UMA ABORDAGEM GEOESPACIAL E ESPECTRO-TEMPORAL DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO BIOMA CAATINGA NA REGIÃO DE XINGÓ, BRASIL

A geospaceal and spectrum-temporal approach of the environmental degradation in the Caatinga biome in the region of Xingó, Brazil

Neison Cabral Ferreira Freire[1]
Admilson da Penha Pacheco[2]

RESUMO

A Caatinga é o tipo de vegetação que cobre a maior parte da área com clima semiárido da região Nordeste do Brasil. Estudos nesse ecossistema são imprescindíveis, pois esse bioma é um dos mais ameaçados devido ao uso inadequado e insustentável dos recursos naturais. No Brasil, o semiárido é uma das regiões mais afetadas pelo problema, ocasionando processos desertificatórios crescentes com graves consequências socioambientais. Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia geoespacial e espectro-temporal para analisar e mapear a degradação ambiental do bioma Caatinga na região semiárida de Xingó/Alagoas/Brasil. Através do cruzamento de séries temporais de imagens de satélite (1989 – 1995 – 2003) e dados demográficos, foi possível a detecção de áreas de risco e passíveis de desertificação nos seis municípios circunvizinhos à Usina Hidrelétrica de Xingó. Pesquisas de campo validaram os resultados obtidos em laboratório, apoiados em extensa literatura sobre os indicadores de desertificação. Os resultados obtidos a partir da manipulação de dados georreferenciados por técnicas de Processamento Digital de Imagens e elaboração de um Sistema de Informações Geográficas evidenciaram um quadro desolador de degradação ambiental na extensa área em estudo, com uma significativa devastação da Caatinga, aumento de solo exposto

[1] Pesquisador Titular da Fundação Joaquim Nabuco, Diretoria de Pesquisas Sociais, Recife, Brasil. freire.neison@gmail.com.

[2] Professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco, Depto. de Engenharia Cartográfica, Recife, Brasil. pacheco3p@gmail.com.

e diminuição de áreas agropastoris. Enfim, concluiu-se que em janeiro de 2003, dos 4.405,29 km² da área de estudo, cerca de 985,44 km², ou 22,37%, apresentaram problemas ambientais significativos quanto ao risco de desertificação.

PALAVRAS-CHAVE: Desertificação. Sensoriamento Remoto. Caatinga. Semiárido.

ABSTRACT

The Caatinga is the type of vegetation that covers most of the semi-arid climate area of the Northeast region of Brazil. Studies in this ecosystem are essential, since this biome is one of the most threatened due to the inadequate and unsustainable use of natural resources. In Brazil, the semi-arid region is one of the regions most affected by the problem, causing increasing desertification processes with serious socio-environmental consequences. This work aims to establish a geospatial and spectral-temporal methodology to analyze and map the environmental degradation of the Caatinga biome in the semi-arid region of Xingó / Alagoas / Brazil. Through the cross - reference of time series of satellite images (1989 - 1995 - 2003) and demographic data, it was possible to detect areas of risk and desertification in the six municipalities surrounding the Xingó Hydroelectric Power Plant. Field surveys validated the results obtained in the laboratory, supported by extensive literature on indicators of desertification. The results obtained from the manipulation of data georeferenced by Digital Image Processing techniques and elaboration of a Geographic Information System evidenced a desolating picture of environmental degradation in the extensive area under study, with a significant devastation of the Caatinga, increase of exposed soil and Of agropastoral areas. Finally, it was concluded that in January 2003, of the 4,405.29 km² of the study area, about 985.44 km², or 22.37%, presented significant environmental problems regarding the risk of desertification.

KEYWORDS: Desertification. Remote Sensing. Caatinga. Environmental degradation. Northeastern Brazil.

Submission date: 12/04/2017
Acceptance date: 24/07/2017

1 INTRODUÇÃO

A caatinga é o tipo de vegetação que cobre a maior parte da área com clima semiárido da região Nordeste do Brasil (GIULIETTI *et al*., 2002). A região é caracterizada por um dos climas mais complexos do mundo, o qual apresenta irregularidades na distribuição espacial e temporal das precipitações pluviométricas, sendo uma região marcada por anomalias (MARENGO 2010; LACERDA *et al*., 2010).

As ações antrópicas têm gerado grandes impactos nas paisagens por meio do intenso processo de substituição das áreas naturais por diversos tipos de uso do solo e da fragmentação das áreas com cobertura florestal (MATSUSHITA; XU; FUKUSHIMA, 2006). O Bioma Caatinga tem sofrido grandes alterações nas últimas décadas devido às atividades antrópicas. Sua biota, "apesar de ser ainda muito mal conhecida, é mais diversa que qualquer outro bioma do mundo, o qual esteja exposto às mesmas condições de clima e de solo" (SILVA *et al*., 2004).

A degradação ambiental crescente no semiárido brasileiro, o frágil equilíbrio dos ecossistemas presentes no bioma Caatinga, o regime inconstante das chuvas, os solos delgados e pobres em nutrientes orgânicos e as precárias condições socioeconômicas das populações que habitam a região semiárida brasileira formam um conjunto de fatores que favorecem a ocorrência dos processos de degradação ambiental. A demanda de uso energético da vegetação da caatinga tem gerado modificações nas paisagens e perda de diversidade biológica por insuficiência de informações sobre o manejo das espécies (FIGUEIROA *et al*., 2008).

Nesse aspecto, as tecnologias de sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental de grandes áreas, associadas ao desenvolvimento de sistemas de geoinformação que permitem análises espaço-temporais precisas e acuradas sobre um determinado fenômeno, natural ou antropogênico, favorecem a pesquisa científica aplicada ao monitoramento ambiental. De maneira geral, tem-se observado, nas últimas décadas, um aumento de estudos envolvendo o Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicado aos recursos naturais. No âmbito do semiárido, destacam-se, nos últimos anos, os trabalhos de Lopes *et al*. (2009), Lu *et al*. (2009), Wu *et al*. (2010), Bezerra *et al*. (2011), Arraes *et al*., (2012), Nascimento e Araújo (2014), e Lopes *et al*., (2014).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal estabelecer uma metodologia geoespacial e espectro-temporal para analisar e mapear a degradação ambiental do bioma caatinga na região semiárida de Xingó/Alagoas/Brasil. Este estudo adotou um conjunto de dados que permitiu o estabelecimento de uma metodologia para a pesquisa sobre a degradação ambiental no semiárido nordestino, ao processar, extrair e cruzar dados espectrais captados pelos sensores remotos a bordo de satélites de observação da Terra, com dados de setores censitários rurais oriundos dos censos demográficos, em séries temporais correlatas, abrangendo o período de 1989 a 2003, para a área de estudo escolhida: os seis municípios mais próximos ao lago da Usina Hidrelétrica de Xingó, no baixo curso do Rio São Francisco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

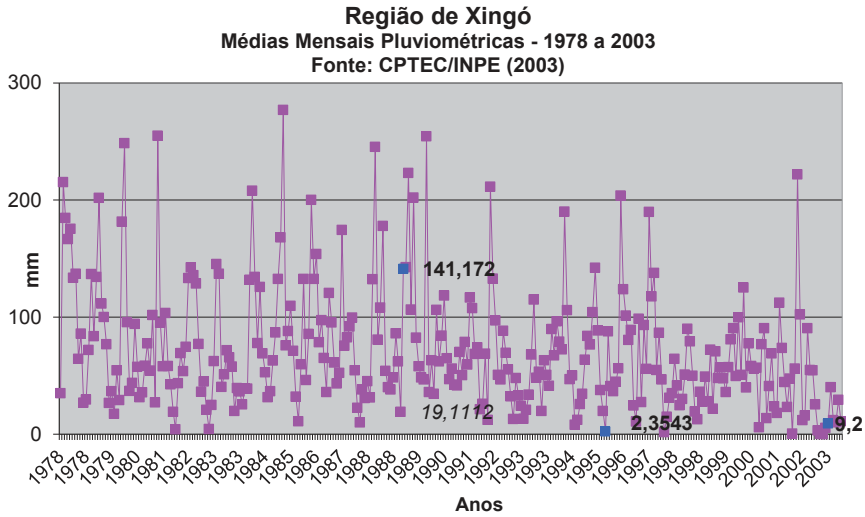
Inicialmente, uma vez localizada espacialmente a área de estudo, foi solicitado ao CPTEC/INPE os dados referentes às médias mensais pluviométricas da área de estudo (***Figura 1***), no período de 1978 a 2003, considerando que as imagens digitais dos sistemas LandSAT 5 TM e LandSAT 7 ETM+ só estão disponíveis a partir de 1982. Os dados pluviométricos são imprescindíveis para uma escolha correta das imagens de satélite a serem posteriormente solicitadas, pois a resposta espectral da vegetação de caatinga tem grande variabilidade com a presença de água, devido às suas características fisiológicas de adaptação às secas. O gráfico evidencia o regime inconstante das chuvas que, aliado aos outros fatores, aumenta a susceptibilidade à erosão e o consequente empobrecimento dos solos no semiárido, potencializando as causas da degradação ambiental.

Após pesquisa junto ao banco de imagens LandSAT, verificou-se a disponibilidade de datas para a cena/órbita 215/067, sendo selecionadas as seguintes datas:

- 11/03/89 – por ser a mais antiga disponível e, embora o mês de aquisição registre um volume hídrico considerável (141,172mm), observa-se que a aquisição foi feita na primeira quinzena do mês, refletindo, ainda, as condições hídricas do mês anterior, que fora de 19,111mm – uma taxa abaixo da média observada no período 1978 – 2003 que foi de 72,033mm;

- 06/10/95 – uma data intercalada entre a mais antiga e a mais recente (2003) e, também, por estar mais próxima do início do mês, reflete consideravelmente as condições hídricas do mês anterior (19,856mm) (***Figura 2***); e,
- 05/01/03 – data mais recente, com baixa precipitação inclusive no mês anterior (5,400mm).

Figura 1 – Gráfico com os dados de médias mensais pluviométricas da Região de Xingó e datas escolhidas das imagens (marcadas na cor azul).



