T2>373$, Area $<150m^2$ e Compactness <1.6) e Solo Exposto Claro. A classe Escuro foi separada em Cobertura Concreto (HSI Transformation Hue ($R=R_T2, G=G_T2, B=BT2$) <0.66 Area $<150m^2$ e Compactness <1.6) e Solo Exposto Escuro. A classe Médio foi redefinida para Solo Exposto Médio.

Na análise e quantificação das áreas de mudanças da cobertura da terra foram agrupadas classes que possuem mesmas características de uso da terra, assim foram agrupadas as classes de Exposto Claro, Médio e Escuro em Solo Exposto e as classes de Cobertura Clara, Média e Escura em Área Construída.

Ajuste do Mapa de Cobertura da Terra (Mapa de Cobertura da Terra Ajustado - MCTA)

Foram identificadas as áreas de Mudança e Não-Mudança com o intuito de analisar as atividades que interferem na integridade do duto. Destaca-se que o período analisado de quatro meses pode ser considerado curto para a detecção de algumas mudanças, porém é adequado para o monitoramento das áreas de servidão e de influência dos dutos, devido à necessidade de controlar e gerenciar as atividades de terceiros nessas áreas para prevenção de acidentes, considerando que a frequência de observações deve ser proporcional à densidade de ocupação da área de influência. Desta forma, em algumas áreas as visitas passam a ser semanais e até mesmo diárias. Portanto, para adequar e controlar as possíveis mudanças foram consideradas algumas premissas, sendo que a primeira premissa pondera a impossibilidade do desenvolvimento de vegetação arbórea neste curto período; a segunda premissa considera como constantes as classes de cobertura da terra Rio/Reservatório, Asfalto e Piscina, e a terceira premissa determina que não ocorra mudança para a classe Sombra.

Assim, após a classificação automática das classes de cobertura da terra das áreas definidas como Mudança, foram aplicadas algumas regras no processo de classificação para limitar a identificação e classificação de falsas mudanças (Tabela 4).

Tabela 4 - Regras utilizadas no processo de classificação para identificar e limitar as falsas mudanças

MCT	Regra	Objeto em T1	MCTA
Vegetação Arbórea	Com existência de objeto (T1)	Área Alagada	Vegetação Rasteira
Solo Exposto	Com existência de objeto (T1)	Cobertura Média	Cobertura Média
Vegetação Rasteira	Com existência de objeto (T1)	Solo Exposto	Vegetação Rasteira
Área Construída	Com existência de objeto (T1)	Área Construída	Não Mudança
Vegetação Arbórea	Com existência de objeto (T1)	Vegetação Arbórea	Não Mudança
Vegetação Rasteira	Com existência de objeto (T1)	Vegetação Rasteira	Não Mudança
Solo Exposto	Com existência de objeto (T1)	Solo Exposto	Não Mudança
Sombra	Com existência de objeto (T1)	Sombra	Não Mudança
Área Alagada	Com existência de objeto (T1)	Área Alagada	Não Mudança
Solo Exposto	Com existência de objeto (T1)	Área Construída	Não Mudança

Geração do Mapa Temático T2

A partir do Mapa de Cobertura da Terra atualizado com as mudanças identificadas no período, foi realizada atualização do Mapa Temático T1. Assim, através da sobreposição destas informações, foi gerado o Mapa Temático T2.

Validação da classificação

Foram utilizadas matrizes de erros e o coeficiente de concordância Kappa para determinar a exatidão estatística dos resultados de áreas de Mudanças e Não Mudanças, antes e após o ajuste realizado para limitar as falsas mudanças. Foram avaliados também os resultados obtidos na classificação de mudanças das classes de cobertura da terra. A matriz de erros representa a exatidão de mapeamento, pela análise de concordância entre amostras de referência e o produto da classificação. Portanto, foram adquiridas amostras de referência a partir da interpretação visual da imagem GeoEye pelo método de amostragem estratificada aleatória. Na avaliação das áreas de mudança foram adquiridas 50 amostras de cada classe de Mudança e Não Mudanças. Para validação da classificação das classes de cobertura da terra que apresentaram mudanças foram obtidas 50 amostras para cada classe de cobertura, nos segmentos definidos como área de mudança, valor determinado como adequado para determinação da acurácia na detecção de mudanças de acordo com Congalton e Green (2009).

