

Indicação de possíveis áreas impactadas em acidentes ambientais por meio de processamento digital de imagens multiespectrais Landsat.

David Domingues Pavanelli^{1,2}
Carlos Loch²

¹ Departamento de Polícia Federal – SR/DPF/SP
Rua Hugo D’Antola, 95 – CEP 05038-090 – São Paulo – SP, Brasil
david.ddp@dpf.gov.br

² Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Caixa Postal 476– 88040-970 – Florianópolis – SC, Brasil
carlos.loch@ufsc.br

Abstract. The delimitation of an impacted area by environmental accident is not an instantaneous work. Its calculation by the short term effects is considered undersized by neglecting long term effects that can be manifested long after the accident. This study shows impacts on vegetation after two huge environmental accidents occurred in distinct areas measured by difference in NDVI signals after and before the events. The NDVI signals were calculated through Landsat 5 and Landsat 7 images. One of the areas, where the pollutants had the natural drainage channels as unique way of dispersion, the effects in the water bodies’ banks were very pronounced, expressed by abrupt changes in NDVI values. The second area, where the fate of the pollutants should be associated with the estuarine dynamics, mangrove fringes’ areas have shown slight changes in NDVI values, decreasing its values soon after the accident and recovering its original values five months after. This study shows that impacted areas can be proposed after an environmental accident by changes in NDVI values, with its long term effects continuing to be monitored, when multispectral images are available. All proposed areas must be confirmed by field examinations. This study indicates applications where the dynamic of pollutants dispersion is not obvious, as well in monitoring the recovery process of impacted areas.

Palavras-chave: environmental accidents, impacted areas, pollution, acidentes ambientais, áreas impactadas, poluição.

1. Introdução

A delimitação da área impactada por acidentes ambientais é um dos atributos do laudo pericial. Esta etapa indicará os locais que deverão sofrer monitoramento posterior ao acidente, afetando diretamente no custo dos processos de recuperação do dano ambiental.

A delimitação de área impactada por poluentes a partir dos efeitos agudos é reconhecidamente subdimensionada por desconsiderar os efeitos sub-crônicos e crônicos dos poluentes nos diferentes compartimentos ambientais. Adicionalmente, mesmo os efeitos agudos de substâncias tóxicas se manifestam em diferentes tempos de acordo com os diferentes organismos.

Por esta razão, a abrangência dos impactos causados por acidentes não deve se restringir às respostas imediatas dos diferentes compartimentos ambientais possivelmente afetados: inicia-se pela identificação e monitoramento de áreas manifestando efeitos agudos e busca-se a identificação de áreas que apresentem efeitos sub-crônicos e crônicos para posterior monitoramento, aguardando o tempo suficiente para a possível manifestação dos efeitos tóxicos nos diferentes organismos.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado no monitoramento de alterações ambientais por disponibilizar um panorama conjunto de grandes áreas, com revisitas em intervalos temporais regulares. As possibilidades analíticas de cada satélite são condicionadas às suas resoluções espacial e espectral.

O vigor da vegetação pode ser um bom indicativo de áreas impactadas por acidentes ambientais. Índices de vegetação, entre eles o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

(NDVI), têm sido amplamente utilizados para destacar o comportamento da vegetação (Ponzoni e Shimabukuro (2010)). Esses índices se baseiam principalmente nas propriedades de reflectância da vegetação verde na região do vermelho e infravermelho próximo.

Os efeitos agudos e crônicos apresentados pela vegetação exposta a substâncias tóxicas variam desde a desfolhação e morte do indivíduo até a perda de vigor da vegetação, expresso por necrose, perfuração, murchamento e alterações na coloração das folhas, entre outros (Rodrigues et al., 1989). A vegetação submetida a diferentes substâncias químicas apresenta alterações em seus espectros de reflectância na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (Souza Filho et al., 2008), além de alterações na posição do *red-edge* (Emengini et al., 2010). Tais alterações já possibilitaram o mapeamento de áreas impactadas por poluentes a partir de estresses na vegetação identificados por sensores hiperespectrais aeroportados (Li et al., 2005; van der Werff et al., 2008).

