

Uso da banda termal do satélite LANDSAT-5 e técnicas de geoestatística na estimativa da degradação da Atrazina no solo da Área de Proteção Ambiental de Tejuπά

Diego Augusto de Campos Moraes¹, Anderson Antonio da Conceição Sartori¹, Wilson Anderson Holler², Claudio Aparecido Spadotto³, Paulo Roberto Rodrigues Martinho³, Célia Regina Lopes Zimback⁴

¹ Doutorando em Irrigação e Drenagem, Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP - Rua José Barbosa de Barros, 1780 CEP: 18610-307 Botucatu, SP – Brasil. Caixa-Postal: 237 diegomoraes@fca.unesp.br, sartori80@gmail.com

² Engenheiro Cartógrafo, Embrapa Gestão Territorial – Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, Campinas – SP, Brasil. wilson.holler@embrapa.br

³ Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Embrapa Gestão Territorial – Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, Campinas – SP, Brasil. claudio.spadotto@embrapa.br, paulo.martinho@embrapa.br

⁴ Prof. Adjunto do Departamento de Recursos Naturais, FCA/UNESP - Rua José Barbosa de Barros, 1780 CEP: 18610-307 Botucatu, SP – Brasil. Caixa-Postal: 237, czimback@gmail.com

Resumo – O uso inadequado de defensivos agrícolas pode levar a impactos ambientais significativos, como a contaminação de diferentes compartimentos ambientais, sendo os mais vulneráveis, os compartimentos aquáticos. A taxa de degradação define a persistência de um defensivo agrícola no perfil do solo. A temperatura é um fator que provoca efeitos sobre a taxa de degradação de pesticidas, alterando a velocidade do metabolismo dos microrganismos. A banda termal do satélite LANDSAT-5 é capaz de obter a temperatura estimada da superfície do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar a empregabilidade da banda termal do Landsat-5 e técnicas de geoestatística, para obtenção das estimativas da taxa de degradação da Atrazina na superfície do solo. Para obtenção dos resultados foi realizada correção geométrica e atmosférica das imagens, em conjunto com os resultados do índice de vegetação e a utilização de modelos matemáticos. Pode-se concluir que a utilização da banda termal do satélite LANDSAT-5 captadas pelo sensor TM e técnicas geoestatísticas contribuíram para a obtenção da estimativa da taxa de degradação da Atrazina na superfície do solo.

Palavras-chave: dinâmica ambiental; variabilidade espacial; krigagem.

Use of LANDSAT-5 thermal band and geostatistical techniques to estimate the degradation of Atrazine in soil of Tejuπά's Environmental Protection Area

Abstract – Improper use of pesticides can lead to significant environmental impacts, such as contamination of various environmental compartments, being the most vulnerable, the aquatic compartments. The degradation rate defines the persistence of a pesticide in the soil profile. The temperature is a factor that causes effects on the degradation rate of pesticides, changing the speed of the metabolism of microorganisms. The thermal band of LANDSAT-5 satellite is able to obtain the estimated temperature of the soil surface. This study aimed to assess the applicability of thermal band of LANDSAT-5 satellite and geostatistical techniques, to obtain estimates of the degradation rate of Atrazine on soil surface. To obtain the results was performed a geometric and atmospheric correction of the images, with the results of vegetation index and the use of mathematical models. It can be concluded that the use of thermal band of LANDSAT-5 satellite captured by the sensor TM and geostatistical techniques have contributed greatly to obtain the estimate of the rate of atrazine degradation in the soil surface.

Key words: environmental dynamics; spatial variability; kriging.

