



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 2 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n2ID33877>



Análise Espacial Integrada da Degradação da Terra no Submédio São Francisco, Brasil

Integrated Spatial Analysis of Land Degradation in Submedium São Francisco Basin, Brazil

Ana Catarina das Neves Alves¹; Jocilene Dantas Barros²; Gustavo Felipe Balué Arcoverde³; Jean Pierre Henry Balbaud Ometto⁴

¹ FATEC Jacareí, Jacareí/SP, Brazil. Email: anacnevesalves@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5395-7151>

² INPE, LADIS/DIIAV/INPE, São José dos Campos/SP, Brazil. Email: jocilene.barros@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7869-7424>

³ INPE, LADIS/DIIAV/INPE, São José dos Campos/SP, Brazil. Email: gustavo.arcoverde@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0082-5710>

⁴ INPE, DIIAV/INPE, São José dos Campos/SP, Brazil. Email: jean.ometto@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-1039>

Resumo: A bacia do submédio São Francisco detém uma das maiores concentrações de degradação da terra no Semiárido. O estudo analisou a degradação da terra nesta bacia por meio de índices segundo o modelo FPEIR (Força-Pressão-Estado-Impacto-Resposta). Para seleção dos 17 indicadores foi feita revisão bibliográfica e análise de correlação, os indicadores foram gerados em grades de 5 x 5 km no SIG QGIS através de dados secundários e primários. Foi feito um tratamento para exclusão de *outliers*, seguido de normalização dos indicadores. Foram gerados índices para cada componente FPEIR por meio da mediana dos indicadores e elaborados mapas dos indicadores e índices. As áreas mais vulneráveis à degradação (maiores valores nos índices FPEI) localizam-se principalmente nas regiões noroeste, centro e sudeste da bacia. Em relação à resposta (maiores valores no índice R), destacam-se as áreas a oeste, noroeste e sudeste da bacia. Os indicadores que mais influenciaram os índices FPEI foram Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, estabelecimentos com produtor ocupante, desmatamento, erodibilidade, índice de aridez e pastagens degradadas. E no caso do índice de Resposta, a orientação técnica e programas de crédito. As políticas públicas e iniciativas particulares de restauração da qualidade ambiental são fundamentais para reverter o processo de degradação, contribuindo para o manejo sustentável da Caatinga.

Palavras-chave: Indicadores; FPEIR; Degradação da terra.

Abstract: The São Francisco river Submiddle basin holds one of the highest concentrations of land degradation in the Brazilian Semi-arid region. The study analyzed land degradation in this basin using indices based on the DPSIR framework (Driver-Pressure-State-Impact-Response). Seventeen indicators were selected through a literature review and correlation analysis. These indicators were generated in 5 x 5 km cell grids using QGIS GIS software based on secondary and primary sources data. Outliers were removed, and the indicators were normalized. Indices for each DPSIR component were created by calculating the median of the indicators, and maps of the indicators and indices were developed. The areas most vulnerable to degradation (highest values in the DPSI indices) are primarily located in the northwest, central, and southeast regions of the basin. Regarding the response component (highest values in the R index), the western, northwest, and southeast areas of the basin stand out. The indicators that most influenced the DPSI indices were Municipal Human Development Index, establishments with occupant producer, deforestation, erodibility, aridity index, and degraded pastures. In the case of the Response index, technical guidance and credit programs played a significant role. Public policies and private initiatives for restoring environmental quality are crucial to reversing the degradation process and contributing to the sustainable management of the Caatinga.

Keywords: Indicators; DPSIR framework; Land Degradation.

Recebido: 10/09/2023; Aceito: 14/11/2023; Publicado: 16/12/2023.

