

<http://dx.doi.org/10.21707/ga.v10.n04a53>

## SISTEMA DE AVALIAÇÃO ESPACIAL DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RICARDO DA CUNHA CORREIA LIMA<sup>1</sup>, WILSON FADLO CURTI<sup>2</sup>, ANA PAULA SILVA DOS SANTOS<sup>3</sup> &  
TALITA STAEEL PIMENTA DA SILVA COSTA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Pesquisador do Instituto Nacional do Semiárido na área de desertificação. E-mail: ricardo.lima@insa.gov.br

<sup>2</sup> Professor titular da Universidade Federal de Campina Grande (da Unidade Acadêmica de Física, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais)

<sup>3</sup> Pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido na área sócio-ambiental

<sup>4</sup> Pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido na área de desertificação

Recebido em 25 de setembro de 2016. Aceito em 06 de dezembro de 2016. Publicado em 19 de dezembro de 2016.

**RESUMO**— A desertificação é um processo complexo para o qual concorrem fatores de ordem ambiental, social, econômica e institucional. Sua modelagem através de indicadores permanece um desafio para pesquisadores em todo o mundo, em função das múltiplas relações entre a sociedade, o meio ambiente e o desenvolvimento desejado. O presente estudo procurou estruturar um sistema de avaliação da desertificação através de 27 indicadores, sugeridos na literatura relacionada e para os quais foi possível obter dados confiáveis e acessíveis, e organizados segundo o modelo conceitual DPSIR - Força Motriz, Pressão, Estado, Impacto e Resposta. A capacidade dos indicadores descreverem os diversos aspectos da desertificação foi avaliada por um grupo de especialistas de modo a estabelecer um peso para cada um deles. Os indicadores foram calculados e transformados em planos de informação do tipo raster para serem processados através de técnicas de análise de decisão multicritério integradas a sistemas de informações geográficas. Desta maneira, índices multicriteriais de desertificação foram desenvolvidos para cada categoria DPSIR, como instrumentos de avaliação das causas estruturais, causas diretas, susceptibilidade, consequências e respostas da sociedade. Para exemplificar a aplicação da metodologia, um Índice Multicriterial de Desertificação das Pressões (IMD-P) foi calculado para uma porção da região semiárida brasileira, indicando as áreas onde o desmatamento e o manejo inadequado da terra contribuem significativamente para a degradação das terras e, conseqüentemente, para a desertificação.

**PALAVRAS-CHAVE:** INDICADORES. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS. GIS-MCDA. DPSIR.

### SPATIAL EVALUATION SYSTEM OF THE DESERTIFICATION PROCESS IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

**ABSTRACT** – Desertification is a complex process that environmental, social, economic and institutional factors compete. Its modeling through indicators remains a challenge for researchers around the world, due to the multiple relationships between society, environment and desired development. The present study aimed to structure a desertification evaluation system through 27 indicators, which were suggested in the related literature and for which it was possible to obtain reliable and accessible data, and organized according to the conceptual model DPSIR - Driving Force, Pressure, State, Impact and Response. The capacity of the indicators to describe the various aspects of desertification was evaluated by a group of experts to establish a weight for each of them. The indicators were calculated and transformed into raster type information plans to be processed through multicriteria decision analysis techniques integrated to geographic information systems. In this way, multicriteria desertification indexes were developed for each DPSIR category, as instruments for assessing the structural causes, direct causes, susceptibility, consequences and responses of society. To exemplify the application of the methodology, a multicriteria desertification index of pressures was calculated for a portion of the Brazilian semi-arid region, indicating areas where deforestation and inadequate land management contribute significantly to land degradation and, consequently, to desertification.

**KEY WORDS:** INDICATORS. MULTICRITERIA DECISION ANALYSIS. GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. GIS-MCDA. DPSIR.

### SISTEMA DE EVALUACIÓN ESPACIAL DEL PROCESO DE DESERTIFICACIÓN EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA DE BRASIL

**RESUMEN** – La desertificación es un proceso complejo en el que intervienen factores de orden ambiental, social, económico e institucional. Definirlo, encontrar un modelo por medio de indicadores, continúa siendo un desafío para los investigadores de todo el mundo, debido a las innumerables relaciones existentes entre la sociedad, el medio ambiente y el desarrollo deseado. El presente estudio trata de estructurar un sistema de como evaluar la desertificación utilizando 27 indicadores sugeridos en la literatura relacionada, para los cuales fue posible obtener datos confiables y accesibles, y organizados de acuerdo con el modelo conceptual DPSIR – Fuerza Motriz, Presión, Estado, Impacto y Respuesta. Un grupo de especialistas evaluó la capacidad de los indicadores de describir los diversos aspectos de la desertificación para poder establecer un peso para cada uno. Los indicadores fueron calculados

y transformados en planos de información tipo “raster” para procesarlos a través de técnicas de análisis de decisión de múltiples criterios, integradas a sistemas de informaciones geográficas. De esta forma, índices de múltiples criterios fueron desarrollados para cada categoría DPSIR como instrumentos de evaluación de las causas estructurales, causas directas, susceptibilidad, consecuencias y respuestas de la sociedad. Para ejemplificar la aplicación de la metodología, fue calculado un Índice de Múltiples Criterios de Desertificación de las Presiones (IMD-P) en una porción de la región semiárida brasileña, indicando las áreas en las cuales el desmatado y el manejo inadecuado de las tierras contribuyeron significativamente con la degradación de las mismas, y, consecuentemente, con la desertificación.

**PALABRAS CLAVE:** INDICADORES. ANÁLISIS DE DECISIÓN DE MÚLTIPLES CRITERIOS. SISTEMA DE INFORMACIONES GEOGRÁFICAS. GIS-MCDA. DPSIR.

## INTRODUÇÃO

A desertificação é um fenômeno de escala global caracterizado pela degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de vários fatores, incluindo as atividades humanas. A degradação das terras nessas áreas é entendida como a redução ou perda da produtividade biológica ou econômica das terras agrícolas, das pastagens, das florestas e matas nativas, devido aos sistemas inadequados de utilização da terra (NAÇÕES UNIDAS, 1997).

Dentre as causas diretas aceitas pela maioria e citadas na Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação – UNCCD, estão a retirada da vegetação, o sobrecultivo, o sobrepastoreio, a irrigação malconduzida e o manejo inadequado dos recursos florestais e minerais (REGO, 2012). Estas causas físicas fazem parte de uma cadeia de causalidades que se inicia pelo desmatamento e o manejo inadequado do solo, avança para a perda ou redução da produtividade agrícola, provoca a redução da renda auferida da atividade rural e, finalmente, promove a deterioração das condições sociais da população residente e sua provável migração (SAMPAIO *et al.*, 2003).