Introdução

Os herbicidas são apontados como o grupo de defensivos agrícolas mais frequentemente detectado em estudos de qualidade de águas superficiais e subterrâneas (CARTER, 2000). A persistência de um defensivo agrícola no solo depende de processos de dissipação, como a degradação, e dos microrganismos do solo (NAKAGAWA; ANDRÉA, 2000). Um dos fatores presentes na degradação de um defensivo agrícola no solo é a temperatura, uma vez que essa afeta a velocidade do metabolismo dos microrganismos

envolvidos nesse processo (SPADOTTO *et al.*,2010). Diversas são as formas de obter a temperatura da superfície do solo. Uma delas é o uso da banda termal do satélite LANDSAT-5, sensor TM, que permite, remotamente, a obtenção da estimativa da temperatura do solo por meio da transformação do número digital da imagem (ND) em radiância. Paraíba e Spadotto (2002) estudaram o efeito da temperatura no processo de degradação de defensivos agrícolas. No entanto, a coleta e as análises são pontuais nas áreas de estudo, sendo de suma importância conhecer o comportamento da distribuição espacial dos dados obtidos, o que é possível pela geoestatística.

O objetivo do presente trabalho foi verificar o uso da banda termal (banda 6) do satélite LANDSAT-5 e de técnicas geoestatísticas na obtenção das estimativas da taxa de degradação da Atrazina na Área de Proteção Ambiental (APA) Tejuπά.

Material e Métodos

Área do estudo

O Perímetro Tejuπά possui uma área de 158.830 ha, contendo parte dos territórios de 10 municípios do Estado de São Paulo: Barão de Antonina, Coronel Macedo, Fartura, Itaporanga, Pirajú, Sarutaiá, Taquaiá, Taquarituba, Tejuπά e Timburí. Pertence à UGRHI 14 (Alato Paranapanema). Este perímetro está localizado na região da Serra da Fartura, na faixa das Cuestas Basálticas entre a Depressão Periférica e o Planalto Paulista. É envolvido pelos rios Verde, Taquari e com maior presença o Paranapanema e suas duas represas, a Jurumirim e a Xavante, em sua porção paulista.

Material

Foram utilizadas imagens orbitais do sensor *Thematic Mapper* (TM), a bordo do satélite LANDSAT-5, disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com fator de cobertura de nuvem igual a zero (Tabela 1). O trabalho foi executado no programa ARCGIS 10.1 e em planilha eletrônica.

Tabela 1. Características das imagens utilizadas.

Satélites Sensores	Resolução Espacial (m)	Bandas espectrais	Intervalo espectral (μm)	Órbita/Ponto
LANDSAT-5/TM	30 X 30	vermelho	0,626 – 0,693	221/76
	30 X 30	infravermelho	0,776 – 0,904	
	120 X 120	termal	10,45 – 12,42	

Métodos

Os métodos aplicados no estudo são apresentados de forma esquemática na Figura 1. Nela é possível observar a sequência dos passos aplicados para obtenção dos mapas temáticos.



Figura 1. Esquema metodológico

Registro das Imagens

As imagens foram importadas e georreferenciadas utilizando-se o algoritmo de correção geométrica presente no sistema de informação geográfica IDRISI – SELVA.

Correção Atmosférica

Operações matemáticas visando à correção atmosférica das imagens são viáveis para inúmeras aplicações que pretendam realizar comparações entre diferentes sensores ou entre imagens obtidas em datas distintas. Este trabalho utilizou o modelo *Dark Object Subtraction* (DOS), que consiste em um modelo simples que corrige o espalhamento atmosférico e estima a interferência atmosférica a partir dos números digitais (ND) das imagens. A correção atmosférica é feita primeiramente calculando a radiância e depois a reflectância. A radiância de cada banda é obtida segundo a Equação 1.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max_{\lambda}} - L_{min_{\lambda}}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min_{\lambda}} \quad (1)$$

onde, L_{λ} é a radiância espectral calculada ao nível do sensor ($W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$); $L_{max_{\lambda}}$ é o valor de referência para radiância máxima ($W \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); $L_{min_{\lambda}}$ é valor de referência para radiância mínima ($W \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); Q_{cal} é o valor de intensidade do pixel (NC); Q_{calmax} é o valor de intensidade máxima do pixel (igual a 255 em bandas TM/LandSat5), e Q_{calmin} é valor de intensidade mínima do pixel (igual a 1 em bandas TM/LandSat5).