Com os valores e a variância de Kappa, é possível obter a estatística Z. Este teste foi aplicado para determinar se a classificação é significativamente melhor do que o resultado aleatório e para avaliar se duas matrizes de erro são significativamente diferentes.

Aplicação do procedimento proposto na Área de Estudo B

Para analisar a aplicabilidade do método proposto e comparar os resultados obtidos, foi realizado um recorte sobre a área de estudo, o qual foi denominado Área B. Esta área possui 0.54km², correspondendo a 4.6% da Área A, que possui 11,82 km² (Figura 5).

Sobre a nova área foram aplicados os procedimentos definidos nos itens 3.1.3.1 ao 3.1.3.6. Os valores de alguns limiares utilizados para identificação e classificação das áreas de mudança foram redefinidos de acordo com as características espectrais e geométricas apresentadas na área. Para detecção das mudanças foram determinados os limiares descritos na tabela 5.

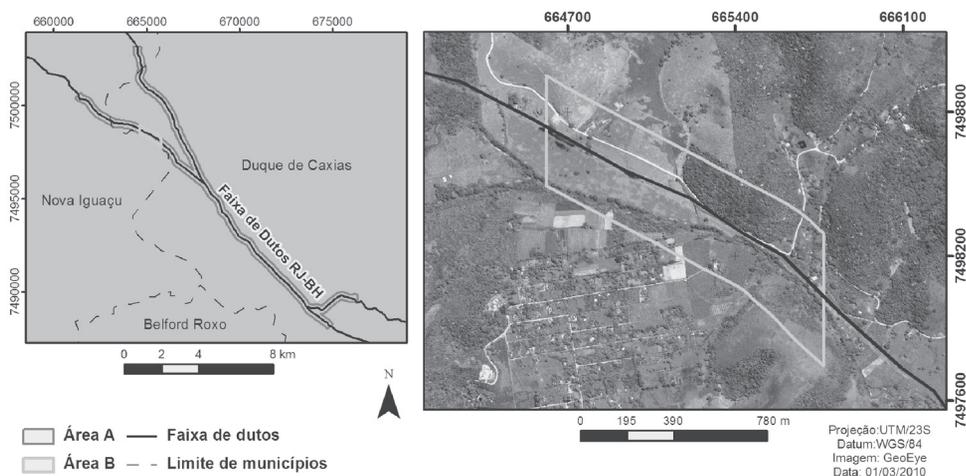


Figura 5 - Área de Estudo B

Tabela 5 - Descrição dos limiares plicados na determinação das mudanças e não mudanças, Área B

Classe	Jan-Abr
Não Mudança	$-175 \leq NM \leq -55$
Mudança Vermelha	$MV > -55$
Mudança Azul	$MB < -175$

Na validação da classificação foram coletadas 25 amostras para cada classe de Mudança e Não Mudança. Para classificação das classes de cobertura da terra, 10 amostras de cada classe de cobertura, obtidas a partir dos segmentos definidos como áreas de mudança.

Nas áreas de Mudança Vermelha, a partir do algoritmo *Assign Class*, foram classificadas as áreas de Sombra e Não-Sombra ($Sombra = R + G + B < 285$), as áreas de sombra foram consideradas como Não-Mudança. As áreas de Não-Sombra foram separadas pelo índice vegetação normalizado, nas classes Vegetação ($NDVI_T2 > 0,45$) e Não-Vegetação. Para separação de vegetação arbórea de rasteira foi utilizado o atributo de textura homogênea de média das bandas R_T2 , G_T2 , B_T2 e N_T2 ($GLCM \text{ Homogeneity-all dir} < 0,54$) e textura do desvio padrão da banda do infravermelho próximo ($GLCM \text{ Standard deviation } N_T2 > 2,5$). Para as demais classes de cobertura da terra, incluídas na classe Não-Vegetação, foi realizada a separação entre as respostas espectrais com tonalidade Claro ($R_T2 + G_T2 > 300$), Escuro ($R_T2 + G_T2 < 240$) e Médio ($240 \leq R_T2 + G_T2 \leq 300$). A classe Claro foi classificada como Cobertura Branca ($Mean B_T2 > 372$, $Area < 80m^2$ e $Compactness \leq 3,8$) e Solo Exposto Claro. A classe Escuro foi separada em Cobertura Concreto ($HSI \text{ Transformation Hue } (R = R_T2, G = G_T2, B = BT2) < 0,66$, $Area < 38m^2$ e $Compactness \leq 2$) e Solo Exposto Escuro. A classe Médio foi redefinida para Solo Exposto Médio.