Embora menos específicos que os sensores hiperespectrais, sensores multiespectrais como os presentes nos satélites Landsat 5 e 7 podem detectar mudanças em alguns índices de vegetação provocadas por acidentes ambientais.

Este trabalho apresenta os resultados do monitoramento de índices de vegetação (NDVI) em duas áreas distintas onde ocorreram acidentes ambientais de grande porte, porém com diferentes dinâmicas de misturas dos poluentes no meio ambiente. São eles:

- o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, em 22/06/2001 no município de Nova Lima/MG, com poluentes que atingiram as redes de drenagem naturais a jusante da barragem e impactos nos corpos d'água e suas margens no sentido do fluxo natural das águas e;
- o derramamento de óleo combustível (*bunker*) pela explosão de navio em 15/11/2004 na baía de Paranaguá/PR, com dinâmicas físicas, químicas e biológicas e consequentes impactos causados pelos poluentes fortemente influenciados por regime de ventos, marés e circulação marinha.

Os resultados apresentados, embora devam ser confirmados em exames de campo, são promissores por permitirem desde as primeiras imagens após o acidente, a indicação de áreas possivelmente impactadas, o cálculo dessas áreas e o monitoramento dos processos de recuperação, além de representarem visualmente, de forma bastante compreensível para o público em geral, o impacto causado pelo acidente.

2. Metodologia de Trabalho

As imagens e mapas apresentados foram produzidos pelos programas ENVI 4.6.1 e ArcGis 9.3.1., disponíveis no Grupo de Perícias em Meio Ambiente (GPEMA) do Setor Técnico-Científico (SETEC) da Superintendência de Polícia Federal em São Paulo (SR/DPF/SP).

Imagens orbitais (satélites Landsat 5 e Landsat 7) de períodos anteriores e posteriores aos acidentes foram adquiridas para os respectivos estudos. As imagens foram obtidas gratuitamente via Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE) no sítio eletrônico (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) ou via United States Geological Survey (USGS) pelo programa EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

O processamento digital gerou imagens de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (equação 1)

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

onde:

ρ_{IVP} : fator de reflectância bidirecional no infravermelho próximo (considerada a banda 4 do Landsat 5 ou 7)

ρ_V : fator de reflectância bidirecional no vermelho (considerada a banda 3 do Landsat 5 ou 7)

e imagens da subtração dos NDVIs de diferentes períodos (equação 2)

$$\neq NDVIs = NDVI_{posterior} - NDVI_{anterior} \quad (2)$$

onde:

$NDVI_{anterior}$: imagem NDVI da área antes do acidente

$NDVI_{posterior}$: imagem NDVI da área após o acidente

O processamento digital das imagens orbitais obedeceu a etapas de calibração, registro e execução da rotina SPEAR Change Detection, que efetuou a normalização entre as imagens, geração de imagens de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e subtração das imagens NDVI ($\neq NDVIs$) entre os diferentes períodos.

As imagens $\neq NDVIs$ foram interpretadas através dos valores apresentados por seus pixels. A partir dessas interpretações, pixels de determinados valores foram coloridos artificialmente de modo a ilustrar os resultados obtidos.

A Figura 1 apresenta um fluxograma básico da metodologia apresentada.

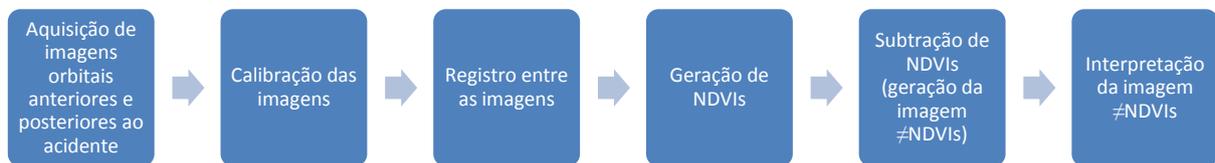


Figura 1. Fluxograma básico do processamento das imagens.