A reflectância de superfície de cada banda é obtida pela Equação 2.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{sun_{\lambda}} \cdot \text{Cos}\theta_s} \quad (2)$$

onde, ρ_{λ} é a reflectância de superfície (adimensional); π é a constante matemática, igual a 3,14159 (adimensional); L_{λ} é a radiância espectral calculada ao nível do sensor ($W \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); d^2 é a distância Terra-Sol (unidades astronômicas); $E_{sun_{\lambda}}$ é o valor médio da irradiância solar exoatmosféricos ($W/m^2 \mu\text{m}$), e $\text{Cos}\theta_s$ é o ângulo zenital solar (graus).

Estimativa da temperatura da superfície do solo

Para a obtenção da temperatura estimada da superfície do solo foram realizados os seguintes processos: Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI) (Equação 3), Índice de Área Foliar (IAF) (Equação 4) e cálculo de emissividade de cada pixel (ϵ_{NB}) (Equação 5). As imagens resultantes de cada procedimento foram convertidas do formato matricial para vetor tipo ponto para posterior análise geoestatística.

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot \rho_{t,4} - \rho_{t,3}}{(L + \rho_{t,4} + \rho_{t,3})} \quad (3)$$

onde: $\rho_{t,4}$ é a refletividade da banda 4, $\rho_{t,3}$ é refletividade da banda 3 e L é o fator de ajuste do solo, sendo que no presente estudo foi utilizado o valor $L=0,5$ (JENSEN, 2009).

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (4)$$

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad (5)$$

A temperatura estimada da superfície do solo foi obtida com a Equação 6.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (6)$$

onde, T_s é a temperatura estimada da superfície do solo, $K_1= 607,76$ ($W \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), e $K_2=1260,56K$ são constantes de calibração da banda termal do LANDSAT TM-5 e $L_{\lambda 6}$ é a radiância espectral da banda termal.

Estimativa da taxa de degradação do defensivo agrícola associada à temperatura

O efeito da temperatura na taxa de degradação de um defensivo agrícola pode ser estimado conforme as Equações 7 e 8, propostas por Paraíba e Spadotto (2002). A Equação 7 apresenta a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório). A Equação 8 apresenta a

dependência da taxa de degradação do defensivo agrícola e a temperatura do solo em diferentes profundidades. Neste trabalho foi considerada a temperatura estimada apenas na superfície do solo.

$$k_r = \frac{\ln(2.0)}{t'_{1/2}} \quad (7)$$

onde, k_r é a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório) e $t'_{1/2}$ é a meia-vida do defensivo agrícola em dias.

$$k(z, t) = k_r \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{T(z, t)} \right) \right) \quad (8)$$

onde, $k(z, t)$ é a taxa de degradação do defensivo agrícola considerando o efeito da temperatura do solo numa determinada profundidade (z) e tempo (t); k_r é a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório); E_a é a energia de ativação do defensivo agrícola ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_r é a temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$), R é a constante universal dos gases ($R=8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e $T(z, t)$ é a temperatura estimada do solo.

Os autores assumiram que a taxa de degradação obedece a cinética de primeira ordem e que a energia de ativação é constante em toda a faixa de temperatura do ambiente. Os dados da Atrazina utilizados no estudo foram a meia-vida ($t_{1/2} = 60$ dias) (EPA, 2004) e a energia de ativação ($E_a = 96 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) (PARAÍBA; SPADOTTO, 2002).

Análise geoestatística e elaboração dos mapas

A análise geoestatística foi realizada com intuito de verificar a existência e estimar o grau de dependência espacial entre os pontos observados de temperatura da superfície do solo e taxa de degradação da Atrazina, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 9, segundo Vieira *et al.* (1983).

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (9)$$

Onde, $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações e $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os pares de pontos separados por uma distância h . Com o ajuste do variograma, por meio de um modelo matemático teórico, é possível estimar os valores calculados de $\gamma^*(h)$ para os coeficientes: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (a); o índice de dependência espacial (IDE) foi calculado e classificado conforme Zimback (2001), onde valores menores ou iguais a 25% é considerada fraca; de 26% a 75%, moderada, e maiores ou iguais a 75%, dependência forte. Na elaboração dos mapas temáticos foi utilizada a krigagem como o método de interpolação dos dados.

