

MODELAGEM DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS PARA DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA AVALIAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DE RISCO A DESERTIFICAÇÃO

*Modeling biophysical parameters for the development of algorithm for the
assessment and mapping of desertification risk*

HELIO LEANDRO LOPES¹
ANA LUCIA BEZERRA CANDEIAS²
LUCIANO JOSÉ DE OLIVEIRA ACCIOLY³
MARIA DO CARMO SOBRAL²

¹Universidade Federal do Vale do São Francisco
Laboratório de Tecnologias da Geoinformação, Colegiado de Agronomia
helio.lopes@univasf.edu.br

²Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Eng. Cartografica, Departamento de Eng. Civil - Centro de
Tecnologia e Geociências
analucia@ufpe.br, msobral@ufpe.br

³Embrapa Solos, UEP-Recife
luciano@uep.cnps.embrapa.br

RESUMO

A interação de ações sustentáveis que integram programas sociais, ambientais e econômicos e procuram quantificar e qualificar o grau de degradação tem importância vital em áreas de risco à desertificação. Este trabalho mostra a aplicação de parâmetros biofísicos e Potencial Natural de Erosão (PNE) na avaliação de processos de degradação e identificação de áreas em risco de desertificação. É uma aproximação empírica e pode ser usada em outras áreas com características biofísicas similares. O desenvolvimento do modelo foi baseado nos seguintes parâmetros: albedo, emissividade, temperatura da superfície, índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), fluxo de calor no solo e potencial natural de erosão (erodibilidade do solo, erosividade da chuva e fator topográfico). Sua implementação foi feita por meio da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), disponível no SPRING – Sistema de

Processamento de Informações Georreferenciadas. Imagens multitemporais do sensor TM da época seca do satélite Landsat foram usadas para aplicar o modelo e mapear a evolução da degradação na área de estudo (Bacia hidrográfica do Rio Brígida). Os resultados mostraram um aumento no grau de degradação (remoção da cobertura vegetal nativa, seguida de erosão), revelando o potencial do modelo em acessar riscos à desertificação.

Palavras-chave: modelagem ambiental, degradação da caatinga, índices de vegetação, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The interaction of sustainable actions to integrate social, environmental and economical programs to quantify and qualify the degrees of degradation is of vital importance in areas of risk of desertification. This research presents the application of biophysical parameters and erosion potential to evaluate environmental degradation processes and to identify areas at risk of desertification. The paper presents a general approach that can be used in other areas with similar biophysical characteristics. The model was based on the following parameters: albedo, emissivity, temperature, NDVI, soil heat flux, soil erosivity, soil erodibility and LS (slope length and slope or topographic factor). The model was implemented by using the LEGAL programming language available in the SPRING 4.0 Geographical Information System software package. Multitemporal images of TM sensor from the dry season were used to model and to apply the algorithm for mapping and evaluating the degradation evolution in the study area. The results showed an increasing in the degree of degradation (caatinga vegetation removal, followed by soil erosion), demonstrating the potential of the model to assess desertification risks.

Keywords: environmental modeling, caatinga degradation, vegetation indices, remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, várias definições de desertificação foram propostas. O conceito mais comum relaciona desertificação não somente com mudanças relacionadas com o clima, mas também com alterações induzidas pelo homem, e especialmente aquelas associadas ao uso inapropriado do solo, agricultura intensificada e consumo de madeira (UN, 2001), fazendo com que a desertificação seja resultado da interação entre processos complexos que variam de área para área.

Para avaliar essas mudanças, técnicas espaciais de monitoramento e mapeamento têm sido examinadas por muitos pesquisadores tais como: ACCIOLY, et. al., 2001; GARCIA et al., 2008; SYMEONAKIS E DRAKE, 2004. As imagens de satélites em conjunto com as bases de dados locais e mapas têm sido usadas para examinar e quantificar a natureza, a tendência e o processo de desertificação em diferentes ambientes.

Um dos métodos para quantificar, avaliar e monitorar riscos de desertificação é através de parâmetros biofísicos como albedo, temperatura, emissividade, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente e índices de vegetação como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (GARCIA et al., 2008; HOUNTONDJI, et al., 2006; RAHMAN, et al., 2007; DALL'OLMO & KARNIELI, 2002). Esta quantificação é dada por meio de imagens orbitais, modelagem dos parâmetros em um Sistema de Informação Geográfica e avaliação de históricos de precipitação e evapotranspiração. Os parâmetros biofísicos aqui inseridos estão no modelo ABES (Algoritmo para Balanço da Energia da Superfície) que, segundo BASTIAANSEN (1995), pode servir de base para avaliar níveis de degradação do ambiente como desertificação e salinização.

Este trabalho visa espacializar parâmetros biofísicos para: a) avaliar o estado atual de degradação na bacia do Rio Brígida; b) aplicar parâmetros biofísicos na detecção e risco à desertificação; c) determinar o potencial natural de erosão para a inserção no modelo proposto; e d) formular um modelo baseado nos parâmetros biofísicos e potencial natural de erosão para espacializar o risco à desertificação.