3. Resultados e Discussão

3.1. Ruptura da barragem de rejeitos de mineradora em 22/06/2001, no município de Nova Lima/MG

O acidente analisado nesta seção promove uma alteração significativa no NDVI em áreas próximas às drenagens naturais que receberam os rejeitos após o rompimento da barragem. A Tabela 1 descreve das imagens orbitais utilizadas nas análises.

Tabela 1. Imagens orbitais do município de Nova Lima/MG, onde ocorreu o acidente em 22/06/2001.

Data	Satélite/Sensor	Órbita	Ponto
12/05/2001	Landsat 7 / ETM	218	74
29/06/2001	Landsat 7 / ETM	218	74

A figura 2 apresenta o entorno da barragem de rejeitos rompida em 22/06/2001, em imagem NDVI_{12/05/2001} (42 dias antes do acidente), NDVI_{29/06/2001} (7 dias após o acidente) e em imagem da subtração desses NDVIs (\neq NDVIs_{29/06/2001-12/05/2001}).

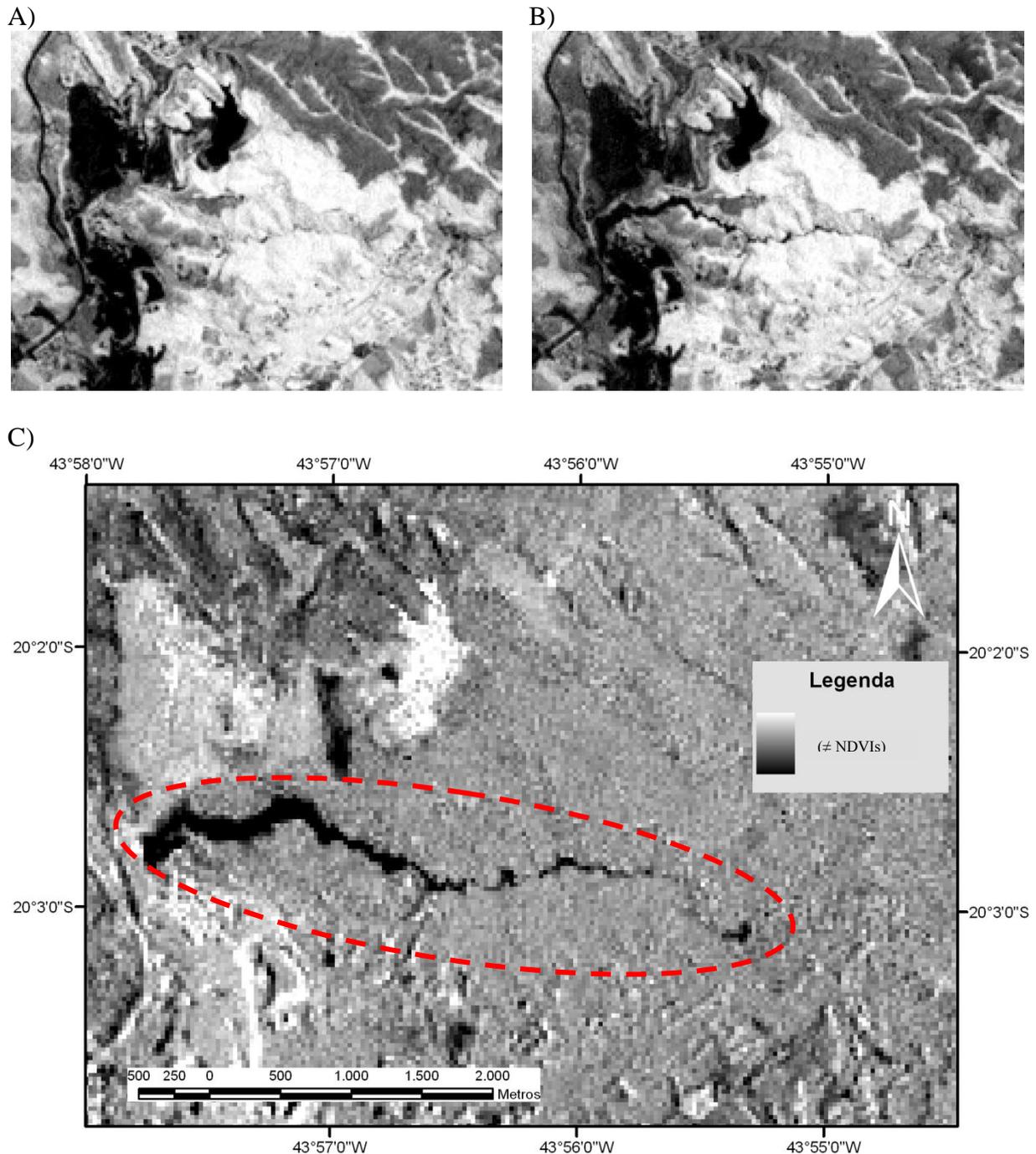


Figura 2. Imagens da área municipal de Nova Lima/MG, compreendendo entorno da barragem de rejeitos de mineradora, obtidas por diferentes processamentos digitais. A) Imagem NDVI_{12/05/2001} (42 dias antes do acidente); B) NDVI_{29/06/2001} (7 dias após o acidente); C) Imagem \neq NDVIs_{29/06/2001-12/05/2001}. A elipse vermelha destaca as áreas escuras que apresentaram grande redução no sinal atribuído à vegetação (vide texto).

A Figura 2 ilustra a grande mudança no sinal atribuído à vegetação próxima às drenagens que receberam o impacto direto da barragem rompida.