Para as áreas de Mudança Azul foi realizada a separação das áreas de Sombra e Não-Sombra ($Sombra = R + G + B < 285$), as áreas de sombra foram consideradas como Não-Mudança. As áreas de Não-Sombra foram separadas, pelo índice vegetação normalizado, nas classes Vegetação ($NDVI_T2 > 0,5$) e Não-Vegetação. Para separação de vegetação arbórea de rasteira foi utilizado o atributo de textura homogênea de média das bandas R_T2 , G_T2 ,

B_T2 e N_T2 (GLCM Homogeneity-all dir<0,26) e textura do desvio padrão da banda do infravermelho próximo (GLCM Standard deviation N_T2>5,2). Para as demais classes de cobertura da terra, incluídas na classe Não-Vegetação, foi realizada a separação entre as respostas espectrais com tonalidade Claro ($R_T2+G_T2>300$), Escuro ($R_T2+G_T2<240$) e Médio ($240\leq R_T2+G_T2\leq 300$). A classe Claro foi classificada como Cobertura Branca (Mean $B_T2>372$, Area<80m² e Compactnessd≤3.8) e Solo Exposto Claro. A classe Escuro foi separada em Cobertura Concreto (HSI Transformation Hue ($R=R_T2$, $G=G_T2$, $B=BT2$)<0,66, Area <38m² e Compactnessd≤2) e Solo Exposto Escuro. A classe Médio foi redefinida para Solo Exposto Médio.

RESULTADO

Os resultados obtidos pelo método de detecção de mudanças podem ser analisados na matriz de erro apresentada na tabela 6. Os resultados alcançados após o ajuste de limitação das falsas mudanças podem ser observados na tabela 7. Destaca-se que os valores de acerto geral foram de 81 e 86% e coeficiente de concordância Kappa foram de 0,62 e 0,72. Estes índices, de acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), indicam uma substancial concordância, que representa uma adequada precisão da identificação das áreas de mudanças.

Tabela 6 - Matriz de erro das áreas de mudança para Área de Estudo A

Dado Classificado	Dado de Referência		
	Mudança	Não Mudança	Total
Mudança	45	14	59
Não Mudança	5	36	41
Total	50	50	100

Acerto Geral = **81%**
Kappa = **0,62**

Tabela 7 - Matriz de erro das áreas de mudança ajustadas para Área de Estudo A

Dados Classificados	Dados de Referência		
	Mudança	Não Mudança	Total
Mudança	37	1	38
Não Mudança	13	49	62
Total	50	50	100

Acerto Geral = **86%**
Kappa = **0,72**

Mesmo inserida em uma região metropolitana com dinâmica socioeconômica acelerada, a área de estudo apresentou restritas áreas de mudanças. Foram identificadas como mudanças uma área de 0,89km², correspondendo a 7,5% do total da área analisada (com 11,82 km²). Observa-se que as principais mudanças ocorridas foram entre Solo Exposto e

Vegetação Rasteira que correspondem, em grande parte, às alterações ocorridas nos estágios de cultivo, considerando que o uso da terra permanece agrícola. Destaca-se que as mudanças para Solo Exposto também estão associadas às áreas de extração de material e atividades de construção do anel viário Arco Rodoviário Metropolitano, devido à intensificação das atividades de terraplanagem e corte de talude. A análise das mudanças permitiu verificar que esta área apresenta limitações no processo de expansão urbana, apesar da proximidade com o núcleo da região metropolitana. Isto pode ser explicado por dois fatores que acontecem no setor sul da área de estudo: o primeiro fator se refere à ocorrência de uma zona de interesse ambiental (ZIA), devido à contaminação do solo por produtos químicos provenientes da desativação de uma indústria de pesticida; o segundo fator está relacionado à frequência de alagamentos no entorno das áreas construídas, o que inviabiliza a construção de novas edificações.