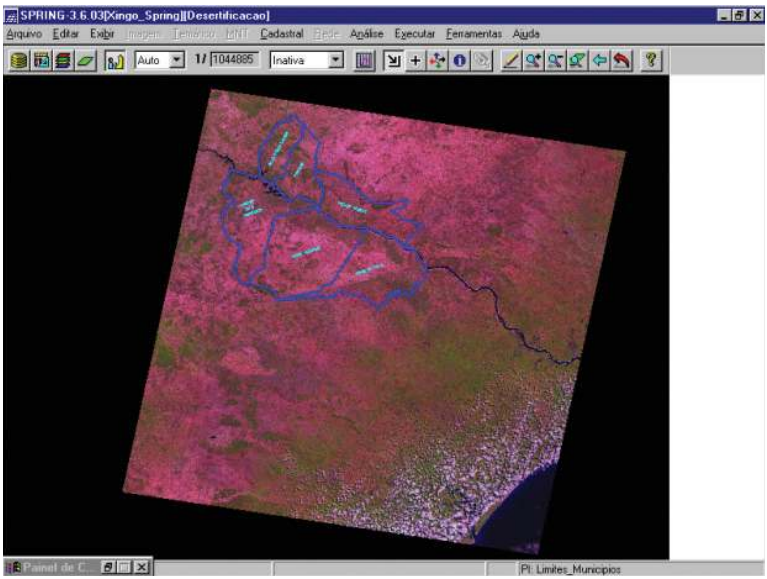
Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE, 2003.[3]

Todas as datas escolhidas refletem períodos de carência hídrica, onde a vegetação está mais vulnerável à degradação. Outro fator decisivo para a escolha destas datas específicas se refere à quase ausência de cobertura de nuvens nas imagens – condição essencial para um melhor resultado na identificação dos alvos de interesse da pesquisa. Isso permitiu o estabelecimento de parâmetros climáticos muito similares para as respostas espectrais dos diversos alvos nas cenas escolhidas para o estudo. Foram selecionadas as bandas espectrais que registram o espectro da energia refletida, indo da região visível ao infravermelho próximo, pois os alvos de interesse da pesquisa têm grande resposta espectral nessa faixa. Assim, foram processadas as bandas de 1 a 5, além da banda 7, para ambos os sensores TM e ETM+.

[3] Disponível em: //www.cptec.inpe.br Acesso: 18/07/2017.

Para o processamento das imagens de satélite foi utilizado o programa computacional *Spring* (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas, INPE).

Figura 2 – Cena inteira do LandSAT (Órbita/Ponto: 215/067, Data: 06/10/95) com os seis municípios da área de estudo.

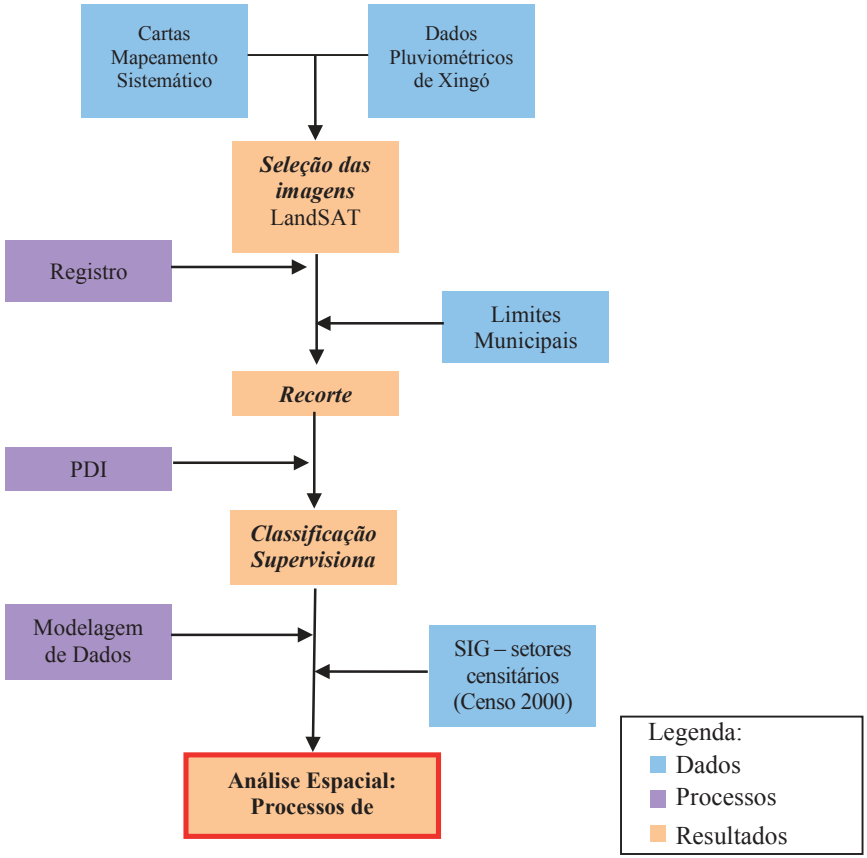


Fonte: Elaborado pelos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ***Figura 3*** ilustra um fluxograma geral utilizado para a metodologia de processamento dos dados, processos e sucessivos resultados obtidos. Após a seleção das imagens LandSAT e conversão dos arquivos digitais para o formato Spring.SPG, o primeiro passo foi definir um esquema conceitual no *Spring*, estabelecendo-se, adequadamente, um Banco, um Projeto, as Categorias e os Planos de Informações adequadamente. Sendo que: 1) um Banco no *Spring* define um ambiente para armazenar dados geográficos, sem estar vinculado a uma área, 2) um Projeto dentro de um banco permite especificar exatamente o espaço geográfico da área de trabalho, e 3) os dados georreferenciados são inseridos em Planos de Informações. Cada Projeto possui ainda propriedades cartográficas (*projeção*, *datum*, etc) pré-definidas pelo usuário, que são herdadas pelas informações contidas neste projeto.

Figura 3 – Fluxograma geral da metodologia utilizada na pesquisa.

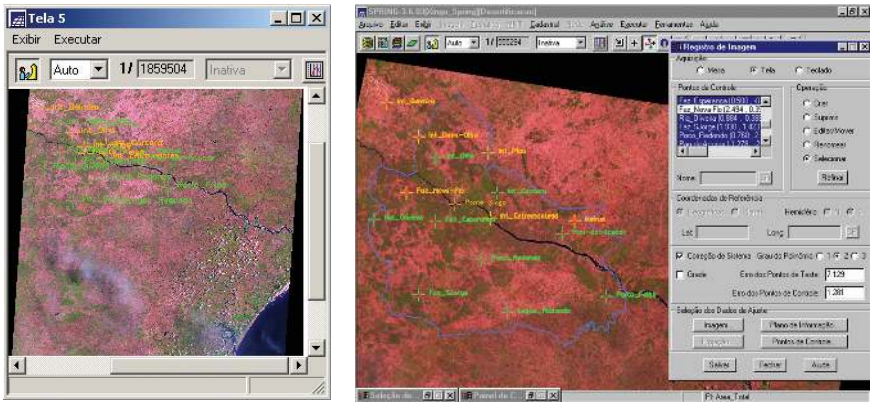


Foram utilizadas Transformações Polinomiais e foi realizado o registro ou georreferenciamento das imagens originais, cujos pontos de controle foram obtidos a partir de coordenadas retiradas das cartas analógicas do Ministério do Exército, na escala de 1:100.000, observando pontos notáveis nas imagens e procurando definir uma distribuição mais uniforme e concentrada na área de estudo (***Figura 4***). Foi realizado o registro das imagens originais, sendo considerados os 10 melhores em termos de erro sistemático, utilizando-se o interpolador Vizinho + Próximo.

Uma vez que as imagens estavam georreferenciadas e recortadas, iniciaram-se as técnicas de PDI, visando à melhoria da qualidade visual das imagens e a extração de informações específicas de interesse da pesquisa.

Foram testadas diversas técnicas com o intuito de avaliar a aplicabilidade na identificação das áreas degradadas e passíveis de desertificação. As técnicas que apresentaram melhores resultados foram selecionadas para compor uma análise espacial realizada numa linguagem de programação de álgebra espacial que, junto aos dados censitários, pudesse caracterizar cientificamente e localizar espacialmente a ocorrência dos processos de desertificação em Xingó.

Figura 4 – Distribuição dos pontos de controle para o registro das imagens LandSAT



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: à esquerda, os pontos em relação à cena inteira; à direita, em relação à área de estudo (Data: 11/03/89)

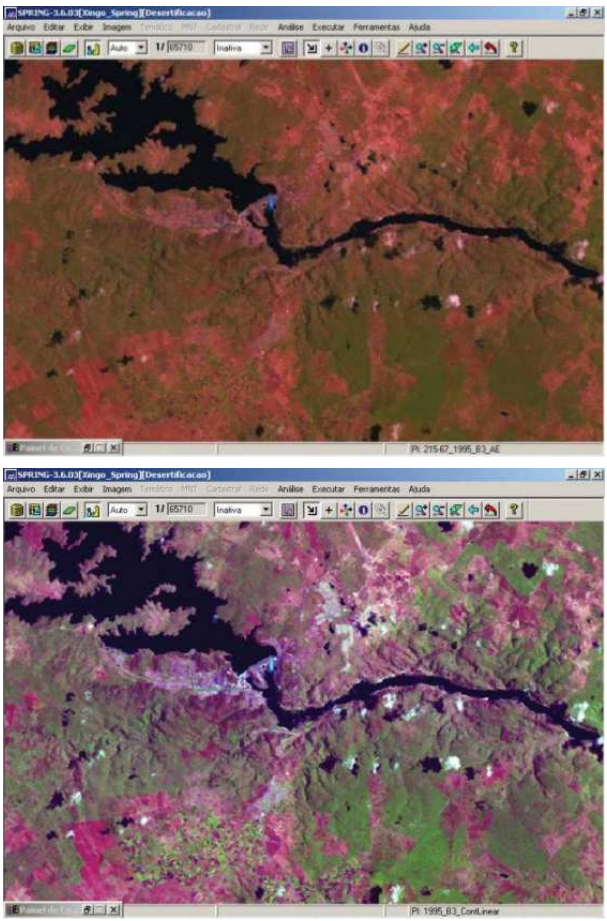
O primeiro conjunto de técnicas utilizado refere-se ao Realce de Contraste. Segundo Crósta (1993), o objetivo dessas técnicas é melhorar a qualidade visual das imagens para uma posterior interpretação e enfatizar alguma característica de interesse para uma aplicação específica. No caso, os alvos de interesse são, basicamente, vegetação nativa, pasto/cultura agrícola, solo exposto, corpos d'água e área urbana.