2. DESERTIFICAÇÃO

Segundo a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNITED NATIONS, 2001), a desertificação é o "processo de degradação das terras das regiões áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, resultante de diferentes fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas". Estão ligadas a esta conceituação, as degradações do solo, da fauna, da flora e dos recursos hídricos.

É importante diferenciar o termo "desertificação" do termo "seca". A mesma convenção define seca como um fenômeno natural que ocorre quando a precipitação diminui significativamente em relação à precipitação normal, causando sérios desequilíbrios hidrológicos e afetando negativamente os sistemas produtivos. Já a desertificação vem da interação de processos complexos como: agricultura intensificada, salinização, erosão, mecanização inadequada, em que esses fatores afetam o equilíbrio físico, químico e biológico do ecossistema, e o fenômeno de seca vem intensificar ainda mais o desequilíbrio no ambiente afetado por estes processos.

Historicamente, a aceitação da definição de aridez para fins de aplicação no Plano de Ação de Combate à Desertificação, elaborada pelas Nações Unidas, ocorreu em 1977 a partir de metodologia desenvolvida por Thornthwaite em 1941.

O índice de aridez é determinado pela relação entre a precipitação média anual e a evapotranspiração. Conforme essa definição, o grau de aridez de uma região depende do volume de precipitação (P) e da perda máxima possível de água pela evaporação e transpiração (ETP), ou a Evapotranspiração Potencial. As classes de variação para este índice são apresentadas na Tabela 1, enquanto na Tabela 2 está

indicado o grau de susceptibilidade de uma região à desertificação de acordo com o índice de aridez.

Tabela 1. Clima e índice de aridez. Fonte: SAADI (2000).

| Clima | Índice de Aridez |
|-------------------|------------------|
| Hiper-árido | < 0,05 |
| Árido | 0,05 - 0,20 |
| Semi-árido | 0,21 - 0,50 |
| Sub-úmido seco | 0,51 - 0,65 |
| Sub-úmido e úmido | > 0,65 |

Para as áreas de aplicação da Convenção no Brasil, o índice de aridez varia de 0,21 até 0,65.

Tabela 2. Classes de suscetibilidade à desertificação.

Fonte: SAADI (2000).

| Grau de suscetibilidade | Índice de Aridez |
|-------------------------|------------------|
| Muito alto | 0,03 - 0,20 |
| Alto | 0,21 - 0,50 |
| Moderado | > 0,50 |

3. MATERIAIS E MÉTODO

Para a sua elaboração, esse trabalho foi dividido em cinco fases. Na primeira, realizou-se a coleta de dados temáticos (solos), numéricos (altimetria e dados pluviométricos) e análise dos modelos; os dados de altimetria foram digitalizados (12 cartas na escala 1:100.000) e solos editados no *software* SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), para a caracterização pedológica e altimétrica da bacia do rio Brígida, para a formação dos Planos de Informações (PIs) e para a definição do esquema conceitual. Na segunda etapa foram realizados o registro, a mosaicagem e o recorte da imagem no formato da Bacia. Na terceira fase, foram elaborados programas em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico (LEGAL) dos modelos estudados (biofísicos). A quarta etapa foi desenvolvida com a inserção dos dados para o cálculo do Potencial Natural de Erosão - PNE, determinado na programação LEGAL. Na quinta fase, foram realizados os cruzamentos entre planos de informações através da LEGAL, gerando-se assim, o modelo proposto de risco a desertificação e gerados os histogramas para percepção do avanço da degradação na Bacia do rio Brígida.

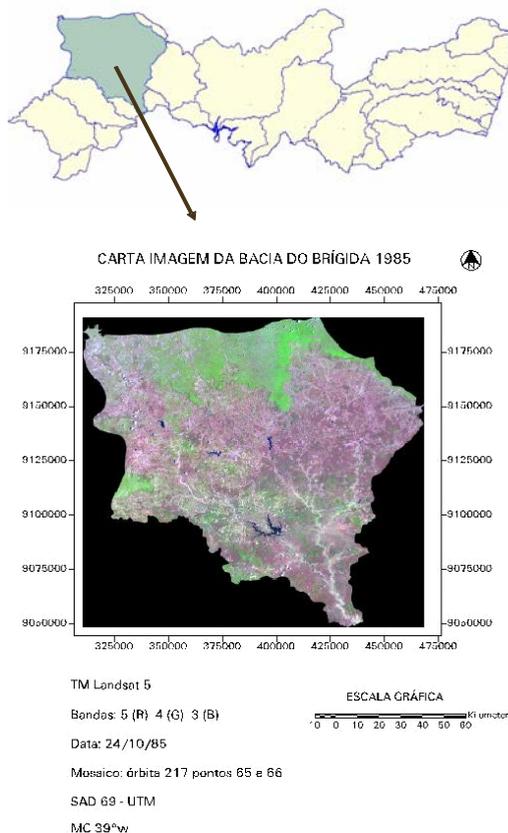
Foram realizadas duas visitas à área escolhida, para percepção da paisagem e avaliação do modelo. A primeira visita foi realizada em agosto e a outra em

novembro de 2004. Essas duas visitas serviram para avaliar o estado da paisagem em relação às espécies vegetais dominantes e níveis de erosão do solo.