Sempre na tentativa de caracterizar o processo de desertificação, medir sua extensão e oferecer um mecanismo de apoio à tomada de decisão para seu enfrentamento, diversos estudos apresentaram sistemas de avaliação a partir de um conjunto de indicadores ambientais, sociais, econômicos e institucionais, com definições, formas e periodicidade de medição, organizados por temas, agrupados em impactos potenciais ou reais ou baseados em modelos conceituais do tipo DPSIR – *Driving forces, Pressures, State, Impacts, Responses* (KOSMAS; KIRKBY; GEESON, 1999; SAMPAIO *et al.*, 2003; ABRAHAM; MONTAÑA; TORRES, 2006; ABRAHAM, 2006; REYNOLDS *et al.*, 2011).

Por se tratar de um processo espacialmente distribuído, muitos esforços procuraram integrar a análise dos indicadores a sistemas de informações geográficas de modo a identificar as áreas onde é maior a influência dos diversos fatores, determinar as regiões mais susceptíveis ao processo de desertificação ou propor ações de combate e mitigação de seus efeitos. (LOPES *et al.*, 2009; GRAU *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2010; SEPEHR; ZUCCA, 2012; SÁ *et al.*, 2013).

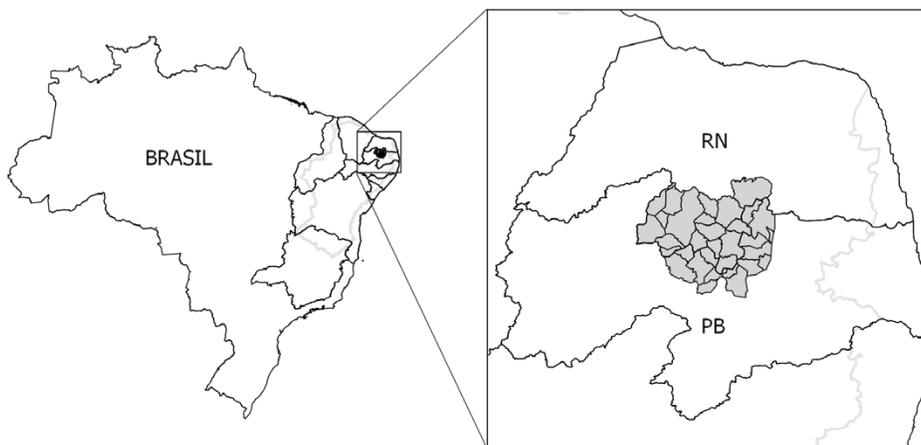
A tarefa de analisar, em conjunto, um grande número de indicadores vem levando pesquisadores a utilizarem análise de decisão multicritério integrada a sistema de informação geográfica (GIS-MCDA) como ferramenta principal de construção de modelos para gestão de recursos hídricos, resíduos urbanos e industriais, florestas, biodiversidade, áreas de proteção permanente e para enfrentamento da desertificação, entre outras iniciativas (NASIRI *et al.*, 2013; SALVATI *et al.*, 2013; FRANCO; HERNANDEZ; MORALES, 2013; MASSEI *et al.*, 2014; HAMADOUCHE *et al.*, 2014; VIERIA *et al.*, 2015).

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo estruturar um sistema de avaliação do processo de desertificação em escala municipal através de técnicas GIS-MCDA, de modo a oferecer aos tomadores de decisão uma ferramenta para cálculo de índices multicriteriais de desertificação das causas estruturais, causas diretas, áreas susceptíveis, consequências, respostas da sociedade e do processo como um todo. A metodologia empregada para concepção do sistema é integralmente apresentada a seguir. No entanto, com o objetivo de detalhar os resultados alcançados no espaço disponível nesta publicação, apenas um índice de desertificação das causas diretas foi calculado e comentado para a região de estudo.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está definida pelas microrregiões geográficas do Seridó Oriental e Ocidental do Rio Grande do Norte e Seridó Oriental e Ocidental da Paraíba (IBGE, 1992), localizada entre as latitudes 6,09°S e 7,19°S e longitudes 37,49°O e 36,22°O, na região Nordeste do Brasil (Figura 1). É composta por 32 municípios, totalizando uma área de 11.186 km<sup>2</sup>, onde vive uma população de 329.536 habitantes distribuída entre urbana (77,4%) e rural (22,6%) (IBGE, 2010). A área de estudo abriga o Núcleo de Desertificação do Seridó (VASCONCELOS SOBRINHO, 1971).

**Figura 1** – Localização da área de estudo

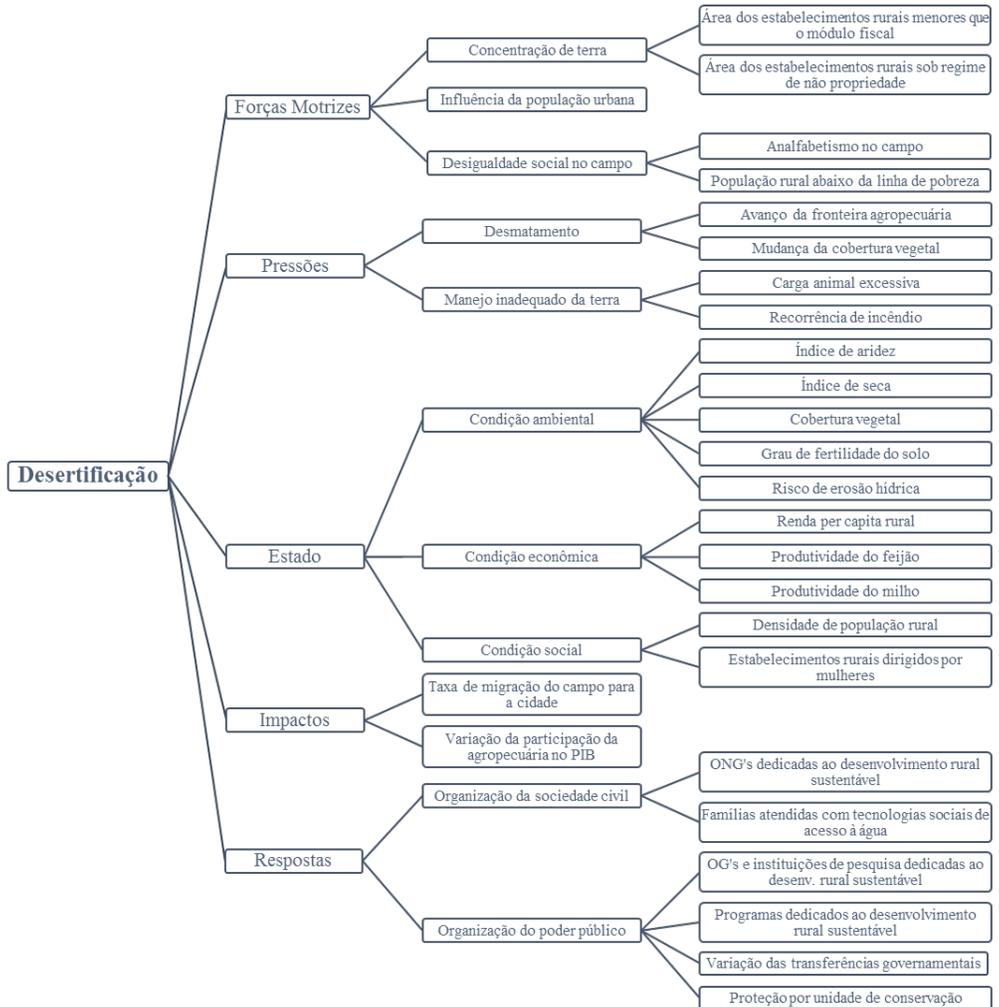


Os materiais utilizados na pesquisa constituem de um conjunto de *softwares* de livre acesso para geoprocessamento e análise multicritério (SPRING 5.4, QGIS 2.14 e GRASS 7.0 com o complemento *r.mcda.promethee*), dados censitários de municípios (IBGE), dados climáticos (índice de aridez, índice de seca), dados institucionais e dados de sensoriamento remoto (imagens Landsat 5/TM e 8/OLI, e focos de fogo do Programa Queimadas - INPE).