Resultados e Discussão

Os dados referentes à temperatura da superfície do solo e da taxa de degradação da Atrazina estão na Tabela 2.

Tabela 2. Dados estatísticos para temperatura estimada na superfície do solo e taxa de degradação estimada para Atrazina

Temperatura estimada da superfície do solo (K)*			Taxa de degradação estimada da Atrazina (k)**		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
292,88	308,53	297,11	0,010	0,084	0,020

* graus Kelvin; ** dia⁻¹

Em relação à análise geoestatística, nas Figuras 2 e 3 são apresentados os variogramas referentes à temperatura estimada da superfície do solo e da taxa de degradação da Atrazina, respectivamente.

Na Tabela 3 encontram-se os valores obtidos na análise geoestatística para dos variogramas das estimativas da temperatura da superfície do solo e da taxa de degradação da Atrazina no solo, respectivamente.

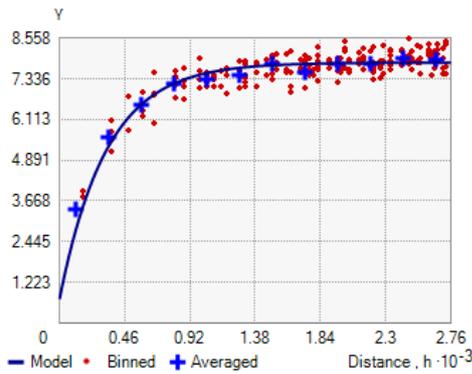


Figura 2. Variograma da temperatura estimada da superfície do solo.

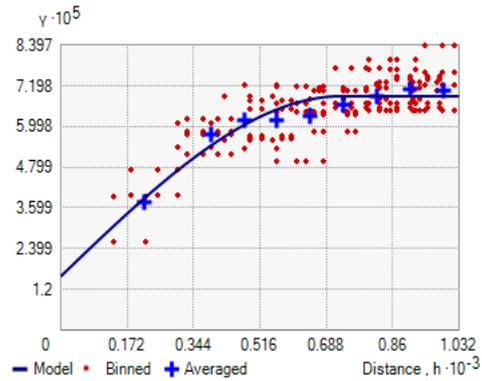


Figura 3. Variograma da taxa de degradação da Atrazina estimada da superfície do solo.

Tabela 3. Parâmetros e modelo de ajuste dos variogramas para a temperatura estimada na superfície do solo

Variáveis	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	IDE (%)
Temperatura	Exponencial	999,80	0,72	7,09	90,78
Taxa de Degradação	Esférico	727,61	5,30E-05	1,58E-05	77,03

A₀: Valor do alcance obtido; C₀: Efeito Pepita; C: Componente Estrutural; IDE: Índice de Dependência Espacial.

Considerando as variáveis em estudo, os variogramas ajustaram-se aos modelos exponencial e esférico, obtendo um alcance que variou de 727,61m a 999,80m. O efeito pepita apresentou valores baixos e o índice de dependência espacial (IDE) variou de 77,03% a 90,78%, caracterizando uma dependência espacial forte entre as amostras (ZIMBACK, 2001).

Os mapas das estimativas de temperatura da superfície do solo e da taxa de degradação da Atrazina são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

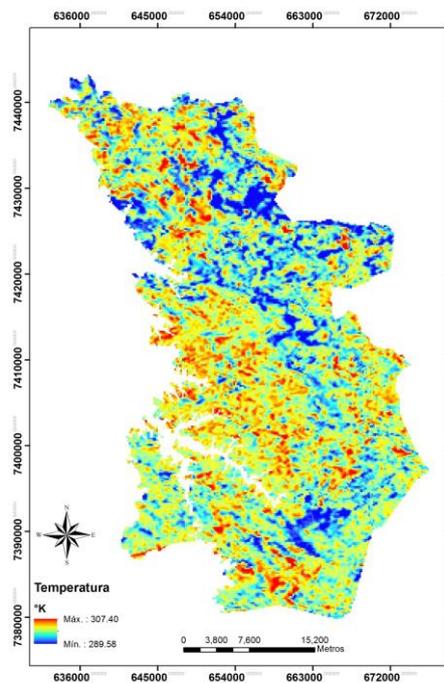


Figura 4. Mapa da temperatura estimada da superfície do solo.