3.1 Área de Estudo

A bacia utilizada nesse estudo está localizada na porção oeste do estado de Pernambuco, estando entre as coordenadas 7° 30' a 9° 00' de latitude Sul e 39° 30' a 41° 00' de longitude Oeste (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo e Mosaico da imagem Landsat-5 TM (1985), orbita/ponto 217/65 e 217/66 – Bacia Hidrográfica do Rio Brígida-PE.



Na elaboração do modelo, foram utilizadas diversas cartas topográficas (altimetria) e mapas temáticos (solos) disponibilizados em sistema de projeção UTM, sistema de coordenadas geográficas e referenciais geodésicos Córrego

Alegre, WGS-84 e SAD-69, os quais foram padronizados para o sistema de projeção UTM e datum SAD-69.

3.2 Quantificação da desertificação

Os processos biofísicos (albedo, temperatura da superfície, emissividade, fluxo de calor no solo, NDVI e PNE) vistos em LOPES (2005) podem ser considerados como indicadores da desertificação e são descritos a seguir. Os índices de vegetação, temperatura e emissividade, albedo e fluxo de calor no solo são aqui destacados como parâmetros que devem ser observados na avaliação de risco à desertificação (GARCIA et al., 2008; ACCIOLY et al., 2001). Autores como LIU et al. (2002), MOUAT et al. (1997) e KAZMIERCZAK (1998) elaboraram alguns modelos que usam ponderações dos parâmetros analisados. No modelo proposto, o PNE foi ponderado de forma a representar o risco à desertificação inerente ao solo de acordo com a susceptibilidade da bacia a perdas de solo por erosão.

Todos os parâmetros utilizados no modelo aqui proposto foram equacionados em forma de matriz e são compatíveis com a grade da imagem do sensor TM do satélite Landsat, com tamanho de pixel de 30 m x 30 m. Essas matrizes são então denotadas como PI. A equação (1), que mostra a modelagem aqui tratada, é uma operação matricial $n \times m$, onde representam linha e coluna, respectivamente, e R o atributo de cada célula, indicando o risco a desertificação.

$$R = (A + E + T + N + G) \times PNE \quad (1)$$

onde: A é o albedo da superfície; E é a emissividade; T é a temperatura; N é o NDVI; G é o fluxo de calor no solo; e PNE é o potencial natural de erosão.

Antes da determinação dos parâmetros da equação (1), foi determinada a radiância espectral L_i da banda $i = 1$ a 5 e 7. Em seguida, foi realizada a correção atmosférica pelo método DOS (*Dark Object Subtraction*), usando o histograma de cada banda para selecionar o pixel mais escuro (GÜRTLER et al., 2005). Não é incluído o albedo da superfície em que a correção atmosférica é determinada pelo albedo atmosférico e pela transmitância atmosférica (BASTIAANSEN, 1995).

a) Albedo

Com os dados espectrais das bandas 1 a 5 e 7, foi calculada a reflectância para cada banda (equação 2) e depois a reflectância aparente que é dada pela soma das reflectâncias de cada banda multiplicada pelo seu peso. Todos os cálculos foram realizados através da programação LEGAL.

$$r_i = \frac{\pi \times L_i \times d^2}{E_{sun} \times \cos^2 \theta} \quad (2)$$

onde: L_i é a radiância espectral para a banda i ; d é a distância Sol-Terra; E_{sun} é a radiância solar espectral no topo da atmosfera; θ é o ângulo zenital solar.

Os pesos para as bandas i foram: 0,29 (banda 1), 0,27 (banda 2), 0,23 (banda 3), 0,16 (banda 4), 0,03 (banda 5) e 0,01 (banda 7), conforme descrito por BASTIAANSSEN (1995). O cálculo do albedo no topo da atmosfera r_p é dado pela equação 3:

$$r_p = 0,29r_{b1} + 0,27r_{b2} + 0,23r_{b3} + 0,16r_{b4} + 0,03r_{b5} + 0,01r_{b7} \quad (3)$$

Com o albedo no topo da atmosfera calculado para cada passagem, realizou-se o processo do cálculo do albedo da superfície através do processo de iteração entre a transmitância e a energia que é refletida pela atmosfera que atinge diretamente o sensor (Equação 4).

$$r_o = \frac{r_p - r_a}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$$

onde r_p : albedo no topo da atmosfera; r_a : albedo da atmosfera; τ_{sw} : transmitância atmosférica.