Nas imagens de subtração de NDVIs (\neq NDVIs), que neste processamento foram normalizadas radiometricamente, áreas que não sofreram processos que causaram alterações espectrais apresentarão pixels com valores próximos a 0, que na escala de cinza da imagem assumem tonalidade cinza mediana.

Os pixels que representam cursos d'água que não sofreram alteração, as áreas que não tiveram alterações de sombreamento, assim como a vegetação que não sofreu alteração de vigor tampouco de ciclo fenológico, apresentarão valores próximos a 0 e tonalidade cinza mediana, conforme ilustrado em grande parte de Figura 2C.

Em comparação, áreas que tiveram um crescimento da vegetação durante o período (p.e., crescimento vegetal em áreas agriculturáveis) apresentarão pixels com valores positivos e tonalidade clara, indicando um aumento do sinal atribuído à vegetação, contrastando com áreas que sofreram corte de vegetação (p.e., preparação do solo após colheita), que apresentarão uma diminuição do sinal atribuído à vegetação e pixels assumindo valores negativos, expressos em tonalidade escura. A Tabela 2 apresenta os valores assumidos pelos pixels das imagens apresentadas na Figura 2.

Tabela 2. Valores assumidos pelos pixels nas diferentes imagens apresentadas na Figura 2.

	$NDVI_{12/05/2001}$	$NDVI_{29/06/2001}$	$\neq NDVIs_{29/06/2001-12/05/2001}$
Valor dos pixels	0 a +0,76	0 a +0,71	-0,54 a +0,80

A Tabela 2 ilustra que o valor assumido pelos pixels na imagem \neq NDVIs varia de -0,54 (mais escuro) a +0,80 (mais claro).