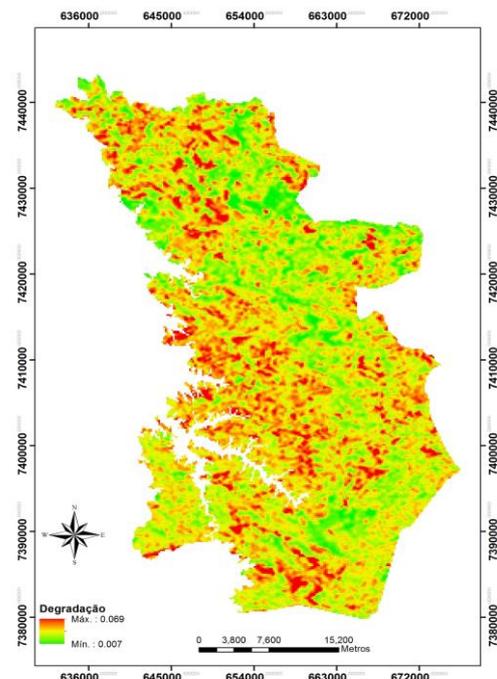


Figura 5. Mapa da taxa de degradação estimada para Atrazina na superfície do solo.

Nota-se que os mapas temáticos proporcionaram uma visualização clara da distribuição espacial das variáveis em estudo e o seu comportamento na superfície do solo, bem como a relação entre a temperatura e a taxa de degradação da Atrazina, tal como o modelo proposto por Paraíba e Spadotto (2002). Tal fato

confirma que a banda termal do satélite LANDSAT-5, que apresenta sensibilidade em relação aos contrastes térmicos de solos, pode ser empregada na obtenção das estimativas da taxa de degradação da Atrazina, e que em conjunto com o processo de interpolação por krigagem, fornece subsídios importantes para a gestão territorial em cenários de uso de defensivos agrícolas.

Conclusões

Em face dos resultados apresentados, pode-se concluir que o uso da banda termal do satélite LANDSAT-5, captada pelo sensor TM, e técnicas de geoestatística mostraram-se viáveis na obtenção da temperatura do solo para estimativa da taxa de degradação da Atrazina na superfície do solo. A incorporação da dimensão espacial na relação da taxa de degradação da Atrazina e a temperatura são fundamentais para a abordagem das questões ambientais na agricultura, pela sua característica difusa, e aumenta a capacidade de interpretação e de tomada de decisão no contexto territorial. Utilizar técnicas não intrusivas (remotas) para simular a taxa de degradação de um defensivo agrícola ajuda a ponderar seu uso em locais e épocas do ano, indicando regiões apropriadas para seu uso.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro e ao GEPAG e EMBRAPA Gestão Territorial pelo apoio técnico-científico.

Referências Bibliográficas

- CARTER, A. D. Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes. **Weed Res.**, v. 40, p. 113-122, 2000.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **2004 edition of the drinking water standards and health advisories**. Washington, DC: Office of water, 2004. Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/criteria/drinking/dwstandards2004.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2011.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- NAKAGAWA, L. E.; ANDRÉA, M.M.. **Degradação e formação de resíduos não-extraíveis ou ligados do herbicida Atrazina em solo**. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2000000800002&lang=pt>. Acesso em: 28 out. 2012.
- PARAIBA, C. L.; SPADOTTO, C.A. **Soil Temperature effect in calculating attenuation and retardation factors**. Chemosphere 48 905-912, 2002.
- SPADOTTO, C. A.; JUNIOR, R.P.S.; DORES, E.F.G.C.; GLEBER, L.; MORAES, D.A.C.. **Fundamentos e aplicações da modelagem ambiental de agrotóxicos**. Campinas: Embrapa, 2010. 46 p.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, T.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.