Os valores encontrados para r_a e τ_{sw} foram 0,03 e 0,75, respectivamente. O valor de τ_{sw} foi encontrado por iteração utilizando o pixel mais escuro de corpos d'água (BASTIAANSSEN, 2005).

b) NDVI

Com as reflectâncias das bandas 4 (0,76 - 0,90 μm) e 3 (0,63 - 0,69 μm) calculadas, determinou-se o NDVI pela equação (5) em LEGAL (HUETE & WARRICK, 1990).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

Onde ρ_{NIR} é a reflectância no infravermelho próximo; e ρ_{RED} é a reflectância no vermelho. A utilização deste índice na elaboração do índice (R) justifica-se devido a sua contribuição na discriminação de unidades de paisagem (RIBEIRO et al., 2002).

c) Emissividade

Uma relação empírica foi definida por VANDERGRIEND e OWE (1993) que utilizaram radiômetros para medir simultaneamente o NDVI e a emissividade, determinando assim uma relação entre a emissividade e o NDVI. A partir do NDVI

determinado pela equação (5), aplicou-se a função empírica desenvolvendo um programa em LEGAL para determinação da emissividade, descrita na equação (6).

$$\varepsilon_{(8-14)} = 1,009 + 0,047 \ln(NDVI) \quad (6)$$

d) Temperatura da superfície

A partir da emissividade, realizou-se o cálculo da radiância no termal, para determinação da temperatura da superfície, de acordo com a equação (7), que é uma inversão da fórmula de Plank.

$$T_{rad} = \frac{1260}{\ln\left(\frac{61,6}{L_{TM6}} + 1\right)} / \varepsilon^{0,25} \quad (7)$$

Onde: $B_{TM6}(b,T)$ é a radiância na banda termal 6 em $mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ e ε é a emissividade da superfície.

e) Fluxo de calor no solo

Para determinação do fluxo de calor no solo, faz-se necessário calcular primeiro a radiação global. Na sua determinação, são necessários os seguintes parâmetros: albedo, radiação de ondas longas incidente, radiação de ondas curtas incidente, emissividade da superfície no infravermelho termal e temperatura da superfície. Para o cálculo do segundo parâmetro, foram necessários os dados de temperatura do ar e umidade relativa que foram adquiridas no Distrito de Meteorologia - DISME/Recife. Estes dois dados foram necessários para o cálculo da pressão de vapor saturado, pressão de vapor atual, emissividade da atmosfera e por fim a radiação de ondas longas incidente conforme equação (8), que é considerada espacialmente constante, com o valor de $352,8743 W.m^{-2}$ para o ano de 1985.

$$L^{\downarrow} = \varepsilon_{atm} \times \sigma \times T_{air}^4 \quad (8)$$

onde ε_{atm} é a emissividade atmosférica, σ é a constante de Boltzmann e T_{air} é a temperatura do ar.

Para o cálculo do terceiro parâmetro, foi calculada a radiação solar instantânea que é função do ângulo solar zenital, constante solar e distância sol-terra, depois foi determinada a densidade do fluxo de radiação perpendicular ao topo da atmosfera, e finalmente a radiação de onda curta recebida na superfície que é expressa na equação (9).

$$K^{\downarrow}_{(x,y)} = K^{\downarrow}_{TOA} \times \tau_{sw} \quad (9)$$

onde K^{\downarrow}_{TOA} é a radiação de ondas curtas incidente no topo da atmosfera τ_{sw} é a transmitância atmosférica.

Os dados de ângulo zenital solar foram determinados para cada pixel através de uma operação no SPRING, e programação no MATLAB em que foi gerado um arquivo dat e importado para o SPRING no formato spr. O quinto parâmetro foi determinado através do albedo, da radiação termal e emissividade, de acordo com as equações vistas anteriormente.

A partir dos cinco parâmetros calculados, foi realizado o cálculo da radiação global, como expresso na equação (10). Todos os parâmetros foram programados em LEGAL.

$$R_n = (1 - r_o)K^{\downarrow} + L^{\downarrow} - \varepsilon_o \sigma T_o^4 - (1 - \varepsilon_o)L^{\downarrow} \quad (10)$$

onde r_o é o albedo; K^{\downarrow} é a radiação de ondas curtas incidente; L^{\downarrow} é a radiação de ondas longas incidente; ε_o é a emissividade da superfície; σ é a constante de Boltzmann e T_o é a temperatura da superfície. Para a programação do modelo do fluxo de calor no solo, foram necessários os parâmetros de albedo, NDVI, temperatura e radiação global.

f) Cálculo do PNE

Para se gerar o PNE, foram necessários os seguintes PIs: classes de solo, erodibilidade do solo (K), erosividade das chuvas, curvas de nível, declividade, drenagem e fator topográfico. O mapa das classes de solo foi obtido na forma vetorial a partir do ZAPE (2001). Este mapa foi importado para o SPRING, no qual foi recortado no formato da Bacia, editadas as classes e transformado para matriz para aplicação do programa de ponderação das classes. Com o PI solo editado, desenvolveu-se um programa de ponderação das classes. As classes foram ponderadas de acordo com a classificação de solos da bacia e Tabela 3, para a especialização da erodibilidade.