A alteração do sinal atribuído à vegetação (grande mancha escura no entorno das drenagens que receberam os rejeitos da barragem rompida) pode ser facilmente observada na Figura 2C. Dentre as possíveis causas dessa alteração encontram-se a morte, grandes alterações no vigor e/ou recobrimento da vegetação (assoreamento), causas estas que são objetivo dos exames periciais de campo. Entretanto, a Figura 2 indica de forma bastante contrastada a possível área afetada pelo acidente, permitindo a localização e cálculo de áreas possivelmente impactadas, dados de grande valia para o direcionamento dos exames de campo.

3.2. Explosão do navio BTG Vicuña no porto de Paranaguá/PR em 15/11/2004

O acidente analisado nesta seção promove alterações sutis dos sinais de NDVI em grande extensão da baía de Paranaguá, com áreas apresentando inicialmente uma diminuição e posteriormente um aumento do sinal atribuído à vegetação. A Tabela 3 descreve das imagens orbitais utilizadas nas análises.

Tabela 3. Imagens orbitais da baía de Paranaguá/PR, onde ocorreu o acidente em 15/11/2004.

Data	Satélite/Sensor	Órbita	Ponto
15/09/2004	Landsat 5 / TM	220	78
04/12/2004	Landsat 5 / TM	220	78
11/04/2005	Landsat 5 / TM	220	78

A Figura 3 apresenta área na baía de Paranaguá/PR, em imagem $NDVI_{15/09/2004}$ (60 dias antes do acidente), $NDVI_{04/12/2004}$ (19 dias após o acidente) e em imagem da subtração desses NDVIs ($\neq NDVIs_{04/12/2004-15/09/2004}$).