O processo de desertificação foi caracterizado por um conjunto de 27 indicadores recomendados em diversos estudos realizados no Brasil e em projetos internacionais dos quais o país tomou parte (SAMPAIO *et al.*, 2003; ABRAHAM, 2006), para os quais foi possível obter dados confiáveis e acessíveis.

Os indicadores foram agrupados nas categorias do modelo DPSIR (EEA, 1999): forças motrizes (causas estruturais), pressões (causas diretas), estado atual (susceptibilidade), impactos (consequências) e respostas (ações da sociedade) e organizados em árvore hierárquica (Figura 2).

**Figura 2 - Organização dos indicadores em árvore hierárquica**



**Fonte:** Elaboração própria, adaptado de Abraham *et al.* (2006) e Sampaio *et al.* (2003)

A atribuição de pesos para cada indicador ou categoria da árvore hierárquica foi obtida com a aplicação de um questionário entre especialistas no tema, no qual foi perguntado a importância relativa de cada indicador/categoria na caracterização de determinado aspecto da desertificação. As respostas foram representadas numa escala numérica de 1 (não caracteriza) a 5 (caracteriza muito bem) e utilizadas para agregação de preferências à priori (MALCZEWSKI, 2015, p.224-

234), através da média aritmética. Os pesos assim obtidos foram normalizados e organizados na árvore hierárquica para cálculo dos índices. A confiabilidade do questionário foi verificada através do coeficiente alfa de Cronbach (CRONBACH, 1951).

As variáveis para cálculo dos indicadores foram obtidas nas bases públicas de dados censitários, repositórios de dados gratuitos obtidos por sensoriamento remoto e pesquisa institucional.

Para o cálculo dos indicadores discretos relativos ao município, tais como “Analfabetismo no campo” e “Densidade de população rural”, as variáveis foram relacionadas à sua população, área ou, ainda, calculadas de forma percentual do valor global para permitir a comparação entre municípios. Estes indicadores foram incorporados à tabela de atributos do arquivo vetorial dos limites municipais e, então, utilizados para geração de mapas raster, nos quais toda a área do município foi representada pelo valor discreto do indicador.

Para cálculo dos indicadores espacialmente distribuídos, a exemplo da “Cobertura Vegetal” e do “Índice de seca”, as variáveis foram expressas na forma de valor do ponto de grade para modelos numéricos, valor do pixel para imagens de sensoriamento remoto por satélite, ou valor do atributo para arquivos vetoriais do tipo temático. Com o objetivo de reduzir o esforço computacional e adequar todos os indicadores àquele de menor escala cartográfica, todos os arquivos raster foram gerados ou reamostrados para 300 m de resolução espacial.

A cobertura vegetal e sua mudança ao longo do tempo foram representadas pelo SAVI - *Soil Adjusted Vegetation Index* (HUETE, 1988). As imagens de satélite para cálculo do SAVI foram selecionadas na janela de tempo correspondente ao final do período chuvoso da região de estudo, momento indicado para reduzir a influência do estrato herbáceo e das pastagens no cálculo do índice de vegetação. A situação atual da vegetação foi mapeada a partir das imagens Landsat 8/OLI, órbita 215, pontos 64 e 65, de 25/07/2015, enquanto que, para a situação existente em 1990, foram empregadas as imagens Landsat 5/TM, de 18/06/1990. A transformação do índice de vegetação em percentual de Cobertura Vegetal (CV) foi efetuada a partir de um pixel de solo exposto (0% CV) e de um pixel correspondente à vegetação densa (100% CV). A mudança de cobertura vegetal, por sua vez, foi estimada através da diferença, em pontos percentuais, entre os valores obtidos para 1990 e 2015.

A influência da população urbana no consumo dos recursos naturais de seu entorno foi representada pelo mapa de estimacão de densidade por Kernel, gerado a partir do centroide da área urbana do município, intensidade equivalente à população urbana e raio de influência igual a 20 km.

A ocorrência de incêndio foi estimada a partir dos focos detectados pelos satélites NOAA, GOES, TERRA, AQUA, METEOSAT, entre outros, nos últimos 10 anos (INPE, 2016), e foi representada pelo mapa de estimacão de densidade por Kernel a partir das coordenadas do ponto de observacão e raio de influência de 2km, tamanho aproximado do maior pixel de registro.

Como indicador climático, o índice de aridez foi obtido a partir dos dados de Costa e Brito (2004), interpolados no software SPRING pela técnica de krigagem (KRIGE, 1951) tipo ordinária, por intermédio de um semivariograma ajustado para o modelo esférico.

A intensidade da seca, fenômeno natural que potencializa o processo de desertificacão, foi medida pelo SPI - *Standard Precipitation Index* (MCKEE *et al.*, 1993), para os 48 meses anteriores a dezembro de 2015, disponível no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do INPE.

O risco de erosão hídrica do solo foi calculado em função da cobertura vegetal, declividade

do terreno e erodibilidade do solo, conforme conclusões de Lima *et al.* (2002), Zhang *et al.* (2010) e Sá *et al.* (2013).

O modelo descritor da desertificação foi, então, implementado utilizando o *software* GRASS 7.0 e seu complemento de análise multicritério espacial *r.mcda.promethee* (MASSEI *et al.*, 2014), para o qual todos os indicadores foram calculados e convertidos em planos de informação normalizados do tipo *raster*, sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000 UTM 24S, resolução espacial 300 m e ajustados para a relação direta (maximização) ou inversa (minimização) com o processo da desertificação, segundo as seguintes equações:

$$\text{indicador}_{nmax} = \frac{\text{indicador} - \text{valor}_{min}}{\text{valor}_{max} - \text{valor}_{min}}, \text{ ou} \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{indicador}_{nmin} = 1 - \frac{\text{indicador} - \text{valor}_{min}}{\text{valor}_{max} - \text{valor}_{min}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\text{indicador}_{nmax}$  é o valor normalizado para o indicador a ser maximizado;

$\text{indicador}_{nmin}$  é o valor normalizado para o indicador a ser minimizado;

$\text{valor}_{min}$  é o valor mínimo do indicador, e

$\text{valor}_{max}$  é o valor máximo do indicador.