As técnicas de realce testadas foram:

- Manipulação de Histograma
  - Linear
  - Equalização
- Filtragem Linear
  - Realce de Imagem TM
  - Filtro de Passa-Alta

A manipulação linear de histograma é definida por uma função de transferência linear, onde y = f(x). Assim, quanto maior é a inclinação da reta no histograma de frequências, maior será o realce da imagem (CRÓSTA, 1993; MOREIRA, 2003). A forma do histograma da imagem realçada é a mesma da imagem original, pois cada barra do histograma continua tendo a mesma altura, porém em uma posição diferente (***Figura 5***).

Figura 5 – Imagens desertificação



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: À esquerda, a imagem original, onde os alvos aparecem com pouca definição; após aplicar-se o realce linear do histograma (imagem à direita), a distinção entre vegetação e solo exposto fica mais nítida numa Combinação Espectral RGB 543 – Falsa Cor (Data: 06/10/95); observa-se um pequeno brilho em azul no centro da figura, significando a abertura do vertedouro da represa da UHE Xingó no momento da aquisição da cena.

De uma maneira em geral, os filtros têm por objetivo tornar mais nítida a transição entre regiões diferentes (bordas) na imagem (COLWELL, 1983; JENSEN, 1999). Assim, testando essa técnica, utilizou-se um Filtro de Passa-Alta com uma matriz não-direcional de borda. Entretanto, os resultados obtidos não trouxeram grande contribuição na identificação dos alvos, exceto na detecção das margens do rio São Francisco (transição água – solo), pois nesta região o rio está inserido num cânion geológico.

Das técnicas de realce de imagem testadas, conclui-se que, para esta pesquisa, o realce linear de histograma apresentou os melhores resultados na melhoria da qualidade visual das imagens e na distinção entre os alvos naturais e antrópicos, além de não modificar os valores espectrais originais.

A seguir foram testadas e avaliadas as técnicas de PDI referentes às Transformações Multiespectrais, objetivando-se uma avaliação espectro-temporal de imagens co-registradas.[4]

As técnicas avaliadas foram:

a) Razão entre bandas
b) Componentes Principais
c) Transformação RGB → IHS

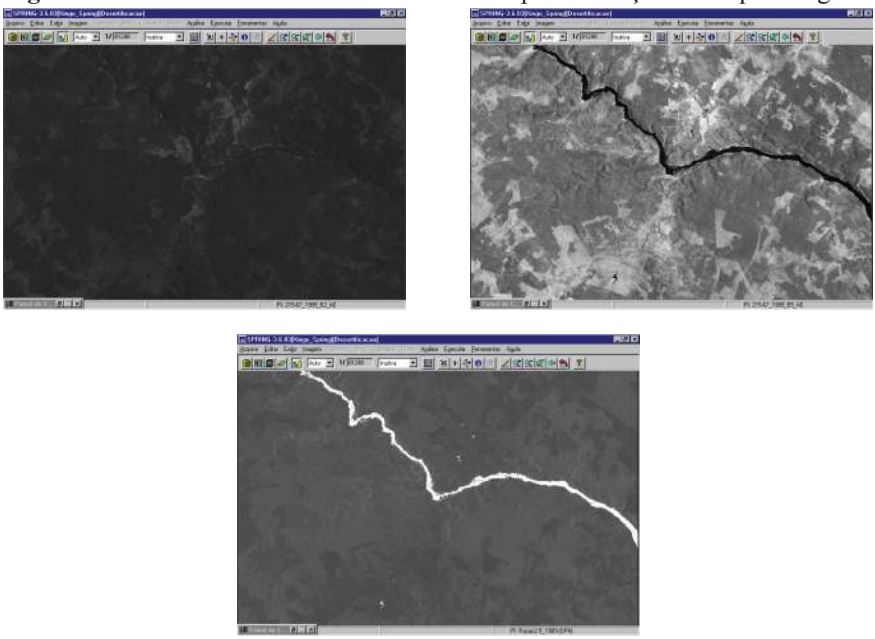
Foram testadas três técnicas de razão entre bandas: a primeira objetivou a detecção de corpos d'água, a segunda, a presença de vegetação, e a terceira, a mudança de cobertura vegetal entre os anos de 1989 e 2003.

Como a água limpa e profunda tem grande absorção nas bandas TM 2 e TM 5, a razão aritmética entre estas bandas diminui os NC's deste alvo, evidenciando sua presença na imagem resultante (***Figura 6***).

Uma das mais importantes técnicas de transformações multiespectrais para detecção de mudança de vegetação é o NDVI. Trata-se de uma razão entre bandas espectrais de alta correlação entre si, uma operação aritmética que realça os alvos de interesse, no caso, a vegetação (COLWELL, 1983; JENSEN, 1999), Com a aplicação dessa técnica, tem-se um aumento de contraste entre solo e vegetação, além dos efeitos de iluminação, declividade da superfície e geometria de visada do sensor serem parcialmente compensados.

[4] De uma mesma localização geográfica, porém de épocas distintas.

Figura 6 – Razão entre as bandas TM 2 e TM 5 para detecção de corpos d'água



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: excelentes resultados com a perfeita identificação do leito do rio São Francisco e outros pequenos corpos d'água (em branco); ao alto à esquerda, a banda TM 2 original; ao alto à direita, a banda TM 5 original; na figura maior, a imagem resultante (Data: 11/03/89).

Segundo Colwell, (1983) e Jensen (1999), a equação do NDVI é dada por:

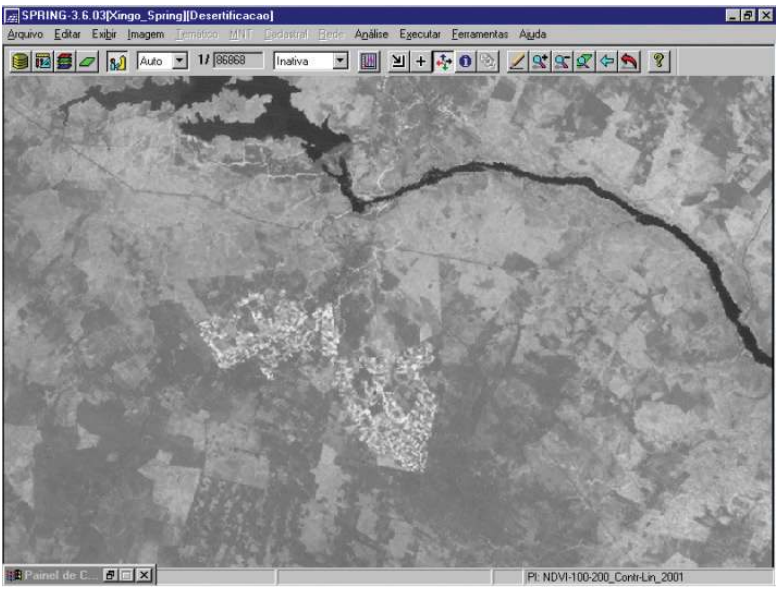
$$NDVI = (TM4 – TM3) / (TM4 + TM3), (1)$$

Na equação acima, TM representa a reflectância de uma determinada banda espectral do sistema LandSAT. Para a banda TM 3 (região do vermelho), a vegetação verde, densa e uniforme fica escura. Por outro lado, para a banda TM 4, os corpos d'água ficam escuros e a vegetação verde, densa e uniforme fica clara. Disto resulta uma nova banda espectral, representando a razão entre as bandas originais, onde as áreas claras indicam a presença de vegetação e as áreas escuras, sua ausência numa mesma data (***Figuras 7 e 8***).

As reflectâncias das bandas NDVI de 1989 e 2003 foram, então, utilizadas com o objetivo de detectar mudanças de padrão da cobertura do solo no período. A técnica tem as seguintes etapas (COLWELL, 1983; JENSEN, 1999):

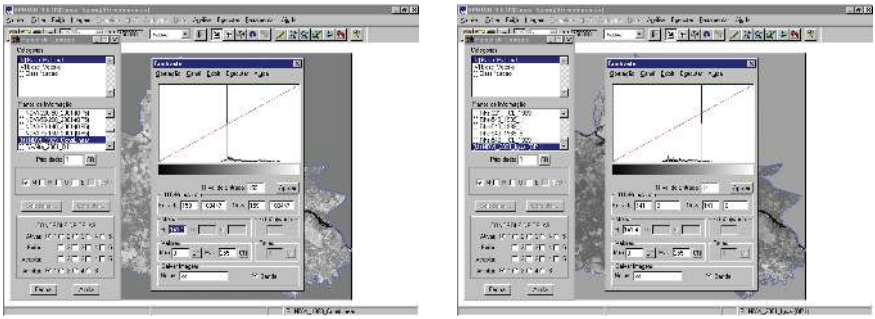
- Obtenção das estatísticas da imagem, tomando-se a banda NDVI 1989 como referência, para modificar a banda NDVI 2003 (***Figura 7***);
- Cálculo de ganho e *offset* para igualar média dos NC's e variância das respectivas bandas:
  - NDVI 1989 – Média = 141,1358
  - NDVI 2003 – Média: antes = 191,7848; depois = 141,4315
- Ganho = (V1989/V2003)
- Offset = M1989 – ganho x M2003
- Igualar média e variância: NDVI-2003_igual = ganho x NDVI_CL_1989+offset (***Figura 8***)
- Razão entre as bandas 1989/2003
- Realce de Contraste

Figura 7 – NDVI: áreas claras indicam presença de vegetação (Data: 05/01/03)



Fonte: Elaborado pelos autores.