Tabela 3. Classes de valores de erodibilidade do solo. Fonte: LEPRUN (1986).

| Classe | Valor de K | Classe de Solo |
|---------------|------------|------------------|
| Fraca | < 0,1 | AQ, LA |
| Fraca a Média | 0,1 - 0,3 | R, Re, V, NC, PV |
| Média a Forte | 0,3 - 0,5 | TR, PL |
| Forte | > 0,5 | SS |

AQ = Arenas Quartzosas; LA = Latossolo Amarelo; R = Solos Litólicos; Re = Regossolos; V = Vertissolos; NC = Brunos Não-Cálcicos; PV = Podzólicos Vermelhos; TR = Terra Roxa; PL = Planossolos; SS = Solonetz Solodizados.

Para o cálculo da erosividade das chuvas, foram obtidos dados da precipitação anual de postos localizados na Bacia e próximos à Bacia, que perfazem o total de 39 postos e possuem média histórica variando de 9 a 66 anos. Esses dados foram interpolados em grade regular de 30 m x 30 m (tamanho do pixel da imagem), para que com a equação de erosividade determinada por LEPRUN (1986), ela fosse determinada em toda a Bacia.

As curvas de nível foram digitalizadas em mesa digitalizadora na escala de 1:100.000 com distância equivalente a 40 m. Essas cartas foram geradas a partir de aerolevantamento pelo Departamento de Serviço Geográfico do Exército brasileiro de 1968. Os dados altimétricos foram digitalizados em UTM/Córrego Alegre e importados para o SPRING em UTM/SAD-69. Com o PI curva de nível gerado, procedeu-se o desenvolvimento da rede triangular. A partir dela, foi produzida a grade regular da altimetria com resolução espacial de 30 m x 30 m. A declividade foi gerada da grade regular da altimetria. Foram geradas as declividades em percentagem e em ângulo utilizando-se da função existente no SPRING. A declividade em ângulo foi necessária para o cálculo do comprimento de rampa.

A drenagem foi importada para o SPRING no formato shape e em coordenadas geográficas, sendo necessária a transformação para UTM no SPRING. A rede de fluxo serviu para o cálculo do comprimento de rampa utilizado na determinação do fator LS. O cálculo desse fator depende do comprimento de rampa e da declividade. O comprimento de rampa foi determinado a partir da drenagem e declividade angular no qual procedeu-se o desenvolvimento de um programa em LEGAL. O PNE correspondeu à soma dos fatores erosividade, erodibilidade e LS.

3.3 O modelo proposto para espacializar o risco a desertificação

Para acesso ao grau de degradação e risco à desertificação, foi proposto um modelo envolvendo o PNE dos solos da bacia, mais os parâmetros: albedo, temperatura, emissividade, NDVI e fluxo de calor no solo, conforme equação (1). O PNE foi ponderado de acordo com perda de solo e a área de cada classe de perda de solo (Tabela 4). Desta forma, a classe com maior perda de solo e maior área obteve maior peso. Para a ponderação do mapa de PNE, foi desenvolvido um programa em LEGAL através da variável *pondere*. Esse programa definiu um PI de grade numérica para as classes de potencial.

O modelo proposto pela Equação (1) é então obtido através da declaração e instanciamento das variáveis integradas em um banco de dados. Supõe-se, na equação de risco à desertificação, uma transformação exponencial de cada parâmetro biofísico de acordo com o risco que o valor de cada variável apresenta. Esta modelagem foi desenvolvida, uma vez que não se tem conhecimento sobre o

comportamento dos valores dos parâmetros e o estado de degradação do ambiente analisado.

Tabela 4. Ponderação do Potencial Natural de Erosão.

| Potencial Natural de Erosão (ton/ha.ano ⁻¹) | Ponderação |
|---|------------|
| 0 – 10 | 1,001 |
| 10 – 30 | 1,02 |
| 30 – 70 | 1,09 |
| 70 – 150 | 1,15 |
| 150 – 310 | 1,17 |
| 310 – 630 | 1,10 |
| > 630 | 1,11 |

Para a transformação exponencial, os parâmetros foram escalonados entre 2 e 3, e em seguida somados e diminuído de 9 para expressar um risco entre 0 e 5, onde 5 é o valor que representa alto risco de desertificação. Além da transformação exponencial, para um estudo mais aprofundado, pode-se, também, modelar o estado de degradação a partir de uma transformação linear, realizando testes de campo em função do grau de degradação do solo e vegetação.

Após a transformação exponencial aplicada, os resultados foram multiplicados pelo PNE. Os valores entre zero e 1 representam risco mínimo, entre 1 e 2 significam baixo risco, entre 2 e 3 risco moderado, entre 3 e 4 risco alto e entre 4 e 5 risco extremo.

4. RESULTADOS

.Em todas as figuras, a legenda do mapa representa valores mínimos no seu topo e valores máximos no final da representação. Estas figuras são representações temáticas baseadas nas equações anteriormente mostradas e/ou baseadas também nas imagens do sensor TM.