A escolha do método de análise multicritério foi baseada nos estudos conduzidos por Cinelli *et al.* (2014), que elencaram os pontos fortes e fracos de cada técnica frente a um conjunto de critérios reconhecidos como capitais por diversos autores que desenvolvem estudos de avaliação de sustentabilidade. Diante nas conclusões alcançadas, o método PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986) foi selecionado para análise dos indicadores.

De forma resumida, trata-se de uma técnica de classificação/subordinação na qual as preferências do decisor são construídas a partir de comparações par a par, quando se verifica qual alternativa é superior em cada critério, estabelecendo-se uma relação de superação. O método define seis possíveis funções de preferência a partir das quais a diferença entre os valores de duas alternativas **a** e **b**, para um determinado critério, é mapeada para o intervalo (0,1). Uma vez calculada a preferência de **a** sobre **b** para todos os critérios e definido um peso para cada critério, um índice de preferência global é calculado pela média ponderada das preferências de **a** sobre **b**. Por fim, são definidos os fluxos de importância positivo  $\Phi^+$  (*leaving flow*) e negativo  $\Phi^-$  (*entering flow*) pelo somatório dos índices de preferência globais de **a** sobre as demais alternativas (o quanto **a** domina as demais) e pelo somatório dos índices de preferência globais das demais alternativas sobre **a** (o quanto **a** é dominada pelas demais), respectivamente. A diferença entre o fluxo de importância positivo e o fluxo de importância negativo é definido como fluxo de importância líquido  $\Phi$  (*net flow*) de **a**. O processo se repete para todas as alternativas.

A aplicação do método PROMETHEE no GRASS, através do complemento *r.mcda.promethee*, foi efetuada por meio da seguinte expressão na interface de usuário:

```
r.mcda.promethee criteria=raster1@mapset [,raster2@mapset,...]
weight=peso1[,peso2,...] positiveflow=fluxo+ negativeflow=fluxo-
```

Considerando cada pixel da área de estudo como uma alternativa e os indicadores de desertificação como critérios de análise, a aplicação do método PROMETHEE permitiu ordenar todos os pixels por grau de severidade da desertificação, apresentando o resultado através de um indicador síntese aqui representado por um mapa *raster* normalizado, correspondente ao fluxo de importância líquido  $\Phi$ .

Os conjuntos de indicadores de cada categoria DPSIR, representados pelos planos de informação do tipo *raster*, foram processados separadamente pelo complemento *r.mcda.promethee*, possibilitando, desta maneira, uma análise espacial da área de estudo sob a ótica individualizada das causas estruturais, das causas diretas, da susceptibilidade, das consequências e, por fim, das respostas da sociedade. Para tanto, o vetor de pesos de cada conjunto de indicadores foi calculado através da média e normalização das respostas dos especialistas ao questionário, de modo que a soma dos pesos dos indicadores de cada categoria DPSIR fosse sempre igual a unidade. Os planos de informação gerados, referentes aos fluxos de importância líquidos de cada conjunto, foram normalizados para o intervalo (0,1), classificados em níveis de severidade muito fraco (0 - 0,2), fraco (0,2 - 0,4), moderado (0,4 - 0,6), forte (0,6 - 0,8) e muito forte (0,8 - 1) e, para fins do presente estudo, passaram a ser denominados de Índices Multicriteriais de Desertificação relativos às categorias DPSIR (IMD-D, IMD-P, IMD-S, IMD-I, IMD-R).

De forma semelhante e para oferecer uma análise integrada de todas as informações sobre o processo de desertificação, foi desenvolvido o Índice Multicriterial de Desertificação (IMD), obtido do processamento simultâneo de todos os indicadores no complemento *r.mcda.promethee*, cujo vetor de pesos foi calculado da mesma forma citada anteriormente, de modo que a soma de todos os pesos fosse igual a unidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O questionário de avaliação dos indicadores foi encaminhado para 89 especialistas, com taxa de retorno de 36%. Dentre os entrevistados, geógrafos, agrônomos, engenheiros ambientais e florestais formaram o grupo majoritário. Profissionais de outras áreas de formação também atenderam ao convite: zootecnista, sociólogo, assistente social, educador, meteorologista, entre outros. Quanto à atuação profissional, o perfil dos entrevistados é composto principalmente por pesquisadores (75%), professores (34%), gestores públicos e privados (25%) e assessores técnicos (16%). A confiabilidade do questionário foi avaliada pelo coeficiente alfa de Cronbach, que atingiu o valor de 0.94.

Os pesos foram calculados a partir das respostas do questionário, normalizados e atribuídos aos indicadores para fins da análise de decisão multicritério (Quadro 1).

**Quadro 1** - Pesos atribuídos aos indicadores para análise multicritério

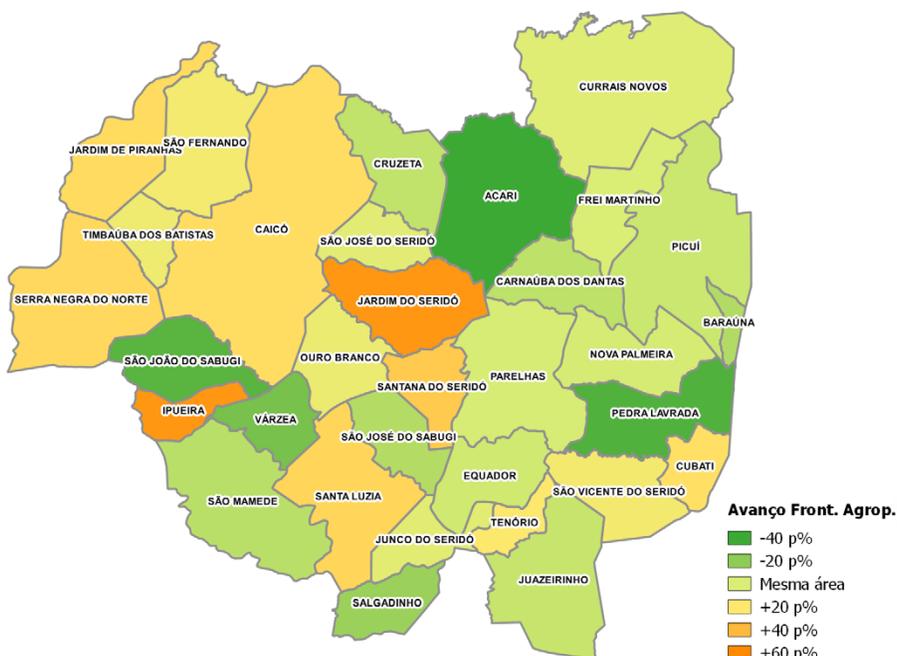
Modelo DPSIR	Indicador	Pesos DPSIR	Pesos
Força Motriz	Área dos estabelecimentos rurais menores que o módulo fiscal	0,167	0,033
	Área dos estabelecimentos rurais sob regime de não propriedade	0,167	0,033
	Influência da população urbana	0,324	0,063
	Analfabetismo	0,159	0,031
	População abaixo da linha de pobreza	0,184	0,036
	Soma	1,000	-
Pressão	Avanço da fronteira agropecuária	0,226	0,053
	Mudança na cobertura vegetal	0,263	0,061
	Carga animal	0,259	0,060
	Recorrência de incêndio	0,252	0,059
	Soma	1,000	-
Estado	Índice de aridez	0,078	0,016
	Índice padronizado de precipitação	0,074	0,016
	Cobertura vegetal	0,084	0,018
	Grau de fertilidade do solo	0,072	0,015
	Risco de erosão hídrica do solo	0,080	0,017
	Renda per capita rural	0,126	0,027
	Produtividade do feijão	0,093	0,020
	Produtividade do milho	0,093	0,020
	Densidade de população rural	0,178	0,038
	Estabelecimentos rurais dirigidos por mulheres	0,124	0,026
	Soma	1,000	-
Impacto	Taxa de migração do campo para a cidade	0,470	0,089
	Varição da participação da agropecuária no PIB	0,530	0,101
	Soma	1,000	-
Resposta	Organismos governamentais e instituições de pesquisa dedicadas ao desenvolvimento rural sustentável	0,120	0,020
	Programas dedicados ao desenvolvimento rural sustentável	0,133	0,023
	Programas de transferência de renda	0,113	0,019
	Nível de proteção por unidade de conservação.	0,127	0,021
	Organizações não-governamentais dedicadas ao desenvolvimento rural sustentável, por 1000 habitantes rurais	0,250	0,042
	Famílias atendidas com tecnologias sociais de acesso à água	0,257	0,043
	Soma	1,000	-
	Soma	-	1,000