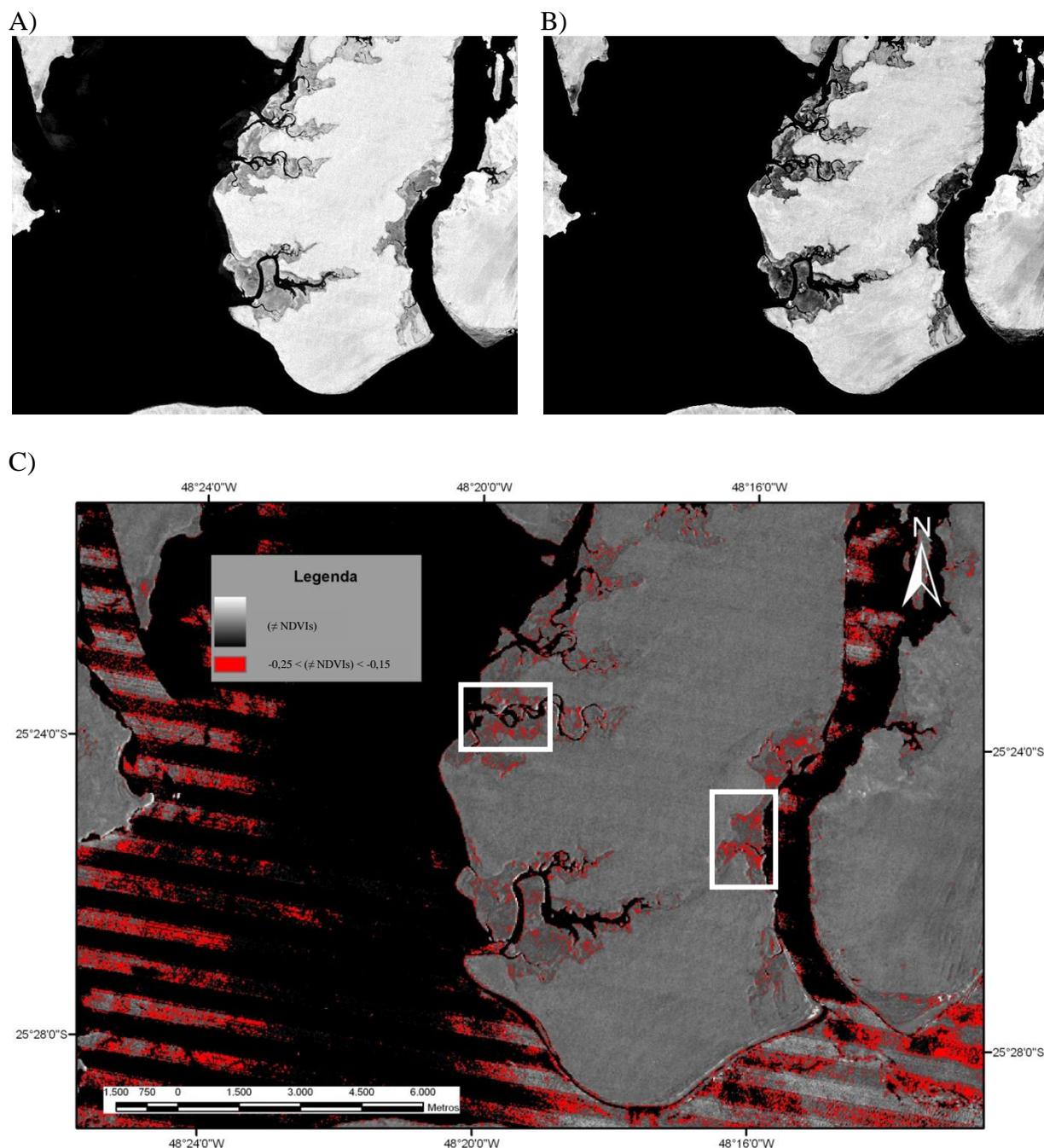


Figura 3. Imagens de área na baía de Paranaguá/PR, obtidas por diferentes processamentos digitais. A) Imagem $NDVI_{15/09/2004}$ (60 dias antes do acidente); B) $NDVI_{04/12/2004}$ (19 dias após o acidente); C) Imagem $\neq NDVI_{04/12/2004-15/09/2004}$. Em vermelho foram destacados os pixels de valores entre -0,25 e -0,15 (vide texto). As áreas delimitadas pelos retângulos brancos são discutidas na Figura 4.

As figuras 3A e 3B apresentam os NDVI das duas diferentes datas, com os pixels que representam a água da baía assumindo valores próximos a 0 e tonalidade escura.

A Figura 3C possui pixels assumindo valores entre -1,55 e +0,52. Em razão de simulações computacionais da dinâmica da mancha de óleo realizadas pelo SIMEPAR (dados não apresentados) indicando que a área apresentada na Figura 3 seria uma dos pontos mais impactados da baía, foram demarcados em vermelho os pixels que assumiram valores entre

-0,25 e -0,15 na Figura 3C, ou seja, pixels que poderiam ser responsáveis por representar algum impacto na vegetação em terra (p.e., perda de vigor da vegetação causado pelo acidente).

A floração de algas nas águas da baía, a presença de materiais em suspensão e/ou a existência de filmes superficiais nas águas, além de qualquer outro processo que pudesse alterar a reflectância de áreas de alagadas entre diferentes datas não são discutidos neste trabalho. Desta forma, as análises realizadas destacaram os pixels demarcados em vermelho em áreas não alagadas da Figura 3C.

Na intenção de monitorar o sinal correspondente à perda de vigor de vegetação na Figura 3C (pixels vermelhos em áreas não alagadas na imagem \neq NDVIs_{04/12/2004-15/09/2004}), foram analisadas subtrações entre NDVIs de diferentes datas (\neq NDVIs_{11/04/2005-04/12/2004} e \neq NDVIs_{11/04/2005-15/09/2004}) e seus resultados sobre as áreas demarcadas na Figura 3C são apresentados na Figura 4.