A Figura 5 apresenta o mapa de risco à desertificação para o ano de 1985, enquanto a Figura 6 mostra o mapa de risco à desertificação para o ano de 2001. Observa-se na Figura 5 referente ao ano de 1985, que o risco à desertificação modelado ficou entre 1 e 2, enquanto para época de 2001, o risco a desertificação foi de 3, com poucas áreas com risco mínimo (1), indicando um aumento na degradação na bacia. Uma das principais causas desse aumento, verificado em campo, é devido ao desmatamento para calcinadoras e, como conseqüência, a erosão do solo principalmente em áreas de maior declividade e em solos com maior susceptibilidade à erodibilidade.

Fig. 5 – Mapa de risco a desertificação no período de seca (24/10/85).

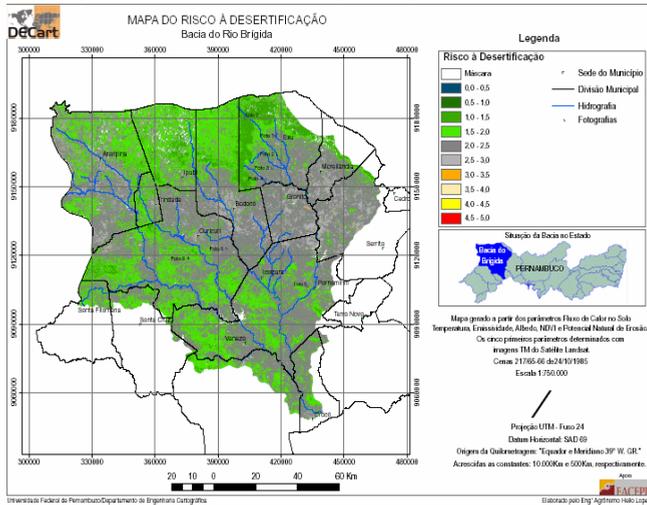
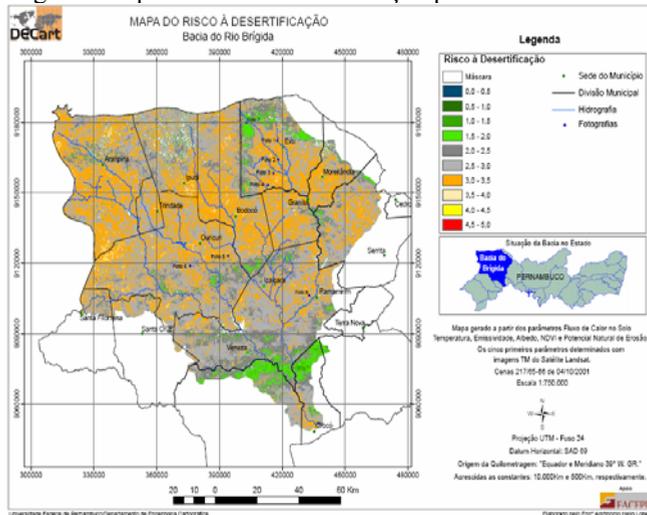
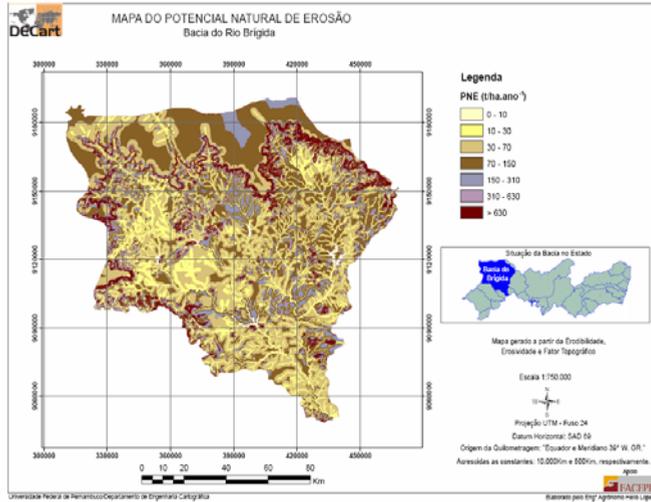


Fig. 6 – Mapa de risco a desertificação para o ano de 2001.



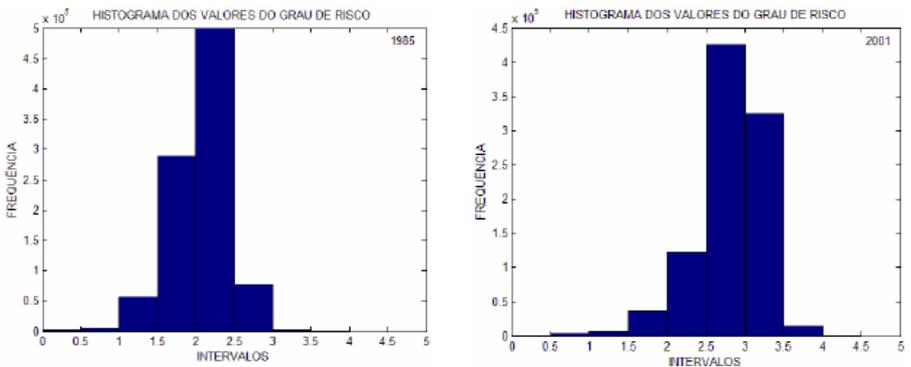
Na Figura 7, é apresentado o mapa de PNE que varia de 0 a 430 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Conforme a Figura 7, a maior parte da bacia apresenta PNE entre 10 e 70 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Verifica-se com isso que a área que possui maior potencial de perda de solo caso seja desmatada possui maior risco a desertificação, devido ao maior grau de erosão.