Para exemplificar a aplicação da metodologia proposta, o IMD-P – Índice Multicriterial de Desertificação das Pressões foi calculado a partir dos pesos listados no Quadro 1 e dos indicadores apresentados a seguir.

### *Avanço da fronteira agropecuária*

A utilização de áreas de vegetação nativa para fins agropecuários aumenta a pressão sobre os recursos naturais e a biodiversidade, favorecendo o processo de desertificação. O avanço da fronteira agropecuária foi obtido pela comparação entre as áreas utilizadas pela atividade agropecuária entre os anos de 1995 e 2006, últimos censos disponíveis (Figura 3). Para os municípios inexistentes em 1995, Baraúna e Tenório, foram atribuídos os mesmos percentuais de área utilizada para a agropecuária referentes aos municípios dos quais se desmembraram, Picuí e Juazeirinho, respectivamente.

**Figura 3** – Avanço da fronteira agropecuária



**Fonte dos dados:** IBGE, Censo Agropecuário 2006 e 1995

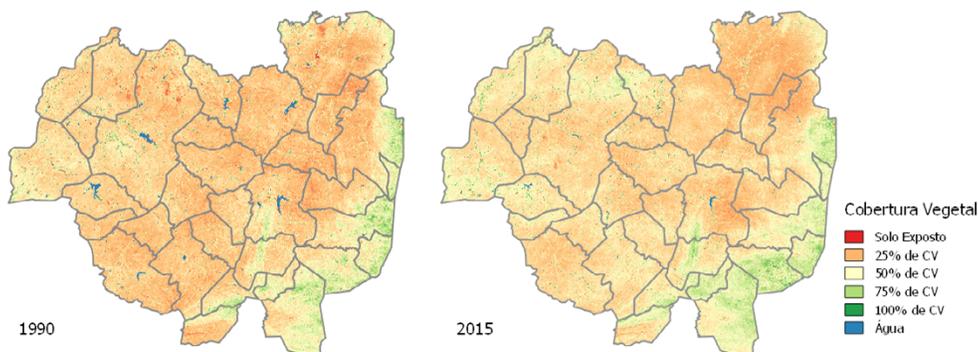
Observa-se que, sob a ótica desse indicador, a pressão para a desertificação é menor nos municípios de Acari, Pedra Lavrada, São João do Sabugi e Várzea, onde houve recuo da fronteira agropecuária, atingindo redução acima de 40 pontos percentuais na área ocupada. No sentido contrário, houve expressivo acréscimo em Santana do Seridó, Jardim do Seridó e Ipueira, municípios onde essa causa direta da desertificação se manifestou de maneira mais intensa, alcançando aumento de 54 pontos percentuais na área de agricultura e pastagem.

Como indicador diretamente relacionado à desertificação, seus valores foram ajustados ao cálculo do IMD-P através da Equação 1 de maximização.

#### *Mudança na cobertura vegetal*

A presença de cobertura vegetal permanente (culturas permanentes, vegetação arbustiva e arbórea nativa ou exótica) protege o solo contra a erosão hídrica e conserva a diversidade biológica, tornando a área menos propensa à desertificação. A mudança na cobertura vegetal ao longo de certo período indica se a pressão exercida pelo desmatamento é maior ou menor que a capacidade de regeneração natural do bioma. Para cálculo da mudança, foi efetuada a diferença entre o indicador de cobertura vegetal para 2015 - **CV2015**, como descritor da situação atual, e o indicador de cobertura vegetal para 1990 - **CV1990**, 25 anos atrás, ambos obtidos através do cálculo do índice de vegetação SAVI a partir de imagens de satélite colhidas no final da estação chuvosa da região de estudo (Figura 4).

**Figura 4** – Cobertura vegetal no ano 1990 e 2015



**Fonte dos dados:** USGS, Imagem de satélite Landsat 5/TM, 18/06/1990 e Landsat 8/OLI, 25/07/2015

Nota-se que as áreas com melhor cobertura vegetal em 2015 restringem-se à região do planalto da Borborema, às serras potiguaras e ao vale do rio Açu. Nas demais áreas, o percentual de cobertura vegetal não ultrapassa 50%, indicando alto risco de desertificação, sob a ótica desse indicador. Em 1990, a situação da cobertura vegetal se mostrava ligeiramente inferior a 2015, com as áreas melhor protegidas restritas às partes mais altas do Planalto da Borborema. Na demais regiões, predominava uma baixa cobertura vegetal, inferior a 25% em grande parte da Depressão Sertaneja e a sotavento do Planalto da Borborema.

De posse dos índices normalizados na forma de percentuais de cobertura vegetal, foi calculada a diferença entre o ano 2015 e o ano 1990, resultando no indicador **CV15-90** (Figura 5).

**Figura 5 –** Mudança na cobertura vegetal

**Fonte dos dados:** USGS, Imagens de satélite Landsat 8/OLI e Landsat 5/TM

As áreas representadas na cor verde indicam melhoria na cobertura vegetal ao longo do período de 25 anos, com mudanças positivas no percentual de cobertura de até 60 pontos percentuais, concentradas no leste de São Fernando, centro-norte de Caicó e Cruzeta, sul de Carnaúba dos Dantas, centro de Picuí e norte de São Vicente do Seridó, entre outras áreas. Na direção oposta, as áreas ilustradas nas cores avermelhadas indicam as maiores perdas de vegetação no período, com redução do percentual de cobertura vegetal de até 40 pontos percentuais, especialmente no centro-oeste de Caicó, centro de Parelhas, oeste de Nova Palmeira e Pedra Lavrada, norte de Picuí e Frei Martinho e grande parte de Currais Novos. À luz do presente indicador, especial atenção deve ser dada a estas regiões, pois o desmatamento, como elemento de pressão do processo de desertificação, mostrou-se mais intenso que a capacidade de regeneração natural do bioma.