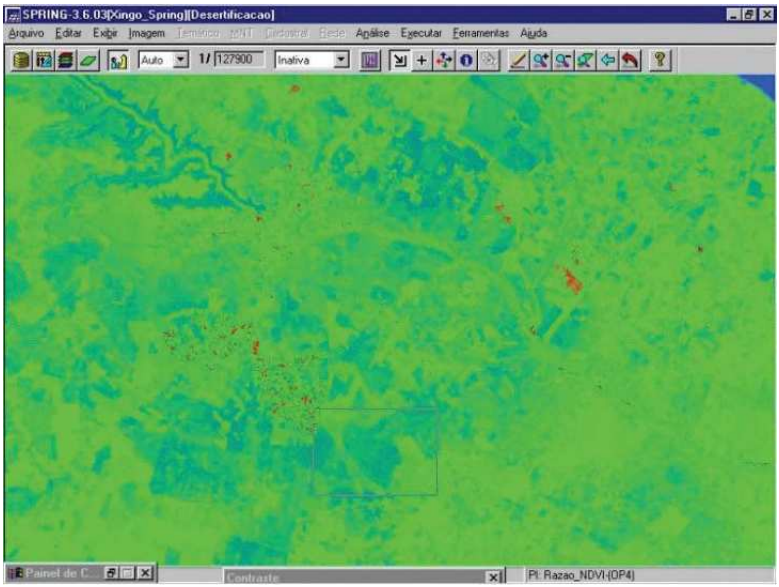
Figura 8 – Igualando a média da banda NDVI 2003 (esquerda) à banda NDVI 1989 (direita)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao realizar a razão entre as bandas NDVI de 1989 e 2003, antes igualando a média e a variância, resulta numa nova banda espectral que identifica as áreas onde houve perda de vegetação no período observado. Para melhorar a qualidade da imagem resultante, foi feita uma composição em pseudo-color com fatiamento em arco-íris, como mostra a ***Figura 9***.

Figura 9 – Detecção no padrão de cobertura vegetal entre 1989 e 2003 a partir de NDVI



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: as áreas escuras perderam vegetação no período estudado, como, por exemplo, as margens do lago da UHE Xingó.

A segunda técnica de Transformações Multiespectrais em PDI avaliada foi a de *Transformação RGB → IHS*. O objetivo desta técnica é mapear o sistema de cores RGB para o sistema IHS, controlando melhor a formação de cores de acordo com a percepção do SVH. Segundo Crósta (1993), quando descreve as propriedades de cor de um objeto em uma imagem, normalmente o olho humano não distingue a proporção de azul, verde e vermelho presentes, como no sistema computacional associado ao monitor de vídeo, e sim, avalia a intensidade (I), a cor ou matiz (H) e a saturação (S), onde:

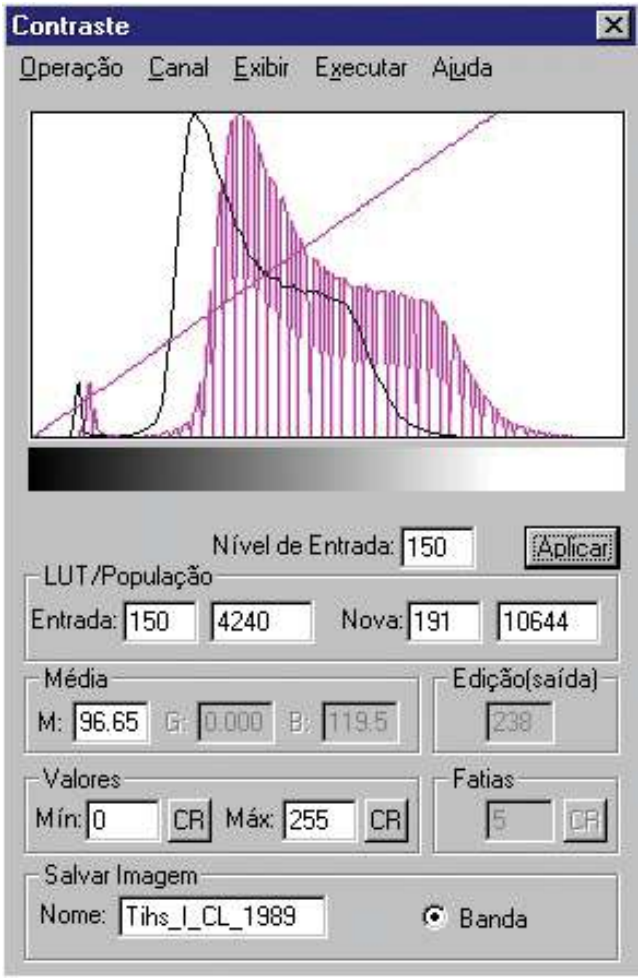
a) A *intensidade* ou brilho significa a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo, assim, responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho;
b) O *matiz* ou cor de um objeto traz a medida do comprimento de onda médio da luz que se reflete ou se emite, definindo, portanto, a cor do objeto;
c) A *saturação* ou pureza expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é refletida ou transmitida. Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons pastéis (apagados).

A técnica consiste em calcular a intensidade, o matiz e a saturação de três bandas espectrais, depois processar a componente I, aplicando um realce de contraste (***Figura 10***) e, finalmente, fazer a reversão para o sistema RGB para que possa, então, ser visualizado por um monitor de vídeo de microcomputador. Os resultados dessa técnica podem ser vistos na ***Figura 11***.

Das duas técnicas de Transformações Multiespectrais avaliadas nesta pesquisa, a que apresentou resultados práticos mais significativos do ponto de vista de melhoria da extração de informações espectro-temporais foi a de NDVI, principalmente quando aplicada a técnica de razão entre bandas para detecção de mudança no padrão e cobertura vegetal no período observado. Assim, pela importância dessa informação como indicador de processo de desertificação (MATALLO, 1999; ACCIOLY *et al*., 2002; ARAÚJO *et al*., 2002), optou-se por considerar, efetivamente, os resultados desta técnica de PDI como um dos elementos de suporte à identificação e localização de áreas degradadas na região em

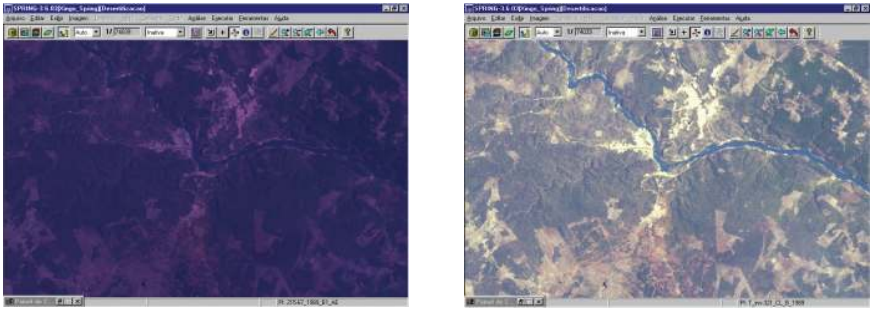
estudo, onde, associado a outros resultados a serem discutidos adiante, poderá validar em gabinete o conjunto de dados que, numa linguagem de programação de álgebra espacial, permitirá mapear os processos de desertificação instalados em Xingó.

Figura 10 – Realce de contraste na componente I (intensidade) para melhorar a qualidade de brilho na imagem resultante.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11 – Reversão de IHS para RGB



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: ao alto, a imagem original; acima, a mesma imagem transformada RGB → IHS; observa-se maior facilidade na distinção dos alvos da cena (Data: 11/03/89).

Para compor este conjunto de dados a ser utilizado na análise espacial dos processos de desertificação em Xingó, utilizou-se a técnica de Classificação Supervisionada que, segundo Crósta (1993), trata-se do processo de extração de informações em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Assim, os métodos de classificação são usados para mapear áreas da superfície terrestre que apresentam um mesmo significado em imagens digitais.

Nesta pesquisa, utilizou-se o método de classificação "*pixel*-a-*pixel*" que identifica regiões homogêneas a partir da informação espectral isolada de cada *pixel*, fazendo, ainda, uso da teoria de probabilidade por métodos estatísticos. Assim, o resultado da classificação digital é apresentado por classes espectrais (áreas que possuem características espectrais semelhantes), considerando-se a relação entre a resposta espectral dos alvos de interesse na pesquisa e as classes a serem mapeadas. De fato, tem-se como resultado final de um processo de classificação uma única imagem digital composta por um mapa de *pixels* classificados, representados, neste caso, por cores.

No processo de classificação, um grande número de NC's é transformado num pequeno número de classes temáticas. Como existem regiões na imagem em que se tem conhecimento da realidade de campo, através de pesquisas realizadas desde março de 2000 no Laboratório de Geoprocessamento INPE/Xingó, a Classificação Supervisionada pode ser empregada, tendo-se o cuidado de identificar nas imagens diversas áreas de treinamento representativas e homogêneas de cada classe de interesse na pesquisa, porém observando a inclusão de toda a variabilidade espectral dos alvos em estudo.

Foram definidas seis classes temáticas a serem mapeadas pelo método:

- Área urbana
- Corpos d'Água
- Caatinga Arbórea
- Caatinga Arbustiva
- Pasto/cultivo
- Solo exposto

Para cada classe foram identificadas doze amostras em cada uma das três datas, fazendo um subtotal de setenta e duas amostras para cada data e um total de duzentas e dezesseis amostras. Cada conjunto de doze amostras produziu uma Matriz de Erro que foi analisada isoladamente, sendo refeita algumas vezes até atingir um desempenho geral ≥ 95% para cada data pesquisada. Isso garantiu a qualidade das amostras para a posterior classificação.

Embora as classificações tenham sido realizadas sobre as bandas espectrais originais, cada amostra foi avaliada visualmente sobre as diversas técnicas de PDI testadas anteriormente, objetivando-se a confirmação da homogeneidade e exatidão da amostra em relação à classe temática à qual pertencia (***Figura 12***). A matriz de erro de classificação apresenta a distribuição de porcentagem de *pixels* classificados correta e erroneamente; as colunas representam o total porcentual por classe.