De acordo com o Teste-Z, e considerando-se um intervalo de confiança de 95%, os resultados da classificação de cobertura da terra por classe são melhores que aleatório, pois o valor de Z (8,703) foi maior do que 1,96 (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise dos resultados de Kappa individual da matriz de erro para Área de Estudo A

Matriz de Erro	Kappa	Variância	Estatística Z
Classificação Área A	0,39	0,0019735	8,703

O processo de detecção de mudanças obteve um índice alto de concordância, porém, como pode ser observado nas tabelas 9 e 10, o índice de concordância Kappa para a classificação de cobertura da terra foi de 0,39, com overall de 54%, o que pode ser constatado nas áreas de mudanças classificadas como Vegetação Arbórea e principalmente na classe Área Construída, que obtiveram um baixo desempenho na classificação, com valores de Kappa condicional de 0,36 e 0,14 para Vegetação Arbórea e de 0,66 e 0,04 para Área Construída. Isto deve ser considerado para que não ocorra interpretação equivocada do crescimento da vegetação e expansão da área construída (Figura 6).

As classes que obtiveram melhor desempenho na classificação foram: Solo Exposto (acerto geral de 91% e Kappa condicional do usuário por classe de 1,0) e Vegetação Rasteira (acerto geral de 82% e Kappa condicional do produtor por classe de 0,76). Observa-se, pela análise do desempenho por classe, que o erro de inclusão da classe Área Construída na classe Solo Exposto, provocou um baixo valor do condicional Kappa do usuário (0,39).

Tabela 9 - Matriz de erro e acurácia da classificação da cobertura da terra para Área de Estudo A

Dado Classificado	Dado de Referência				Total
	Área Construída	Solo Exposto	Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	
Área Construída	3	0	0	1	4
Solo Exposto	41	50	0	0	91
Vegetação Arbórea	5	0	12	6	23
Vegetação Rasteira	1	0	38	43	82
Total	50	50	50	50	200