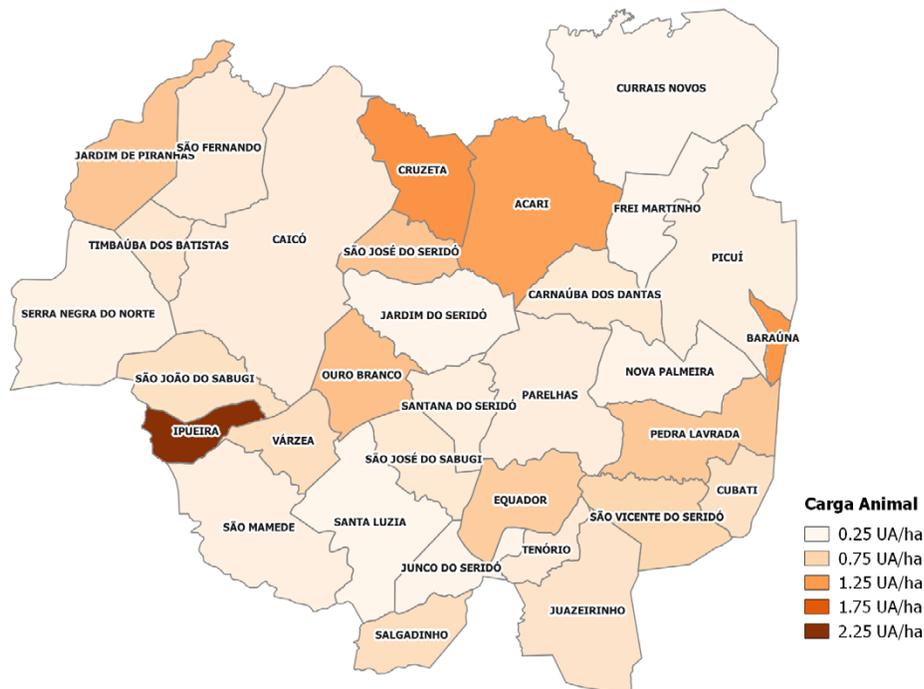
Para utilização do indicador no cálculo do IMD-P, seu valor foi normalizado através da Equação 2 de minimização.

#### *Carga animal*

O excesso de animais degrada a pastagem, compacta o solo e contribui para a degradação das terras. Por esta razão, o sobrepastoreio, como causa direta da desertificação por manejo inadequado da terra, foi representado pela quantidade de unidades animal por área de pastagem

nativa e plantada. A quantidade de cabeças de gado bovino, caprino e ovino, os mais representativos na área de estudo, foi convertida em unidades animal, totalizada por município e relacionada à área de pastagem (Figura 6).

**Figura 6 – Carga animal**

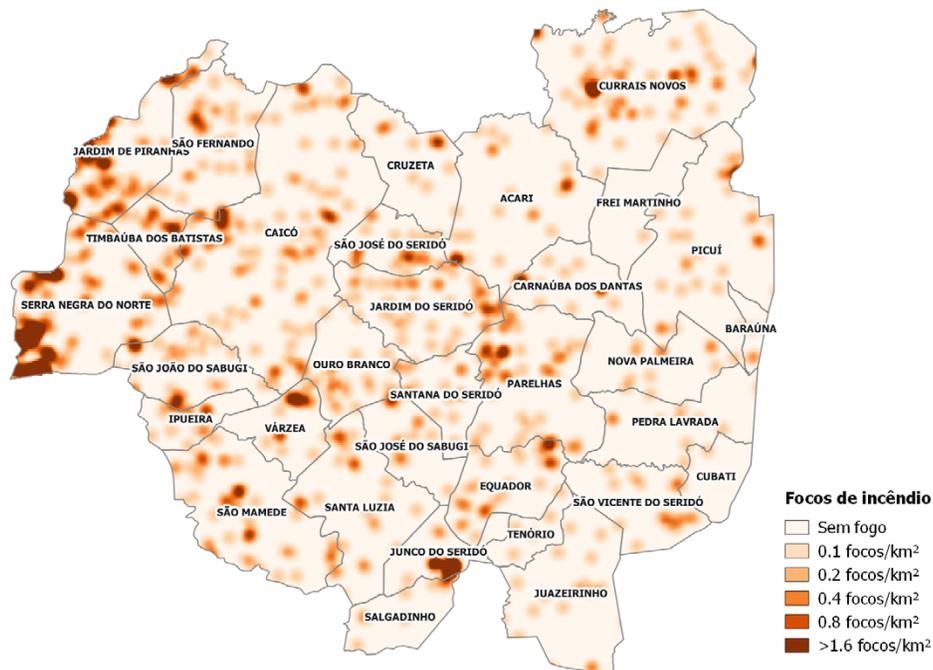


**Fonte dos dados:** IBGE, Censo Agropecuário 2006

Considerando a capacidade de suporte média de 0,1 UA/ha das áreas de pasto nativo na Caatinga (GIULIETTI *et al.*, 2004), a pressão do sobrepastoreio vem degradando as terras em toda a região de estudo, com excessos expressivos nos municípios de Ipueira, Cruzeta, Acari e Baraúna, com valores acima de 1,25 UA/ha. Para uso no cálculo do IMD-P, o indicador foi normalizado e ajustado para a relação de maximização através da Equação 1.

#### *Ocorrência de incêndio*

A prática do uso do fogo na preparação da terra para o plantio e os incêndios florestais aceleram o processo de desertificação ao reduzir a cobertura vegetal de proteção do solo e a diversidade biológica do ambiente. O indicador foi representado pelo mapa de densidade de Kernel, calculado a partir dos focos de incêndio na região, para um período 10 anos (Figura 7).