Fig. 7 – Mapa do Potencial Natural de Erosão.



Para a realização da análise de risco à desertificação, foram construídos dois histogramas dos valores de risco a desertificação, sendo um para o ano de 1985 e o outro para o ano de 2001 (Figura 8).

Figura 8 - Distribuição quantitativa e qualitativa do risco a desertificação para os anos de 1985 e 2001 para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Conforme mostrada na Figura 8, para o ano de 1985, a maioria dos pixels se concentraram no intervalo de risco de 2,0 a 2,5, representando uma área de 7.183 km² da área da bacia. Com relação ao ano de 2001, o intervalo em que houve maior concentração de pixels foi de 2,5 a 3,0, totalizando uma área de 6.127 km². Para a

comparação das mudanças ocorridas entre os valores de risco a desertificação nas duas épocas analisadas, foi realizada a tabulação cruzadas dos dois PIs que representam os mapas de risco a desertificação, conforme esquematizado na Tabela 5.

Tabela 5. Dados gerados no SPRING através da função tabulação cruzada, sendo os valores em hectares.

| 1985 \ 2001 | 0-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 |
|-------------|--------|-----------|-----------|---------|------|
| 0-1 | 664,20 | 14,76 | 0,63 | 0,00 | 0,00 |
| 1-2 | 33,39 | 28120,50 | 26930,79 | 101,07 | 0,00 |
| 2-3 | 13,59 | 370016,55 | 431479,71 | 1798,56 | 2,61 |
| 3-4 | 0,54 | 117223,92 | 377416,62 | 3579,84 | 7,83 |
| 4-5 | 0,00 | 119,88 | 638,46 | 30,42 | 0,18 |

Na Tabela 5, as linhas são as classes de risco para a imagem de risco à desertificação para o ano de 2001 e as colunas para o ano de 1985. Conforme esta tabela, 370.016 ha que representavam risco à desertificação entre 1 e 2 em 1985, em 2001 passaram a ter risco entre 2 e 3. Para os 117.223 ha que em 1985 representavam risco entre 1 e 2, passaram a ter risco entre 3 e 4 no ano de 2001. Poucas áreas tiveram redução de risco. Um exemplo é 1798 ha que em 1985 possuíam risco entre 3 e 4, e em 2001 passaram a representar um risco entre 2 e 3. Pela Tabela 5, percebe-se que não houve mudanças drásticas, como por exemplo, passar de 0-1 para o intervalo de 4-5. Um exemplo é uma pequena área de 119 ha que em 1985 possuía risco à desertificação entre 1 e 2, e passou a representar risco entre 4 e 5 em 2001. Esta análise foi para o período de seca onde há maior uniformidade na paisagem.

Os resultados aqui atingidos mostram um aumento dos parâmetros calculados e no grau de risco à desertificação. O modelo poderá ser avaliado para determinar o estado de desertificação para um dado local.

5. CONCLUSÕES

A quantificação de desertificação é um tema que vários autores têm abordado na literatura, buscando modelá-la por meio de diversos parâmetros. Para essa quantificação, é necessário aplicar parâmetros representativos buscando espacializar o problema, mostrando os locais de baixo, médio e alto risco à desertificação. Dessa forma, procuramos modelar um algoritmo que represente e integre os diversos parâmetros representativos de um ecossistema (solo-vegetação), tendo em vista que,

no Estado de Pernambuco, 63% da sua área correspondem a sertão e estão susceptíveis a processos de desertificação. Buscou-se, no desenvolvimento do modelo aqui proposto, realizar uma análise por unidade de bacia hidrográfica que seria muito interessante para definir as áreas mais susceptíveis em função dos processos hidrológicos que ocorrem.

Este trabalho realizou uma modelagem baseada em parâmetros biofísicos e potencial natural de erosão para acesso ao risco à desertificação na bacia do rio Brígida - PE. Foram utilizadas análises multitemporais com duas imagens-mosaico da época seca (imagens dos anos 1985 e 2001). Através dos modelos aplicados em LEGAL, geraram-se vários mapas temáticos para caracterizar melhor o problema espacialmente.

Observou-se que o sensoriamento remoto pode auxiliar no acompanhamento destas áreas, além do conhecimento de topografia, solos, vegetação entre outros, através dos parâmetros biofísicos aplicados.