O classificador utilizado foi o de MAXVER, pois este considera a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos, onde um conjunto de amostras de treinamento define o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento.

Ao considerar, por exemplo, duas classes com distribuição de probabilidade distinta de um *pixel* pertencer a uma classe ou a outra dependendo de sua posição em relação a esta distribuição, o *pixel* que se situar na região onde as duas classes se sobrepõem estão sujeitos à definição de limiares de aceitação do classificador – um critério de decisão do usuário. Os limites de classificação são definidos a partir de pontos de mesma probabilidade de classificação de uma e de outra classe. Objetivando a diminuição da confusão entre as classes, ou seja, uma

redução desta sobreposição entre as distribuições de probabilidades das classes, diversas aquisições de amostras significativas de alvos distintos foram adquiridas, bem como as avaliações das matrizes de classificação dessas amostras.

Esta avaliação concluiu que o conjunto de amostras foi bastante satisfatório, atingindo uma média de 96% de exatidão para a maioria das classes identificadas nas imagens. Como limiar de aceitação, adotou-se o valor de 100% para uma completa classificação de todos os *pixels* na imagem.

Figura 12 – Análise da Matriz de Erros da Classificação em 2003.

amostras-classi-sup-2003-NOVA.amo - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Ajuda

MATRIZ DE ERROS DE CLASSIFICACAO

(colunas: dados de referencia)

	Area_Urban	Caat_Arbo	Caat_Arbu	Corpos_Agu	Pasto	Solo_Expos	Abstencao	Soma lin.
Area_Urban	224 1.58%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	3 0.02%	0 0.00%	227
Caat_Arbo	0 0.00%	225 1.59%	2 0.01%	0 0.00%	2 0.01%	0 0.00%	0 0.00%	229
Caat_Arbu	1 0.01%	164 1.16%	6071 42.80%	0 0.00%	156 1.10%	5 0.04%	0 0.00%	6397
Corpos_Agu	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	2650 18.68%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	2650
Pasto	0 0.00%	0 0.00%	1 0.01%	0 0.00%	787 5.55%	2 0.01%	0 0.00%	790
Solo_Expos	51 0.36%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	11 0.08%	3828 26.99%	0 0.00%	3890
Soma col.	276	389	6074	2650	956	3838	0	14183

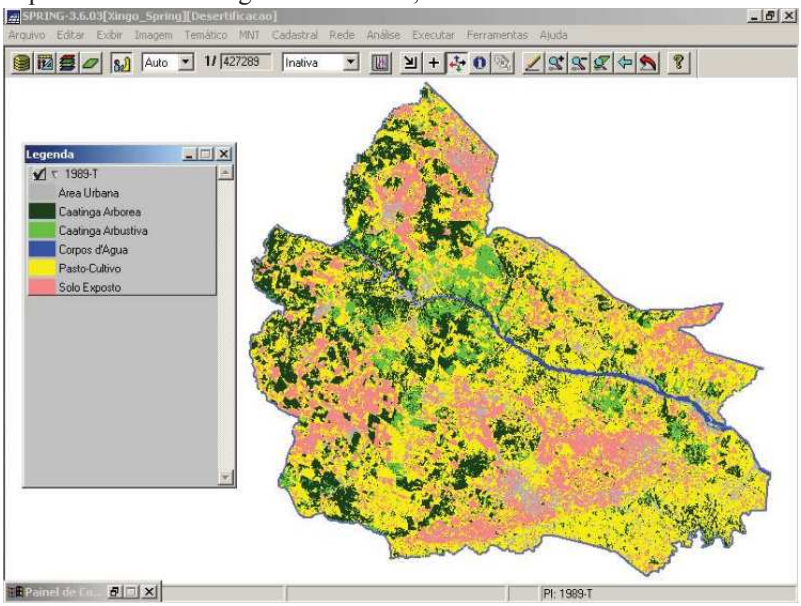
	Exatidao do produtor	Exatidao do usuario
Area_Urban	81.16%	98.68%
Caat_Arbo	57.84%	98.25%
Caat_Arbu	99.95%	94.90%
Corpos_Agu	100.00%	100.00%
Pasto	82.32%	99.62%
Solo_Expos	99.74%	98.41%

Desempenho geral: 97.19 %
Confusao media : 2.81 %
Abstencao media : 0.00 %

Fonte: Elaborado pelos autores.

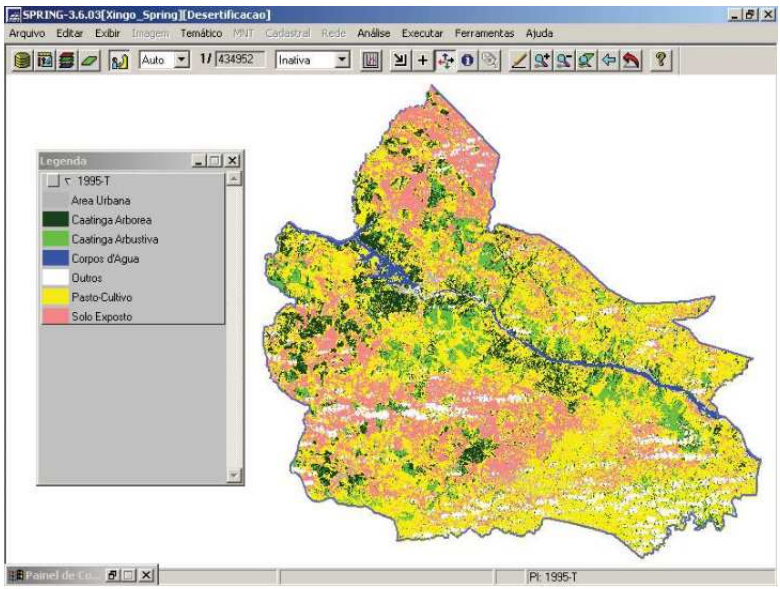
Assim, foram realizadas as classificações supervisionadas nas três datas de imagem da pesquisa: 1989, 1995 e 2003, obtendo-se o mapeamento temático temporal da área de estudo, conforme ilustram as ***Figuras 13, 14 e 15***, respectivamente.

Figura 13 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 11/03/89, identificando as classes de interesse.



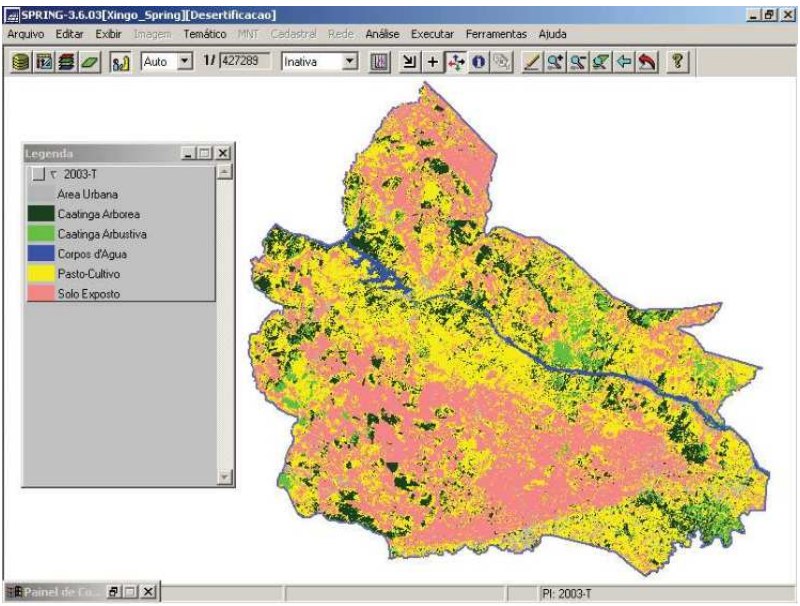
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 14 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 06/10/95, onde se observa uma discreta presença de nuvens na área.



Fonte: Elaborado pelos autores.

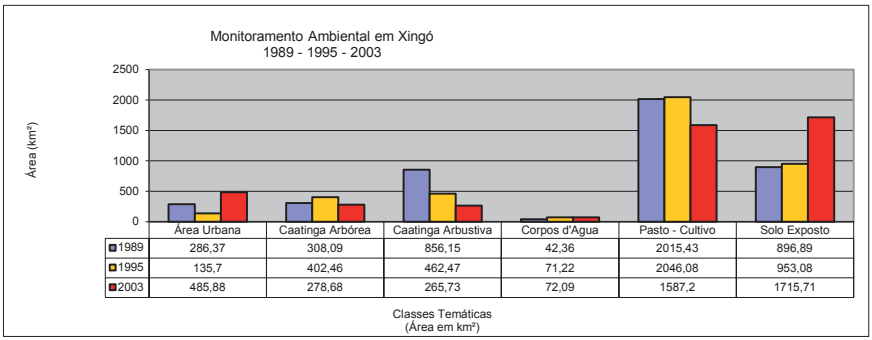
Figura 15 – Mapeamento temático obtido a partir de Classificação Supervisionada na imagem de 05/01/03



Fonte: Elaborado pelos autores.

As classes foram quantificadas em termos de área e processadas através de planilha eletrônica (***Figura 16***). Ao analisar o gráfico, destaca-se o avanço de solo exposto nas classes de caatinga – um notável indicador de degradação ambiental na área de estudo (***Figura 17***).