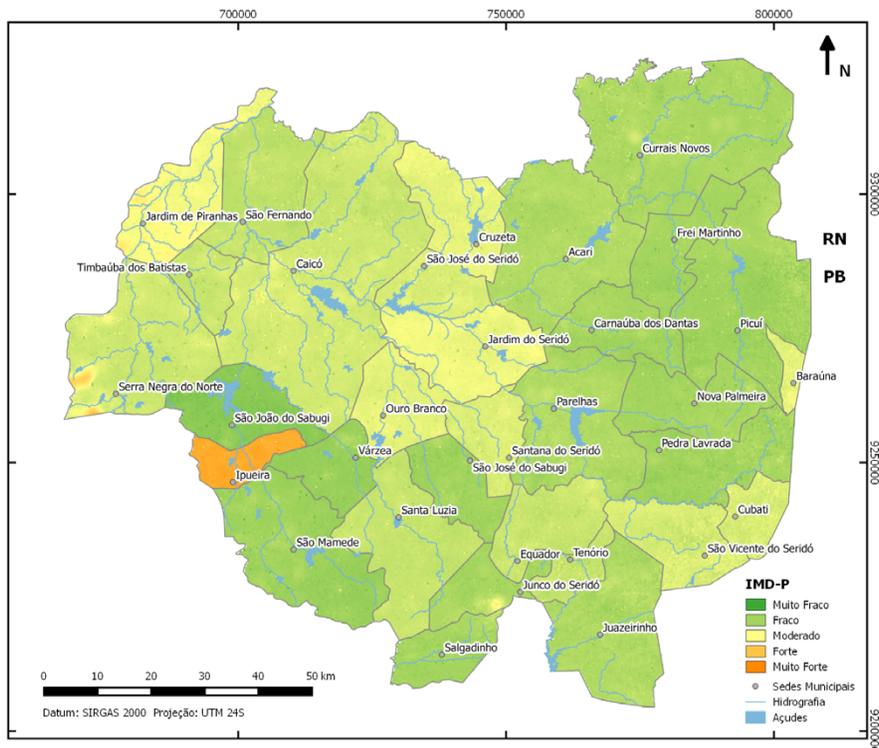
**Figura 7** – Recorrência de incêndio

**Fonte dos dados:** INPE, Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios

Observa-se que a prática do uso do fogo ou a ocorrência de incêndios florestais é generalizada, sendo mais frequente nos municípios de Serra Negra do Norte, Jardim de Piranhas, Junco do Seridó e Timbaúba dos Batistas. A depender deste indicador, a pressão para desertificação na área de estudo é bastante diversa e espacialmente distribuída. Para o cálculo do IMD-P, o indicador foi normalizado pela Equação 1 de maximização.

#### *Índice Multicriterial de Desertificação das Pressões*

Uma vez definidos os pesos e cada indicador normalizado e ajustado para a relação direta ou inversa com a desertificação, os fluxos de importância positivo  $\Phi^+$  e negativo  $\Phi^-$  foram calculados através do complemento `r.mcda.promethee`. Para alcançar a classificação total dos pixels que compõem a área de estudo, e assim ordená-los por nível de intensidade das causas diretas do processo de desertificação, o fluxo de importância líquido  $\Phi$  foi calculado e normalizado para o intervalo (0,1), passando a ser denominado de Índice Multicriterial de Desertificação das Pressões. Seus maiores valores indicam as áreas onde o desmatamento e o uso inadequado do solo pressionam o ambiente em direção à degradação das terras e, conseqüentemente, à desertificação (Figura 8).

**Figura 8** – Índice Multicriterial de Desertificação das Pressões (IMD-P)

**Fonte:** Elaboração própria

Nota-se que o índice varia significativamente entre municípios vizinhos, em razão da utilização dos indicadores discretos obtidos do censo agropecuário, para os quais toda a área do município foi uniformemente representada por seu valor. Trata-se de uma simplificação necessária da realidade visto que a dinâmica espacial desses indicadores foi desprezada no momento da agregação dos dados pelo órgão censitário.

Em virtude do IMD-P ser constituído por apenas quatro indicadores, ainda foi possível efetuar sua análise a partir das influências individuais de cada um deles. Por exemplo, é nítida sua alteração nas regiões com alta densidade de focos de incêndio, a exemplo do sudoeste de Serra Negra do Norte, sul de Junco do Seridó e centro-oeste de Currais Novos. Nestas regiões, a intensidade das pressões para desertificação salta para uma ou duas categorias acima daquela registrada para o município em virtude dessa prática inadequada de manejo da terra. Outra situação bastante clara ocorre em Ipueira, município que registra o maior avanço da fronteira agropecuária e também a maior densidade animal, dois indicadores diretamente relacionados à desertificação e que elevam o índice ao seu valor máximo.

Observa-se, também, variações na intensidade do índice no interior do município, indicando a influência do quarto indicador: a mudança na cobertura vegetal. Pouco perceptíveis na escala da Figura 8, as áreas com alterações positivas do índice indicam a existência de processos de

desmatamento mais intensos que a capacidade natural de recuperação do bioma. Por fim, nas demais regiões, o índice reflete diferentes combinações dos indicadores, ora revelando maior intensidade das causas diretas, ora o seu oposto.

A escolha do modelo conceitual DPSIR, para organização dos indicadores e cálculo dos índices multicritérios, possibilitou uma avaliação da desertificação a partir de suas relações de causa e efeito, e não apenas a partir da análise do risco, propensão ou susceptibilidade à ocorrência do fenômeno. Como outro exemplo de aplicação da metodologia, um índice multicritério de desertificação das forças motrizes, que tem como indicadores a concentração de terra, a desigualdade social e a cultura do consumo, permitirá identificar as áreas onde as causas estruturais da desertificação se manifestam com maior intensidade, possibilitando uma reação da sociedade através de políticas públicas para reforma agrária, combate à pobreza, melhoria da educação, entre outras.

Os índices multicritérios propostos foram calculados a partir dos reais valores observados de cada indicador e não a partir de uma interpretação ou pontuação definida subjetivamente. A primeira abordagem preserva a natureza quantitativa dos indicadores, que podem ter sua representatividade ajustada por pesos atribuídos por especialistas, enquanto que a segunda abordagem exige uma classificação a priori dos indicadores para que, através da atribuição de conceitos para cada categoria, o índice possa ser representado (KOSMAS; KIRKBY; GEESON, 1999; ZHANG *et al.*, 2010; SÁ *et al.*, 2013; VIEIRA *et al.*, 2015).

A abordagem utilizada, de classificação e subordinação de alternativas, na qual as preferências dos decisores são construídas a partir da comparação par a par, quando se verifica qual alternativa é superior em cada critério, tornou o cálculo do índice robusto aos indesejáveis efeitos de compensação intercritérios. Abordagens por média aritmética, ponderada ou mesmo geométrica (KOSMAS; KIRKBY; GEESON, 1999; VIEIRA *et al.*, 2015) homogeneizam os resultados, mascarando aspectos importantes que deveriam ser considerados.

## CONCLUSÕES

Utilizando técnicas de análise de decisão multicritério integradas a sistemas de informações geográficas, foi possível estruturar um sistema de avaliação da desertificação que permitisse uma análise conjunta dos indicadores, preservando a natureza espacial e numérica da informação. A opção por organizar os indicadores através do modelo conceitual DPSIR permitiu, também, representar as relações de causa e efeito do processo de modo a subsidiar gestores na definição de políticas públicas de combate à desertificação e mitigação de seus efeitos.

A aplicação da metodologia numa área do semiárido brasileiro, através do cálculo do IMD-P, possibilitou avaliar de que maneira as pressões sobre o meio ambiente atuam na área em direção à degradação das terras. Os indicadores de desmatamento, representados pela variação da cobertura vegetal e pela variação da área utilizada pela atividade agropecuária, e de manejo inadequado da terra, representados pelo excesso de animais na pastagem e pela utilização do fogo, atenderam satisfatoriamente às condições de descritores do problema: mensurabilidade, acessibilidade, relevância, facilidade de interpretação, credibilidade, aceitabilidade e existência de séries históricas.