Acerto geral=54%
Kappa=0,39

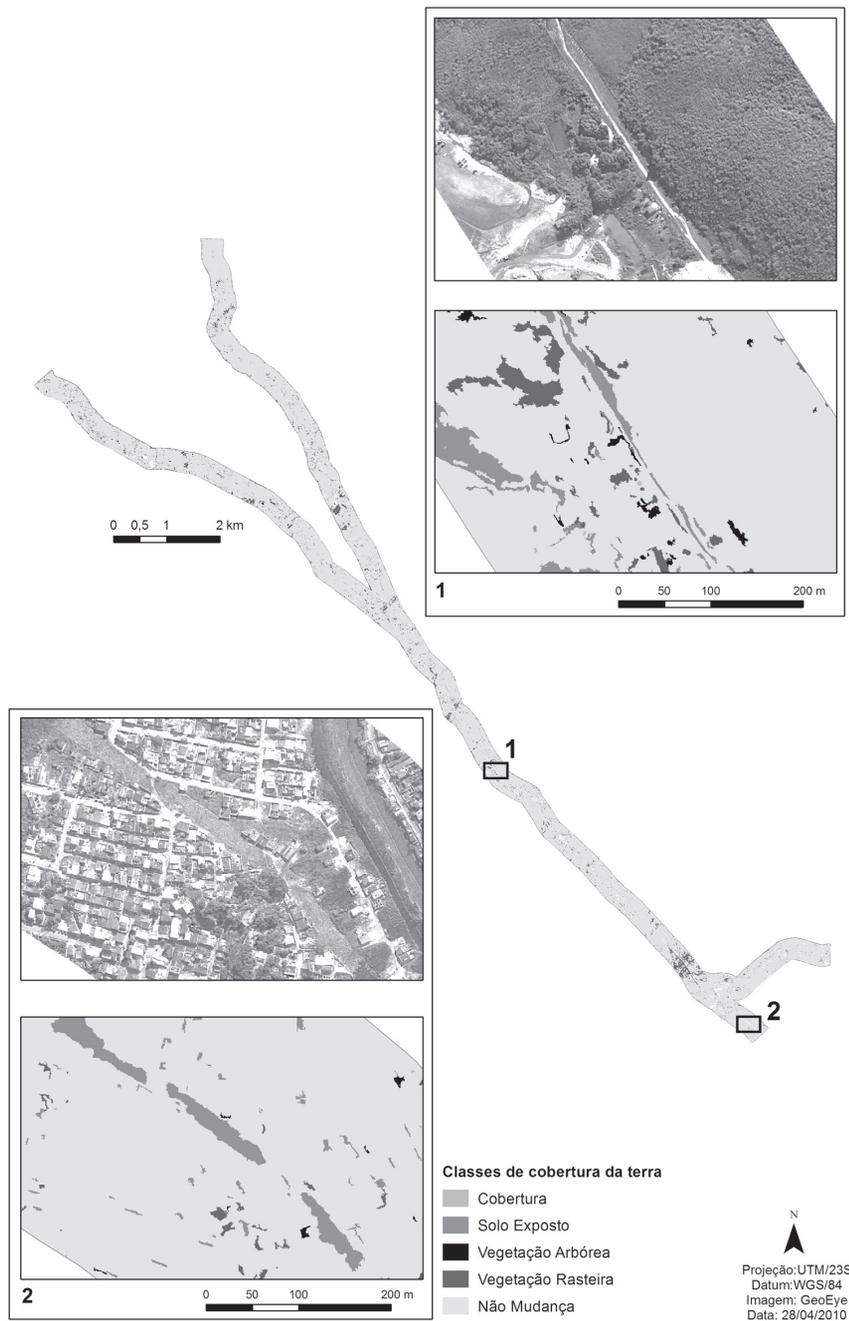


Figura 6 - Classificação da cobertura da terra nas áreas de mudança, para a Área de Estudo A

Tabela 10 - Kappa condicional das classes de cobertura da terra para Área de Estudo A

Classe de Cobertura da Terra	Acurácia do Usuário	Kappa (Usuário)	Acurácia do Produtor	Kappa (Produtor)
Área Contruída	75%	0,66	6%	0,04
Solo Exposto	55%	0,39	100%	1,0
Vegetação Arbórea	52%	0,36	24%	0,14
Vegetação Rasteira	52%	0,36	86%	0,76

Com base na análise dos resultados obtidos, verificou-se que o procedimento empregado para detectar mudanças apresentou bons resultados para a Área de Estudo A, e esse desempenho foi confirmado quando o procedimento foi aplicado na Área de Estudo B, com resultados globais para a detecção de alterações de 92% e coeficiente Kappa de 0,84 (Tabela 11). Depois da correção de falsas mudanças, o acerto geral foi de 94%, com um índice de concordância Kappa de 0,88 (Tabela 12).

Tabela 11 - Matriz de erro das áreas de mudança para Área de Estudo B

Dados Classificados	Dados de Referência		
	Mudança	Não Mudança	Total
Mudança	23	2	21
Não Mudança	2	23	29
Total	25	25	50

Acerto Geral = **92%**
Kappa = **0,84**

Tabela 12 - Matriz de erro das áreas de mudança ajustadas para Área de Estudo B

Dados Classificados	Dados de Referência		
	Mudança	Não Mudança	Total
Mudança	22	0	22
Não Mudança	3	25	28
Total	25	25	50

Acerto Geral = **94%**
Kappa = **0,88**

De acordo com o Teste-Z, considerando um intervalo de confiança de 95%, os resultados da classificação de cobertura da terra para a Área de Estudo B são melhores do que aleatório, uma vez que o valor de Z obtido (8,399) foi maior do que 1,96 (Tabela 13).

Tabela 13 - Análise dos resultados de Kappa individual da matriz de erro para Área de Estudo B

Matriz de Erro	Kappa	Variância	Estatística Z
Classificação Área B	0,80	0,0090798	8,399

Para Área de Estudo B os resultados obtidos com a classificação da cobertura da terra nas áreas de mudanças apresentaram valores de overall de 87% e coeficiente Kappa de 0,80, indicando uma concordância substancial da classificação (Figura 7).