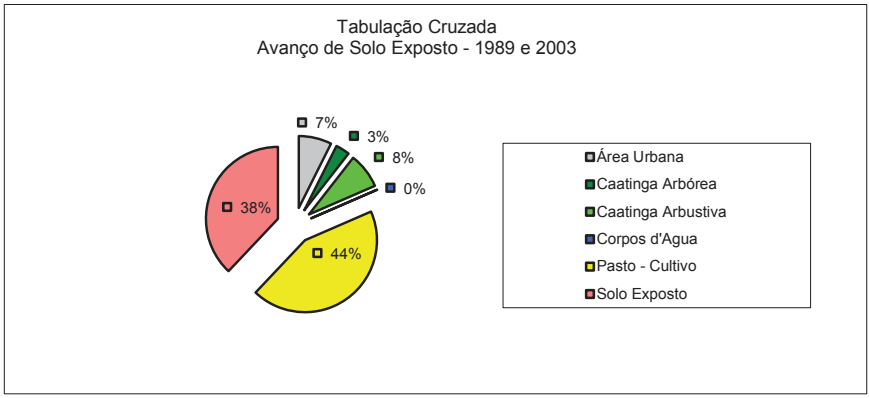
Figura 16 – Gráfico das quantificação das classes temáticas em 1989, 1995 e 2003



	Área Urbana	Caatinga Arbórea	Caatinga Arbustiva	Corpos d'Agua	Pasto - Cultivo	Solo Exposto
1989	286,37	308,09	856,15	42,36	2015,43	896,89
1995	135,7	402,46	462,47	71,22	2046,08	953,08
2003	485,88	278,68	265,73	72,09	1587,2	1715,71

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 17 – Cruzamento de dados 1989 – 2003



Fonte: Elaborado pelos autores.
Nota: esse gráfico mostra o porcentual conquistado pelo solo exposto em 2003 em relação às classes de 1989.

Para compreender com maior precisão e acurácia a localização espacial dos processos de desertificação, foi elaborada uma Análise Espacial, a partir do desenvolvimento de um aplicativo em LEGAL, implementado no *Spring (*INPE, 2001).

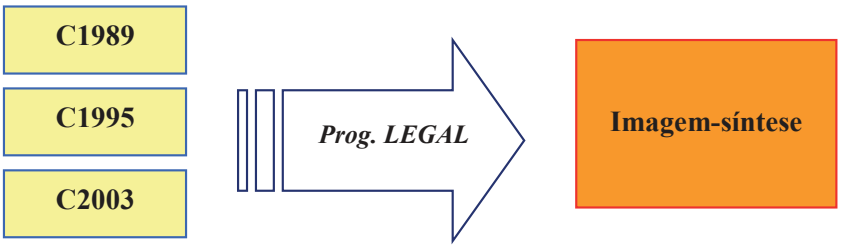
A estrutura de uma programação em LEGAL exige as seguintes etapas:

- declarações de variáveis (no caso, as imagens classificadas e a imagem-síntese a ser gerada);
- instanciações[5] de variáveis (basicamente, quem são estas variáveis no sistema e seus parâmetros operacionais);
- operações de álgebra de mapas (quais são as operações espaciais a serem efetuadas com as variáveis anteriormente declaradas);
- comandos de controle.

A ***Figura 18*** ilustra um fluxograma da programação desenvolvida em LEGAL: os dados de entrada, o processamento em LEGAL e a saída gráfica da Análise Espacial.

[5] Identificação dos dados no sistema em relação às variáveis antes declaradas.

Figura 18 – Diagrama da Análise Espacial para o período 1989 – 1995 – 2003: dados de entrada com as imagens classificadas, a programação em LEGAL e a saída gráfica como uma imagem-síntese da Análise Espacial.

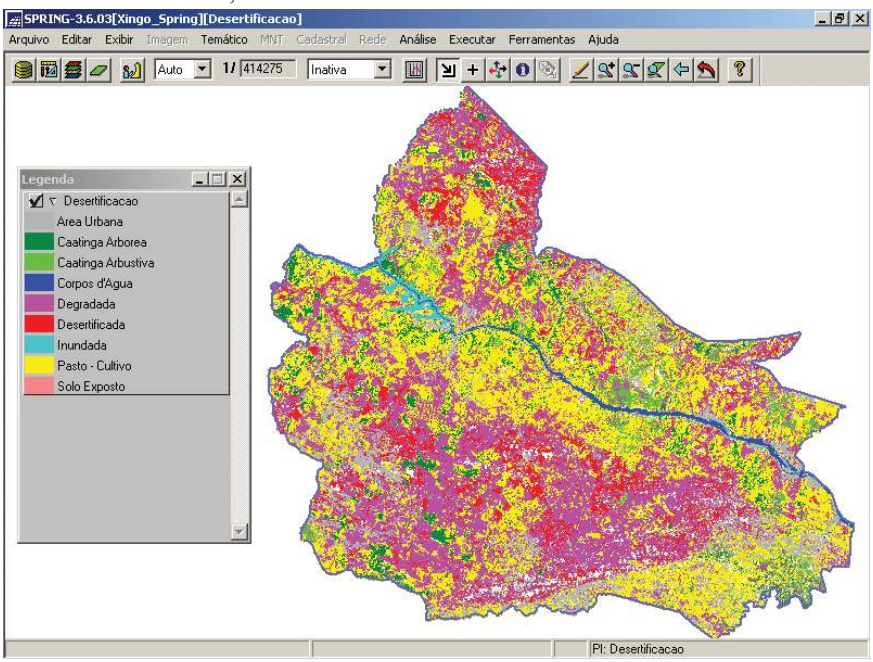


Tem-se como objetivo avaliar o comportamento espacial dos alvos ao longo do período observado, especialmente com relação aos indicadores de degradação ambiental, neste caso, a diminuição da cobertura vegetal de caatinga e o avanço de solo exposto. De fato, para efeito desta análise-síntese da grave situação ambiental em Xingó, considerou para a programação em LEGAL que:

- Áreas que sempre permaneceram como "Solo exposto", nas três datas, são consideradas áreas "Em processo de desertificação" (na legenda, "Desertificada"), e aparecem na cor vermelha na imagem-síntese;
- São consideradas "Áreas degradadas" (na legenda, "Degradada"), aparecendo na cor magenta, idem:
  - Áreas que eram cobertas por vegetação de caatinga em 1989 e/ou 1995 e em 2003 tornou-se "Solo exposto";
  - Áreas que em 1989 e/ou 1995 eram cobertas por "Caatinga arbórea" e em 2003 tornou-se "Caatinga Arbustiva", pois isto indica perda de biomassa, certamente por atividades ilegais de extração de madeira;
  - Áreas que em 1989 e/ou 1995 eram urbanas, pasto ou cultivo e em 2003 transformaram-se em "Solo Exposto";
- Houve algumas poucas recuperações de caatinga no período, sendo todas essas áreas enquadradas na respectiva classificação identificada em 2003;
- Algumas áreas permaneceram com as mesmas classes no período em estudo, sem alterações em seu padrão de cobertura.

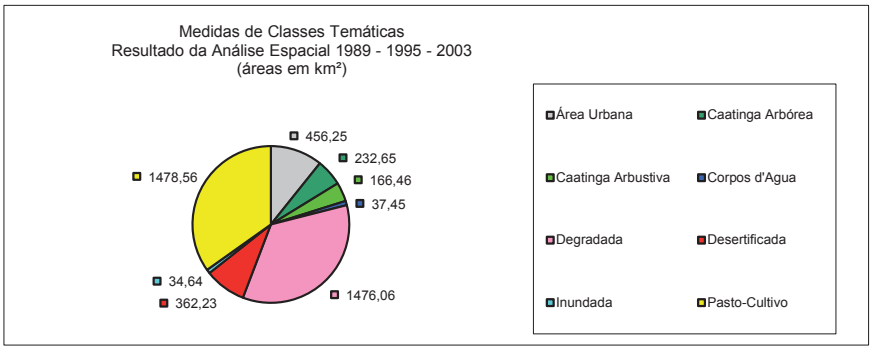
O algoritmo desenvolvido, chamado "Degradação", está publicado no ***Quadro 1***, o resultado em termos espaciais pode ser visto na ***Figura 19*** e um gráfico mostra a contribuição de cada classe desta análise espacial na ***Figura 20***.

Figura 19 – Imagem-síntese gerada em LEGAL, a partir dos dados das imagens classificadas de 1989, 1995 e 2003.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 20 – Gráfico dos percentuais das classes temáticas, obtidos através da Análise Espacial em LEGAL com o cruzamento de dados das imagens classificadas de 1989, 1995 e 2003.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 1 – Algoritmo "Degradação", desenvolvido em LEGAL, objetivando uma Análise Espacial sobre áreas degradadas em Xingó, no período 1989 – 1995 – 2003.

```
// Programa em LEGAL para
// detectar areas desertificadas e degradadas
// em Xingo
// Autor: Neison Cabral Ferreira Freire
// UFPE - DECart - Pos-Grad em C. Geodesicas e Tec. da Geoinformação
// Data: 14-julho-2003, Revisado e Ampliado em 30-nov-2003

// Faz o cruzamento entre PI's tematicos
// Classif Sup 1989, 1995 e 2003
// identificando avanco de areas degradadas e desertificadas

Tematico T1989, T1995, T2003 ("Classificacoes");
Tematico Degrada ("Analises");
T1989 = Recupere (Nome = "1989-T");
T1995 = Recupere (Nome = "1995-T");
T2003 = Recupere (Nome = "2003-T");
Degrada = Novo (Nome = "Desertificacao", ResX=30, ResY=30, Escala=100000);
Degrada = Atribua (CategoriaFim="Analises")
{
"Desertificada": (T1989.Classe == "Solo Exposto" && T1995.Classe == "Solo Exposto" && T2003.Classe == "Solo Exposto" &&
T2003.Classe == "Solo Exposto"),

"Degradada":( ( T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Solo Exposto")||(T1989.Classe == "Caatinga
Arborea" && T2003.Classe == "Solo Exposto")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arborea" && T2003.Classe == "Caatinga Arbustiva")
||(T1989.Classe == "Pasto-Cultivo" && T2003.Classe == "Solo Exposto")
||(T1989.Classe == "Corpos d'Agua" && T2003.Classe == "Solo Exposto")
||(T1989.Classe == "Area Urbana" && T2003.Classe == "Solo Exposto")
),

"Corpos d'Agua": ((T1989.Classe == "Corpos d'Agua" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")),

"Inundada":((T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arborea" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")
||(T1989.Classe == "Solo Exposto" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")
||(T1989.Classe == "Area Urbana" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")
||(T1989.Classe == "Pasto-Cultivo" && T2003.Classe == "Corpos d'Agua")),

"Caatinga Arbustiva": ((T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Caatinga Arbustiva")||(T1989.Classe ==
"Solo Exposto" && T2003.Classe == "Caatinga Arbustiva")
||(T1989.Classe == "Pasto-Cultivo" && T2003.Classe == "Caatinga Arbustiva")
),

"Caatinga Arborea": ((T1989.Classe == "Caatinga Arborea" && T2003.Classe == "Caatinga Arborea")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Caatinga Arborea")
||(T1989.Classe == "Solo Exposto" && T2003.Classe == "Caatinga Arborea")
||(T1989.Classe == "Area Urbana" && T2003.Classe == "Caatinga Arborea")
),

"Area Urbana": ((T1989.Classe == "Area Urbana" && T2003.Classe == "Area Urbana")
||(T1989.Classe == "Pasto-Cultivo" && T2003.Classe == "Area Urbana")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arborea" && T2003.Classe == "Area Urbana")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Area Urbana")
||(T1989.Classe == "Solo Exposto" && T2003.Classe == "Area Urbana")
||(T1989.Classe == "Corpos d'Agua" && T2003.Classe == "Area Urbana")),

"Pasto - Cultivo": ((T1989.Classe == "Pasto-Cultivo" && T2003.Classe == "Pasto-Cultivo")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arborea" && T2003.Classe == "Pasto-Cultivo")
||(T1989.Classe == "Caatinga Arbustiva" && T2003.Classe == "Pasto-Cultivo")
||(T1989.Classe == "Solo Exposto" && T2003.Classe == "Pasto-Cultivo")
||(T1989.Classe == "Corpos d'Agua" && T2003.Classe == "Pasto-Cultivo"))
```