Como espaço para pesquisas futuras, o único aspecto subjetivo da proposta, representado pela definição de pesos através da opinião de especialistas, pode ser objeto de melhorias. É possível utilizar a técnica de purificação de escala prevista na análise de confiabilidade pelo Coeficiente alfa de Cronbach, quando é simulada a eliminação ou substituição de perguntas, com a finalidade de verificar quais questões estão prejudicando a confiabilidade do questionário. Adicionalmente, ao invés de utilizar a média como aproximação da opinião de consenso, técnicas de resolução de conflitos também podem ser aplicadas para agregação das preferências. Ainda como alternativa, oficinas de trabalho ou estudos mais aprofundados com a participação de especialistas poderiam emprestar maior adequação aos pesos atribuídos aos indicadores.

## REFERÊNCIAS

- Abraham, E. M. 2006. Indicadores de desertificación para Argentina, Bolívia, Brasil, Chile y Perú. In Abraham, E. M., Beekman, G. B. **Indicadores de la desertificación para América del Sur**. Mendoza, IICA, p.189-207.
- Abraham, E. M.; Montaña, E.; Torres, L. 2006. Procedimiento y marco metodológico para la obtención de indicadores de desertificación en forma participativa. In Abraham, E. M., Beekman, G. B. **Indicadores de la desertificación para América del Sur**. Mendoza, IICA, p.37-64.
- Brans, J. P.; Vincke, P.; Mareschal, B. 1986. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v.24, p.228-238.
- Cinelli, M., Coles, S.R., Kirwan, K. 2014. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, v.46, p.138-148.
- Cronbach, J. L. 1951. Coefficient alpha and the internal structure of tests. **Psychometrika**, v. 16. n. 3, p. 297-334.
- EEA - European Environment Agency. 1999. **Environmental indicators: Typology and overview**. Copenhagen, 19p.
- Franco, R. A. M.; Hernandez, F. B. T.; Moraes, J. F. L. 2013. O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 16, 2013, Anais... INPE, p.3366-3373.
- Giulietti, A. M., Bocage Neta, A. L., Castro, A. A. J. F. 2004. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma da caatinga. In: **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. MMA-UFPE, Brasília, DF, p.47-90.
- Grau, J. B., Anton, J. M., Tarquis, A. M., Colombo, F., Rios, L., Cisneros, J. M. 2010. Mathematical model to select the optimal alternative for an integral plan to desertification and erosion control for the Chaco Area in Salta Province (Argentina). **Biogeosciences Discussions**, v.7, p.2601–2630.
- Hamadouche, M.A.; Mederbal, K.; Kouri, L.; Regagba, Z.; Fekir, Y.; Anteur, D. 2014. GIS-based multicriteria analysis: an approach to select priority areas for preservation in the Ahaggar National Park, Algeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n.2, p.419-434.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25, p.295-309.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/>, acesso em 25/10/2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1995. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/>, acesso em 25/10/2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. **Censo demográfico**. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/>, acesso em 25/10/2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992. **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões**. Rio de Janeiro, v.2, n.2, 302 p.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2016. **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios**. Disponível em <http://www.inpe.br/queimadas>. Acesso em: 16/03/2016.

Kosmas, C., Kirkby, M., Geeson, N. 1999. **Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification**. European Commission, 87p.

Krige, D.G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afr.**, v. 52, p. 119-139.

Lima, A. A. C.; Oliveira, F. N. S.; Aquino, A. R. L. de. 2002. **Limitações do uso dos solos do Estado do Ceará por suscetibilidade à erosão**. Documentos, n. 54, Embrapa Agroindústria Tropical, 19p.

Lopes, H. L.; Candeias, A. L. B.; Accioly, L. J. O.; Sobral, M. C. 2009. Modelagem de parâmetros biofísicos para desenvolvimento de algoritmo para avaliação e espacialização de risco a desertificação. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 15, n. 4, p. 652-668.

Malczewski, J.; Rinner, C. 2015. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. Springer, 331p.

Massei, G.; Rocchi, L.; Paolotti, L.; Greco, S.; Boggia, A. 2014. Decision Support Systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture. **Journal of Environmental Management**, v.146, p.491-504.

Mckee, T. B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: **Eighth Conference on Applied Climatology**, Anaheim, California.

Nações Unidas. 1997. **Convenção das Nações Unidas de combate à desertificação** nos países afetados por seca grave e/ou desertificação, particularmente na África. Brasília: MMA.

Nasiri, H.; Bolorani, A.D.; Sabokbar, H.A.F.; Jafari, H.R.; Hamzeh, M.; Rafii, Y. 2013. Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabayan Basin, Iran). **Environmental Monitoring and Assessment**, v.185, n. 1, p.707-718.

Rêgo, A. H. 2012. **Os sertões e os desertos: o combate à desertificação**. Brasília, FUNAG, 204p.

Reynolds, J. F.; Grainger, A.; Stafford Smith, D. M.; Bastin, G.; Garcia-Barrios, L.; Fernandez, R. J.; Janssen, M. A.; Jürgens, N.; Scholes, R. J.; Veldkamp, A.; Verstraete, M. M.; Von Maltitz, G.;

- Zdruli, P. 2011. Scientific concepts for an integrated analysis of desertification. **Land Degradation and Development**, v.22, p.166-183.
- Sá, I. B.; Cunha, T. J. F.; Taura, T. A.; Drumond, M. A. 2013. Mapeamento da desertificação do semiárido paraibano com base na sua cobertura vegetal e classes de solos. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 16, 2013, Anais... INPE, p.3112-3118.
- Salvati, L.; Mancino, G.; De Zuliane, E.; Sateriano, A.; Zitte, M.; Ferrara, A. 2013. An expert system to evaluate environmental sensitivity: a local scale approach to desertification risk. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 11, n. 4, p.611-627.
- Sampaio E.V.B.; Sampaio, Y.; Vital, T.; Araújo, S. B.; Sampaio, G. R. 2003. **Desertificação no Brasil: Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência**. Recife, Ed. Universitária da UFPE, 202 p.
- Sepehr, A.; Zucca, C. 2012. Ranking desertification indicators using TOPSIS algorithm. **Natural Hazards**, v.62, p.1137-1153.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F. 2011. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, p. 300-309.
- Vasconcelos Sobrinho, J. 1971. Núcleos de Desertificação no Polígono das Secas. In: **ICB**, 1971. Anais...Recife: Universidade Federal de Pernambuco, p. 69- 73.
- Vieira, R. M. S. P.; Tomasella, J.; Alvalá, R. C. S.; Sestini, M. F.; Affonso, A. G.; Rodriguez, D. A.; Barbosa, A. A.; Cunha, A. P. M. A.; Valles, G. F.; Crepani, E.; De Oliveira, S. B. P.; De Souza, M. S. B.; Calil, P. M.; De Carvalho, M. A.; Valeriano, D. M.; Campello, F. C. B.; Santana, M. O. 2015. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347-360.
- Zhang, X, Wu, B., Ling F., Zeng, Y., Yan, N., Yuan, C. 2010. Identification of priority areas for controlling soil erosion. **Catena**, v. 83, n.1, p. 76-86.