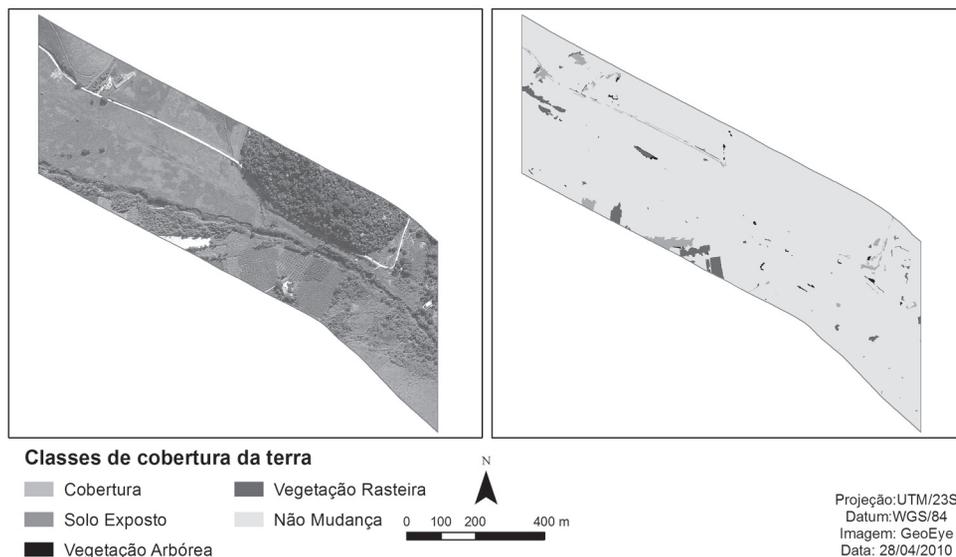


Figura 7 - Classificação da cobertura da terra nas áreas de mudança, para a Área de Estudo B

Tabela 14 - Matriz de erro e acurácia da classificação da cobertura da terra para Área de Estudo B

Dados Classificados	Dados de Referência			Total
	Solo Exposto	Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	
Solo Exposto	10	0	0	10
Vegetação Arbórea	0	6		6
Vegetação Rasteira	0	4	10	14
Total	10	10	10	30

Acerto geral = **87%**
Kappa = **0,80**

Tabela 15 - Kappa condicional das classes de cobertura da terra para Área de Estudo B

Classe de Cobertura da Terra	Acurácia do Usuário	Kappa (Usuário)	Acurácia do Produtor	Kappa (Produtor)
Solo Exposto	100%	1,0	100%	1,0
Vegetação Arbórea	100%	1,0	60%	0,5
Vegetação Rasteira	71%	0,6	100%	1,0

A classe Solo Exposto obteve um acerto de 100% com Kappa conditional do usuário e do produtor por classe de 1,0 (Tabelas 14 e 15). Na Área B os procedimentos de classificação da cobertura da terra nas áreas detectadas como mudanças obtiveram melhores resultados, em comparação com a Área A. Com destaque para a classe Solo Exposto, que obteve acerto geral de 100%, com coeficiente de concordância Kappa 1,0, que corresponde a uma concordância quase perfeita, segundo índice proposto por Landis e Koch, 1977.

A melhora significativa dos resultados obtidos para a Área B, em relação à Área A, ocorreu porque a área B é mais restrita e com menor variação dos objetos na superfície. Portanto, foi possível determinar a variabilidade das respostas espectrais e geométricas dos segmentos e definir limiares mais precisos para os parâmetros aplicados no processo de detecção e classificação das mudanças.

O resultado da análise de Kappa, que compara as matrizes de erro das classificações de cobertura da terra é apresentado na tabela 16. De acordo com o Teste-Z, e considerando-se um intervalo de confiança de 95%, a comparação entre a classificação de cobertura as áreas determinou que os resultados são significativamente diferentes, porque o valor de Z (3,931) foi maior do que 1,96.

Tabela 16 - Comparação pareada entre os resultados de Kappa das classificações de cobertura da terra

Comparação Pareada	Estatística Z
Classificação da Cobertura da Terra: Área de Estudo A vs. Área de Estudo B	3,931

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O procedimento de detecção de mudanças e classificação provou ser viável para o monitoramento da faixa de dutos, como indicado pelos resultados obtidos para a área de estudo. No trecho de faixa de dutos estudado, não foram identificadas as atividades antrópicas que poderiam comprometer a integridade física dos dutos ou interferem na manutenção da área de servidão. As alterações detectadas estão relacionadas às atividades agrícolas e à construção do anel viário metropolitano.