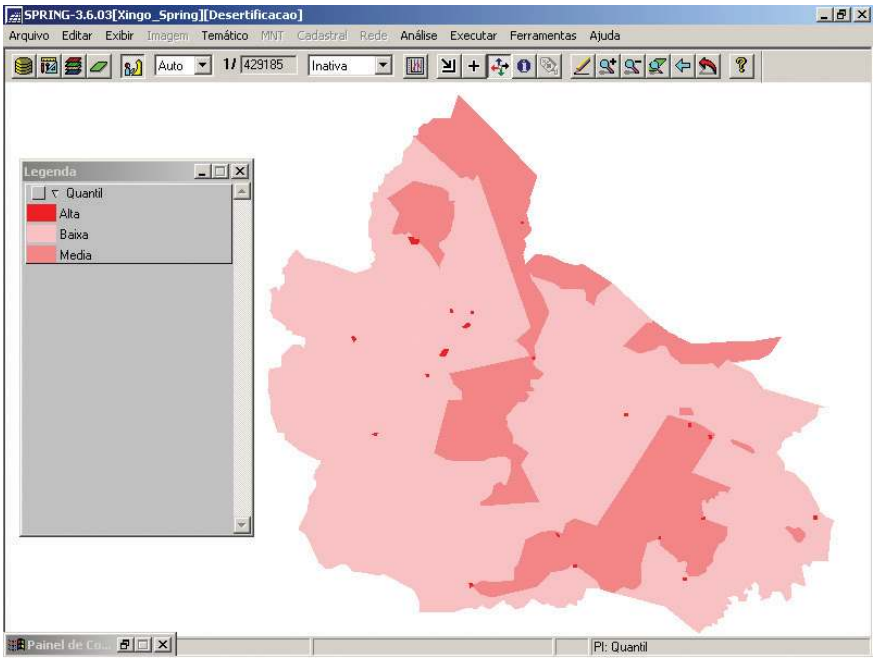
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para complementar a análise, foi desenvolvido um *SIG* a partir dos dados da malha de setores censitários rurais (IBGE, 2003), associados aos dados dos Censos de 1991 e 2001. Objetivou-se, assim, associar mais um importante indicador de degradação ambiental ao processo de análise, neste caso, os dados demográficos, especificamente a densidade

populacional por setor censitário rural (MATALLO, 1999; SAMPAIO; SAMPAIO, 2002).

Segundo Câmara (2000), "a distribuição de eventos cuja localização está associada a áreas (delimitadas por polígonos) não dispõe de sua localização exata, mas sim de um valor agregado por área". Assim, o objetivo da análise será determinar a existência de um padrão espacial nos valores observados. A primeira análise foi realizada agregando os dados por quantis, divididos em três classes, de tal forma que cada classe tenha aproximadamente o mesmo número de valores (***Figura 21***).

Figura 21 – Mapa Temático: Densidade Demográfica em 2000, por quantis e desvio-padrão = 1.

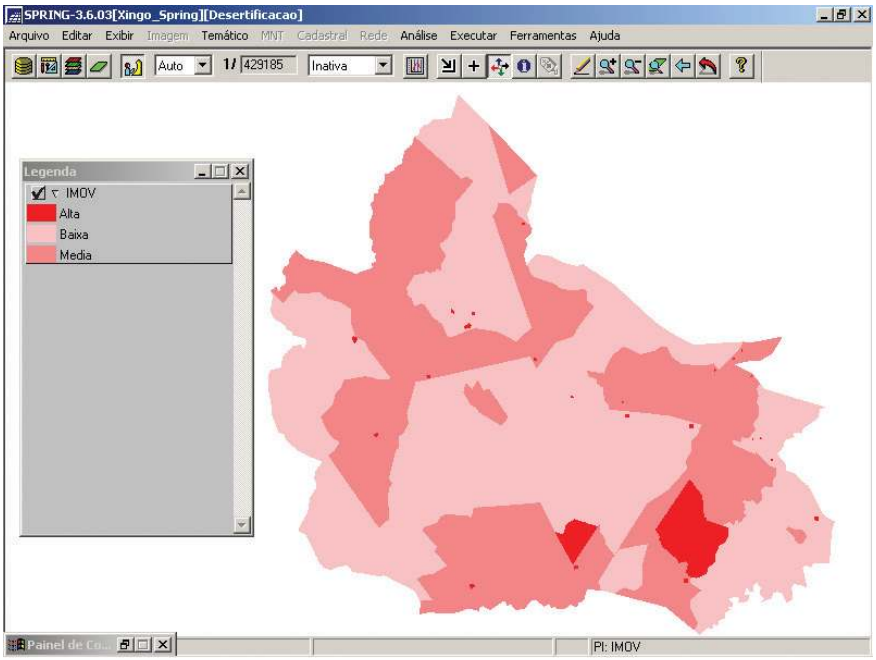


Fonte: Elaborado pelos autores.

Entretanto, uma forma simples e útil de explorar a variação espacial dos dados é calcular a média dos valores dos vizinhos, produzindo uma primeira aproximação da variabilidade espacial, "pois a operação tende a produzir uma superfície menos descontínua que os dados originais" (FONSECA, 2000), sendo os setores censitários rurais influenciados pelo valor de seus vizinhos.

Assim, utilizou-se o método da IMOV, que é uma técnica que explora o valor médio μi do atributo na região de estudo, fornecendo uma visão das grandes tendências do fenômeno em estudo, nesse caso, uma forte densidade populacional em algumas regiões periféricas ao lago da UHE Xingó, caracterizando núcleos de pressão demográfica circundando o local (***Figura 22***).

Figura 22 – Mapa Temático: Densidade Demográfica em 2000, pelo método de Média Móvel, na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Concluindo o processamento dos dados e objetivando inferir um indicador social no estudo sobre as áreas degradadas em Xingó, este mapa temático de densidade populacional por média móvel foi, então, cruzado com o mapa temático da imagem-síntese produzido sobre as classificações supervisionadas das imagens de 1989, 1995 e 2003. Para fazer essa Análise Espacial, que é a síntese deste estudo ao identificar áreas de risco à degradação ambiental, um novo algoritmo em LEGAL foi desenvolvido para esse cruzamento de dados (***Quadro 2***), considerando-se que:

a) Áreas onde, na imagem-síntese das classificações, estão identificadas como "Em processo de desertificação" (ou "Desertificadas") e no

mapa temático de População indica "Alto Crescimento" demográfico no período, ou áreas onde, na imagem-síntese das classificações, estão identificadas como "Em processo de desertificação" e no mapa temático de População indica "Médio Crescimento" demográfico no período, ou eram áreas "Degradadas" e com densidade populacional média, foram consideradas áreas de risco "*Muito Grave*" do ponto de vista da desertificação, e foram assinaladas na cor vermelha;

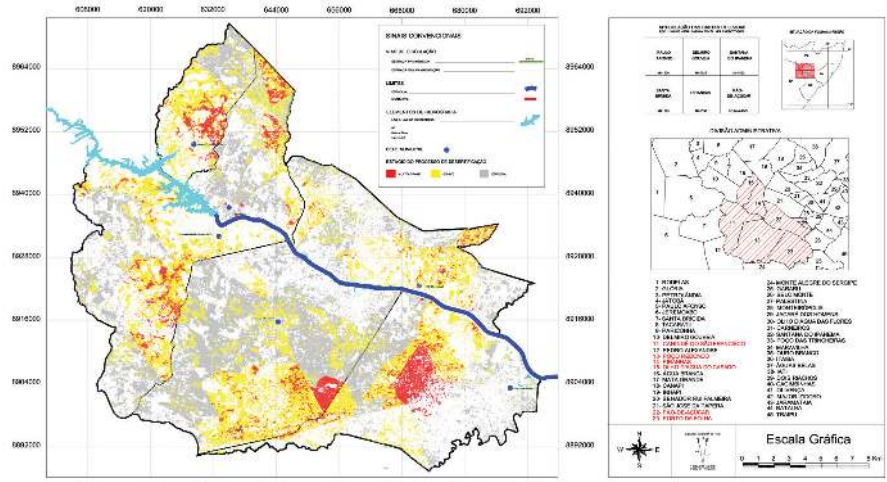
b) Áreas onde, na imagem-síntese das classificações, estão identificadas como "Degradadas" e no mapa temático de População indica médio crescimento demográfico no período, foram consideradas áreas de risco "*Grave*" do ponto de vista da desertificação, e foram assinaladas na cor amarela;

c) Áreas onde, na imagem-síntese das classificações, estão identificadas como "Degradadas" e no mapa temático de População indica baixo crescimento demográfico no período, foram consideradas áreas "*Especiais*", sujeitas a atenção e foram assinaladas na cor cinza claro;

d) Outras áreas com situação estável ou em recuperação foram assinaladas na cor branca.