Diante dos resultados gerados, podem-se tirar as seguintes conclusões: 1) Em termos de paisagem, o modelo tem congruência; 2) Os parâmetros analisados aumentaram de valores, refletindo aumento na degradação da bacia; 3) O grau de risco na bacia aumentou, principalmente próximo as regiões gesseiras onde ocorre intensa exploração da madeira, o que condiz com um aumento na degradação do ecossistema; 4) A inserção do potencial natural de erosão faz-se importante, devido estar inserido no modelo a variável PNE (solo, relevo e precipitação); 5) O aumento do grau de risco representa uma pressão sobre recursos ambientais, que, com o tempo, poderá levar a um estado de degradação avançado na Bacia e de difícil reversão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, J. L. O.; OLIVEIRA, MAJ; SILVA, FHBB; BURGOS, M., 2001. *Avaliação de Mudanças no Albedo do Núcleo de Desertificação do Seridó através de Imagens do Landsat TM*. Anais X SBRS, Foz do Iguaçu.
- BASTIAANSEN, W.G.M., 1995. *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen The Netherlands. 273p.
- DALL'OLMO, G.; & KARNIELI, A., 2002. *Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery*. International Journal of Remote Sensing, v. 23, nº. 19, p. 4055–4071.
- GARCÍA, M.; OYONARTE, C.; VILLAGARCÍA, L.; CONTRERAS, S.; DOMINGO, F.; PUIGDEFÁBREGAS, J., 2008. *Monitoring land degradation risk using ASTER data: The non-evaporative fraction as an indicator of ecosystem function*. Remote Sensing of Environment v. 112, p. 3720–3736.

- GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R., 2005. *Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ Landsat*. Revista Brasileira de Cartografia, nº 57/02.
- HOUNTONDJI, Y. C.; SOKPON, N.; OZER, P., 2006. *Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of desertification*. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 5, 10, p. 871–884.
- HUETE, A. R. & WARRICK, A. W., 1990. *Assessment of Vegetation and Soil Water Regimes in Partial Canopies with Optical Remotely Sensed Data*. Remote Sensing Environment. 32:155-167.
- KAZMIERCZAK, M. L., 1998. *Desenvolvimento de um algoritmo para modelar a susceptibilidade de desertificação no Nordeste do Brasil: algoritmo ISD[NEB]*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. Santos, SP. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos: INPE, p. 133-143.
- LEPRUN, J. C., 1986. *Manejo e conservação de solos do Nordeste*. Recife: SUDENE-DRN, 271p.: il.
- LIU, Y.; GAO, J.; YANG Y., 2003. *A holistic approach towards assessment of severity of land degradation along the great wall in northern Shaanxi province, China*. Environmental Monitoring and Assessment, v. 82, p. 187-202.
- LOPES, H. L., 2005. *Modelagem de Parâmetros Biofísicos para Avaliação de Risco à Desertificação*. Recife, 101 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- MOUAT, D.; LANCASTER, J.; WADE, T.; WICKHAM, J.; FOX, C.; KEPNER, W.; BALL, T., 1997. *Desertification evaluated using integrated environmental assessment model*. Environmental Monitoring and Assessment, v. 48, p. 139-156.
- PERNAMBUCO/SECTMA, 1999. *The State Policy to Control Desertification*. 31p.: il.
- RAHMAN, S.; RAHMAN, H.; KERAMAT, M., 2007. *Study on the seasonal changes of land cover and their impact on surface albedo in the northwestern part of Bangladesh using remote sensing*. International Journal of Remote Sensing, v. 28, nº. 5, 10, p. 1001–1022.
- RIBEIRO, S. R. A; BÄHR, H. P; CENTENO, J. S., 2002. *Integração de imagens de satélite e dados complementares para a delimitação de unidades de paisagem usando uma abordagem baseada em regiões*. Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 8, nº1, p.47-57.
- SAADI, A., 2000. *Os sertões que viram desertos*. Boletim Informativo da Sociedade de Ciência do Solo, v. 25, n. 1, p. 10-17, jan/mar.

- SYMEONAKIS, E. & DRAKE, N., 2004. *Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa*. International Journal of Remote Sensing, 10, v. 25, n.º. 3, 573–592.
- UN *General Assembly Report on the United Nations/European Space Agency/Committee on Space Research Workshop on Data Analysis and Image-Processing Techniques* Distr.: General 14 August 2001 Original: English. Damascus, 25-29 March 2001. http://www.oosa.unvienna.org/Reports/AC105_765E.pdf
- VAN DER GRIEND, A.A.; OWE, M., 1993. *On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces*. International Journal of Remote Sensing, v. 14, p. 1119-1131.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J., 1982. *Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção*. Recife: convênio SEMA/SUDENE. 101p.
- ZAPE – ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO DO ESTADO DE PERNAMBUCO/Fernando Barreto Rodrigues e Silva [et al.]. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento – UEP. Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária), 2001. CD-ROM.

(Recebido em março de 2009. Aceito em outubro de 2009).