Considera-se que o resultado da classificação das classes de cobertura pelo método baseado no objeto atingiu valores de acertos próximos ao limite de aplicação desta técnica, para dados multitemporais com grande complexidade e diversidade de ocupação do espaço. Desta forma, a obtenção de um melhor índice de acerto geral da classificação implicaria no emprego da edição manual de alguns segmentos que apresentem erros de classificação. Esta limitação também foi constada por Conchedda et al. (2008) no estudo realizado para o mapeamento e análise de mudanças em área de mangue. Os autores consideraram que o desenvolvimento de regras específicas e integração de conhecimento do usuário no processo aumenta a precisão na detecção de mudança, porém resultados mais precisos podem ser alcançados a partir da edição manual.

Hausamann et al. (2005) aplicaram a análise baseada no objeto para monitoramento de dutos e consideraram que esta abordagem permite a definição de limiares de classificação pelas características e parâmetros de vizinhança dos objetos, o que pode promover a diminuição da importância da resposta espectral dos objetos. Porém, na pesquisa realizada, verificou-se que os limiares utilizados na classificação não puderam ser replicados em áreas com diferentes tamanhos, dentro da mesma cena, uma vez que os valores de limiares

dos parâmetros que caracterizam cada classe são alterados de acordo com a variabilidade espectral dos segmentos gerados.

Para aprimorar o procedimento aplicado é necessário estabelecer uma relação entre a escala de abordagem e a variabilidade espectral da área a ser analisada, em função da resolução espacial e da complexidade dos objetos na imagem. Além disto, definir um procedimento que associe os tipos de cobertura aos diversos usos da terra, com o intuito de melhorar a identificação de atividades humanas que possam causar risco às faixas de dutos.

AGRADECIMENTOS

CENPES/PETROBRAS e Fundação CAPES

REFERÊNCIAS

ANTUNES, A. F. B. **Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2003.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multiscale image segmentation. **Angewandte Geographische Informations Verarbeitung**, v. 12, p. 12-23, 2000.

CONCHEDDA, G.; DURIEUXB, L; MAYAUX, P. An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63, p. 578-589, 2008.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 2009. 183 p.

COPPIN, P. R.; BAUER, M. E. Processing of multi temporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.4, p.918-927, 1994.

DEFINIENS -**eCognition user guide version 8.0**, Definiens Imaging GmbH, Munich, Germany, 2009.

ENCARNAÇÃO, S. A. **Análise de imagem orientada a objecto. Abordagem conceptual e experimentação com imagens Quickbird**. Dissertação (Mestrado), DGPRUNLFCSH, Lisboa, 174 p., 2004.

HAUSAMANN, D.; ZIRNIG, W.; SCHREIER, G.; STROBL, P. Monitoring of gas pipelines - a civil UAV application. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v.77, n.5, p.352-360, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Cidades@. 2010. <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

HOFMANN, P. Detecting buildings and roads from Ikonos data using additional elevation information. **Journal for Spatial Information and Decision Making**. v.6, n.1, p. 26-33, 2001.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement of categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p.159-174, 1977.

LU, D. S.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365-2401, 2004.

ROPER, W.; DUTTA, S. Remote Sensing and GIS Applications for Pipeline Security Assessment. In: **ESRI User Conference Proceedings**, 2005, San Diego. <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1762.pdf>>.

SETO, K. C. et al. Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.10, p.1985-2004, 2002.

SINGH, A. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v.10, n.6, p. 989-1003, 1989.

ZIRNIG, W., HAUSAMANN, D., SCHREIER, G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. **Earth Observation Magazine**, v. 11, p.12-17, 2002.

ZIRNIG, W.; HAUSAMANN, D.; SCHREIER, G. A concept for natural gas transmission pipeline monitoring based on new high-resolution remote sensing technologies. In: **International Gas Research Conference**. Amsterdam, 11p., 2001.

Recebido em maio de 2013

Revisado em julho 2013

Aceito em agosto 2013