Por fim, a ***Figura 23*** sintetiza e registra as áreas de risco à degradação ambiental na área de estudo.

Figura 23 – Carta-Imagem das áreas degradadas e suscetíveis à desertificação na Região de Xingó.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 CONCLUSÕES

Considerando os 4.405,29 km² da área de estudo, a análise-síntese mostrou que cerca de 215 km² nos seis municípios mais próximos à UHE Xingó apresentam problemas muito graves com relação à desertificação em janeiro de 2003. No total, cerca de 985,44 km² têm problemas ambientais significativos relacionados à desertificação, ou seja, 22,37% da área de estudo estão relacionados a algum processo de desertificação, necessitando de atenção urgente por parte do Governo e da sociedade.

Convém registrar o aspecto conservador da análise ao considerar, por exemplo, que as áreas consideradas "Gravíssimas" teriam que necessariamente apresentar solo exposto nas imagens de 1989, 1995 e 2003, além de estarem situadas num limiar de alta densidade demográfica para a região. Portanto, não bastou a imagem mais recente (05/01/03) apresentar extensas áreas degradadas, pois se inferiu ao modelo de análise espacial outras variáveis ambientais e demográficas, permitindo à pesquisa científica sobre o tema vislumbrar novas oportunidades de incorporar outros dados que possam ter uma representatividade espacial.

Após o processamento dos dados, constatou-se, no período 1989 - 2003:

- aumento de 91,3% de solo exposto;
- diminuição de áreas agropastoris de 21,2%;
- diminuição de caatinga arbórea de 9,7%;
- diminuição de caatinga arbustiva de 68,7%;
- aumento de áreas urbanas ou antropizadas de 70%.

Observa-se uma forte correlação entre os dados de solo exposto e áreas agropastoris no período estudado: ao aumento de solo exposto, por exemplo, corresponde uma diminuição das áreas agrícolas ou de pastagem. Por outro lado, à diminuição da cobertura vegetal natural da caatinga, observa-se, também, o aumento das áreas de solo exposto na Região de Xingó. De fato, não há uma correlação entre o desmatamento e aumento das áreas agropastoris.

Das classes naturais, a caatinga arbustiva foi a que regrediu em termos de área. Isso se explica, principalmente, pelo seu porte lenhoso e consequente disponibilidade energética para as populações rurais,

além da necessidade de novas áreas agrícolas em substituição àquelas já exauridas por técnicas de cultivo inadequadas ao semiárido ou mesmo pela expansão das fronteiras de pastagens extensivas.

Entretanto, os resultados obtidos na classe de caatinga arbustiva indicam uma possível sobreposição com a classe de pasto-cultivo, devido às semelhantes respostas espectrais dos alvos observados, ou seja, em ambas as classes se tem uma vegetação caracterizada por arbustos e estrato herbáceo, com porte médio de 2 m e diâmetro à altura do peito não ultrapassando 10 cm. Algumas árvores jovens alcançam até 3 m de altura.

Na área, pratica-se a pecuária extensiva de gado bovino, caprino e ovino. Também se pode constatar o corte contínuo e a queima das leiras (galho e folhas da vegetação ruderal), para o preparo do solo e plantio de feijão e milho, no período chuvoso.

Então, conclui-se que para um melhor discernimento entre estas classes um novo sensor com maior resolução espectral precisaria ser avaliado, situação esta não foi considerada no âmbito deste estudo. A verdade terrestre foi avaliada a partir de seis expedições ao campo, em que 52 pontos pré-determinados em gabinete foram atingidos com o uso de receptor GPS, no processo de validação da pesquisa.

As áreas urbanas tiveram uma expressão territorial em 1989, devido principalmente às obras de construção da UHE Xingó. A diminuição verificada em 1995 deve-se à conclusão destas obras e depressão econômica diretamente relacionada. A recuperação das áreas urbanas torna-se evidente na classificação de 2003, com um aumento excepcional de 258% em relação ao ano de 1995. Entretanto, convém observar que a classe como um todo não representa mais que 11% da área total de estudo, evidenciando, mais uma vez, o caráter eminentemente rural desses municípios.

Enfim, o estudo concluiu claramente que o modelo econômico em uso não é sustentável na Região de Xingó. Pelo contrário, exige-se de toda a sociedade uma mudança na forma de pensar e agir sobre o semiárido nordestino e sua viabilidade agroecológica. Muitas experiências, algumas novas e outras nem tanto, têm demonstrado o potencial e a viabilidade geoambiental do semiárido brasileiro, como vem mostrando diversas e recorrentes reportagens na imprensa.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L.; PACHÊCO, A.; COSTA, T.; LOPES, O.; OLIVEIRA, M. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.

ARAÚJO, A.; SANTOS, M.; MEUNIER, I.; RODAL, M. ***Desertificação e Seca***. Recife: Gráfica e Editora do Nordeste Ltda., 2002. p. 63.

ARRAES, F. D. D., ANDRADE, E. M. DE; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude de Orós e suas adjacências. ***Revista Caatinga*** (UFERSA. Impresso), v. 25, p. 119-127, 2012.

BEZERRA, J.M., SILVA, P.C.M., MORAIS, C.T.S.L. Utilização de geotecnologias na determinação de áreas susceptíveis a desertificação no estado do Rio Grande do Norte. ***Revista Brasileira de Geografia Física***, v. 4, n. 3, p. 572-589, 2011.

CÂMARA, G. ***Geoprocessamento: Teoria e Aplicações***. São José dos Campos, SP: INPE, 2000. Disponível em <http://dpi.inpe.br/gilberto/livro>. (Apostila).

COLWELL, R. N. ***Manual of Remote Sensing***. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry, 1983.

CRÓSTA, A***. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto***. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1993. p. 170.

FIGUEIROA, J. M., ARAÚJO, E. L., PAREYN, F. G. C., CUTLER, D. F., GASSON, P., LIMA, K. C., SANTOS, V. F. Variações sazonais na sobrevivência e produção de biomassa de Caesalpinia pyramidalis Tul após o corte raso e implicações para o manejo da espécie. ***Revista Árvore***, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 1041-1049, 2008.

FONSECA, L.; LOPES, E.; YAMAGUCHI, F.; VINHAS, L. ***Processamento Digital de Imagens.*** São José dos Campos, SP: INPE, 2000. (Apostila).

GIULIETTI, A.M., HARLEY, R.M., QUEIROZ, L.P., BARBOSA, M.R.V., BOCAGE NETA, A.L., FIGUEIREDO, M.A. ***Espécies endêmicas da Caatinga***, 2002. p. 103-119.

INPE. ***Tutorial do Spring***. São José dos Campos, SP: INPE, 2001. 305 p. (Apostila).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. ***Censo Demográfico 1991***. Agregado por Setores Censitários – Vol. 2 Região Nordeste. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM.

_____. ***Censo Demográfico 2000***. Agregado por Setor Censitário dos resultados do universo – Vol. 3 Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. 2ª. Edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. 1 CD-ROM.

JENSEN, J.R. ***Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective***. Englewood Cliffs, New Jersey: Pretice-Hall, 1999.

LACERDA, F. F.; JUNIOR, H. D. S.; ASSAD; E. D.; ASSIS, J. M. O.; MOURA, M. S. B. Extremos e variabilidade climática no nordeste brasileiro e em Pernambuco.

In: Galvincio, J. D. (Orga.). ***Mudanças climáticas e impactos ambientais***. EDUFPE: Recife, 2010. p. 1-24.

LOPES, H. L., CANDEIAS, A.L.B., ACCIOLY, L. J. O. Modelagem de parâmetros biofísicos para desenvolvimento de algoritmo para avaliação e espacialização de risco à desertificação. ***Boletim de Ciências Geodésicas***, v. 15, n. 4, p. 652-668, 2009.

LOPES, H. L.; SILVA, B. B.; PACHÊCO, A. P. Distribuição espacial do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo no território de Itaparica, Nordeste do Brasil. RBC. ***Revista Brasileira de Cartografia*** (Online), v. 66, p. 233-244, 2014.

LU, L., LI, X., VEROUSTRAETE, F. 2009. Analyzing the forcing mechanisms for net primary productivity changes in the Heihe River Basin, northwest China***. International Journal of Remote Sensing,*** London, v. 30, n. 3, p.793-816, 2009.

MARENGO, JOSE A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. ***Parcerias estratégicas***, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2010. Acessado no dia: 21 de maio de 2017. Disponível no site: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/329.

MATALLO, H. A. Desertificação no Mundo e no Brasil. In: SCHENKEL, C. S. e MATALLO, H. (org.). ***Desertificação***. Brasília, DF: UNESCO, 1999. p. 9-25.

MATSUSHITA, B.; XU, M.; FUKUSHIMA, T. Characterizing the changes in landscape structure in the Lake Kasumigaura, Japan using a high-quality GIS dataset. ***Ladscape and Urban Planning***, v. 78, p.241-250, 2006.

MOREIRA, M. ***Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação***. 2ª. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 p.

NASCIMENTO, F. C. A.; ARAÚJO, F. R. C. D. Estudo comparativo entre o IVDN e a precipitação na região oeste potiguar. ***Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável***, v. 9, p. 269-274, 2014.

SAMPAIO, E.; SAMPAIO, Y. ***Desertificação***. Recife, PE: Editora Universitária UFPE, 2002. 85 p.

SILVA, J. D; TABARELLI, M.; FONSECA, M. D.; LINS, L. V. ***Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação***. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco. 2004. p. 155.

WU, J., YAOLIN, L., WANG, J. Application of Hyperion data to land degradation mapping in the Hengshan region of China. ***International Journal of Remote Sensing***, v. 31, n. 19, p. 5145-5161, 2010.