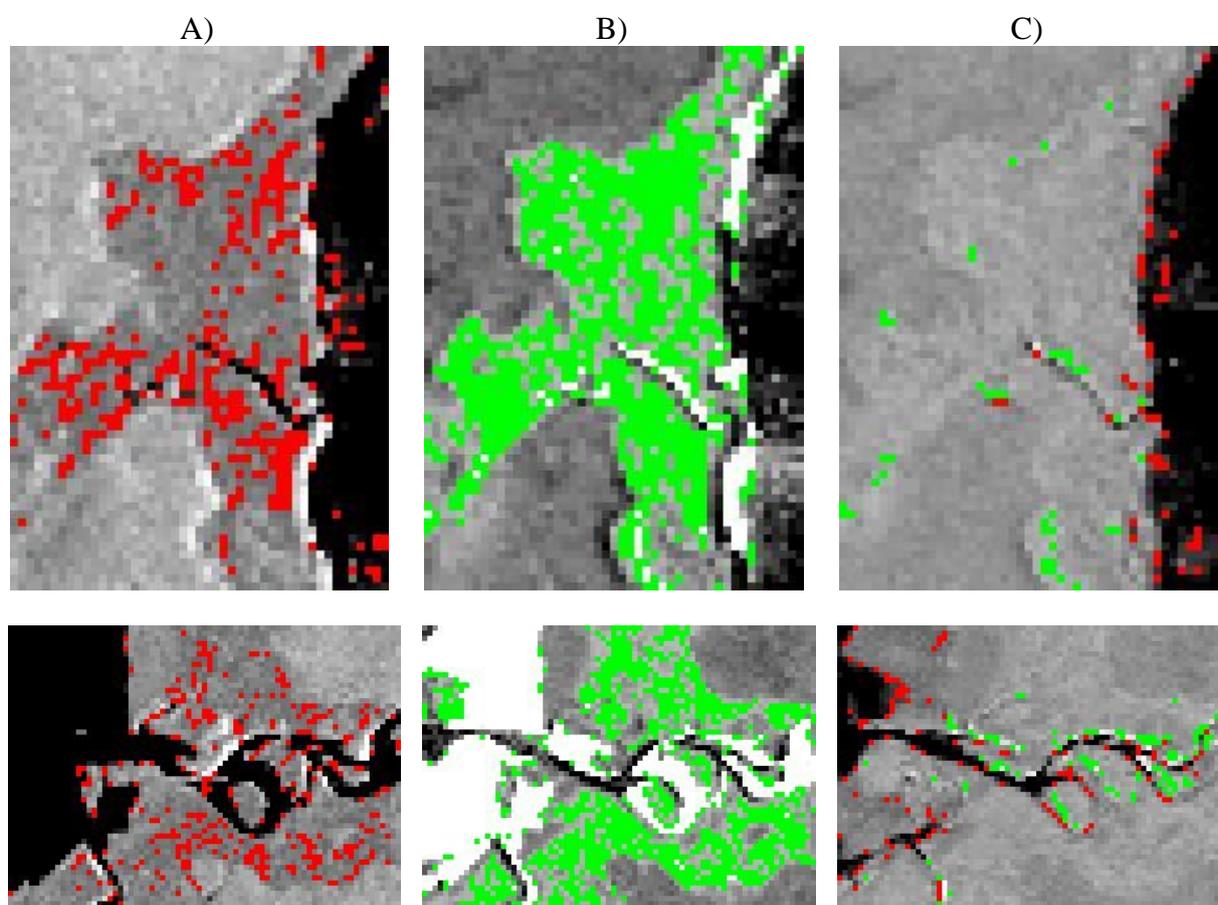


Figura 4. Áreas destacadas pelos retângulos na Figura 3C em imagens de subtrações de NDVIs de diferentes datas. A) \neq NDVIs_{04/12/2004-15/09/2004} (pixels de valores entre -0,25 e -0,15 destacados em vermelho); B) \neq NDVIs_{11/04/2005-04/12/2004} (pixels de valores entre +0,15 e +0,25 destacados em verde); C) \neq NDVIs_{11/04/2005-15/09/2004} (pixels de valores entre -0,25 e -0,15 destacados em vermelho e entre +0,15 e +0,25 destacados em verde);

A Figura 4 apresenta uma comparação da vegetação das áreas delimitadas pelos retângulos na Figura 3C entre 3 datas diferentes: 15/09/2004 (60 dias antes do acidente), 04/12/2004 (19 dias após o acidente) e 11/04/2005 (147 dias após o acidente).

A Figura 4A apresenta as duas áreas com pixels assumindo valores entre -0,25 e -0,15 destacados em vermelho, sugerindo nesses pontos a diminuição do vigor de vegetação entre as datas de 15/09/2004 e 04/12/2004.

A Figura 4B apresenta as mesmas áreas entre as datas de 04/12/2004 e 11/04/2005. A subtração dos NDVIs dessas datas gera pixels que assumem valores positivos (valores entre +0,15 e +0,25 destacados em verde) para muitos dos pontos que assumiram valores negativos na Figura 4A. Tais valores positivos de pixels nesses pontos sugerem uma recuperação do vigor da vegetação após 147 dias do acidente, quando comparado com o vigor da mesma vegetação 19 dias após o acidente.

A Figura 4C apresenta ainda as mesmas áreas entre as datas de 15/09/2004 e 11/04/2004. A subtração dos NDVIs dessas datas gera poucos pixels que assumem valores positivos entre +0,15 e +0,25 (destacados em verde) ou negativos entre -0,25 e -0,15 (destacados em vermelho). A Figura 4C sugere que não há uma variação expressiva do vigor da vegetação entre essas duas datas, indicando que a vegetação impactada ilustrada pela Figura 4A sofreu um processo de recuperação ilustrado pela Figura 4B.

4. Conclusões

Os resultados apresentados demonstram a possibilidade da indicação de áreas possivelmente impactadas por acidentes ambientais do monitoramento dos NDVIs de áreas submetidas a acidentes ambientais, desde que disponíveis imagens multiespectrais anteriores e posteriores ao acidente. As áreas sugeridas devem ser objeto de exames de campo para confirmação das indicações.

Este estudo é de especial interesse para áreas onde a dinâmica de dispersão dos poluentes é mais complexa, como em sistemas estuarinos, pois sugere áreas impactadas através da variação dos valores de NDVI da vegetação, que podem estar relacionados com a alteração do vigor da vegetação causado pelos poluentes.

A metodologia pode ser utilizada no planejamento e otimização de exames de campo, além de possibilitar o monitoramento da evolução dos processos desenvolvidos nessas áreas.

A metodologia foi aplicada a imagens Landsat 5 e 7, porém pode ser aplicada a outros sensores multiespectrais e/ou hiperespectrais, possibilitando a comparação entre outros índices.

Referências Bibliográficas

- Emengini, E.J., Blackburn, G.A. e Theobald, J.C., **Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* 'tendergreen') caused by oil pollution and waterlogging using spectral and thermal remote sensing**, Art, Science and Applications of Reflectance Spectroscopy Symposium sponsored by ASD Inc. and IEEE GRSS, Boulder, Colorado, 23-25th February, 2010.
- Li, L., Ustin, S.L. e Lay, M., **Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico**, Remote Sensing of Environment, v. 94, p. 1-16, 2005.
- Ponzoni, F.J. e Shimabukuro, Y.E., **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Parêntese, 2010. 127p.
- Rodrigues, F.O., Moura, D.O. e Lamparelli., C.C., **Efeitos do óleo nas folhas do mangue**, Ambiente, v. 3, n. 1, p. 36-45, 1989.
- Souza Filho, C.R., Augusto, V., Oliveira, W.J. e Lammoglia, T., **Deteção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG)**, Revista Brasileira de Geociências, v. 38, p. 228-243, 2008.
- van der Werff, H., van der Meijde, M., Jansma, F., van der Meer, F. e Groothuis, G.J., **A spatial-spectral approach for visualization of vegetation stress resulting from pipeline leakage**, Sensors, v. 8, p. 3733-3743, 2008.