1. Introdução

A degradação da terra é um fenômeno complexo que afeta cerca de 3,2 bilhões de pessoas em todas as partes do mundo (IPBES, 2018) e para ser compreendida em sua totalidade necessita de uma análise integrada que considere questões sociais, econômicas e ambientais. A degradação da terra é definida pela UNCCD (2017) como a redução ou a perda da função biológica ou econômica da terra, seja em áreas de cultivo, pastagem e ambientes de cobertura natural.

A bacia do Submédio São Francisco está totalmente inserida no bioma Caatinga, um bioma inteiramente brasileiro (LEAL *et al.*, 2005). Há grande interesse em estudos neste local por ser um local propício para agricultura (VANDERLEI; QUADROS; SÁ, 2020), sendo também alvo de exploração do solo para pastagens (MEDEIROS *et al.*, 2018), mas sobretudo porque detém grandes áreas em processo de desertificação - degradação em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas - sendo uma das principais no Semiárido e na Caatinga (CGEE, 2016; UNCCD, 1994). Bezerra *et al.* (2020), a partir de análise de índice de vegetação, observaram que 4% da região semiárida nordestina, que envolve boa parte do bioma Caatinga, possui áreas fortemente degradadas. No que diz respeito a qualidade das pastagens, Santos *et al.* (2022) mostram que 26,7% das pastagens brasileiras estão severamente degradadas, enquanto na Caatinga as pastagens severamente degradadas correspondem a 20,4% (MAPBIOMAS, 2018).

A degradação da terra na Caatinga é produto de retroalimentações positivas e contínuas de fatores antrópicos e biofísicos (PEREZ-MARIN *et al.*, 2022), sendo o fator antrópico de manejo da terra inadequado e a expansão de agricultura intensiva os principais fatores impulsionadores no Semiárido (VIEIRA *et al.*, 2015). O primeiro processo está relacionado principalmente à práticas em áreas de cobertura natural, ou de mosaicos de transição, de sobrepastejo e de extração de lenha para venda (muitas vezes com o auxílio do fogo), que de forma continuada (SILVA *et al.*, 2020), levam a processos de degradação do solo e, por conseguinte, na diminuição da capacidade de regeneração da vegetação. O segundo está relacionado com a substituição da vegetação natural por cultivos de sequeiro ou irrigado, podendo levar a processos erosivos e de salinização nas áreas de cultivo e adjacências (VENDRUSCOLO *et al.*, 2019). Tais processos levam à exaustão do solo, com perdas de produtividade, que com a continuidade dos mesmos levam a um processo de degradação ainda maior, que junto à reduzida e concentrada precipitação anual, própria da região, leva à diminuição da resiliência da vegetação (CARREIRO; ARCOVERDE; BARROS, 2022).

Para avaliar, compreender e associar os fatores socioeconômicos e ambientais de forma encadeada, pode-se utilizar o modelo conceitual FPEIR (Força Motriz - Pressão - Estado - Impacto - Resposta) com indicadores. Este modelo consiste em apresentar as forças motrizes em que a sociedade atua (F), pressões diretas que a humanidade exerce sobre a natureza (P), alterações na qualidade e quantidade dos recursos naturais (E), impactos sociais e econômicos (I) e respostas do governo, dos cidadãos e de outros grupos para o fenômeno estudado (EEA, 1999).

O uso de mapas junto com o modelo FPEIR permite verificar padrões geográficos de áreas mais vulneráveis à degradação e áreas com maior potencial para reverter esse processo. Desta forma, é possível verificar relações topológicas e associadas nas dimensões socioeconômicas e ambientais, possibilitando uma melhor compreensão do funcionamento dos componentes do FPEIR. Nesse artigo analisamos os fatores que promovem e que podem contornar o processo da degradação da terra na sub-bacia hidrográfica Submédio São Francisco por meio da construção de índices segundo o modelo FPEIR.

2. Metodologia

2.1. Caracterização da área

Este trabalho considerou como área de estudo a sub-bacia hidrográfica Submédio São Francisco. Esta região encontra-se inserida no bioma Caatinga, dentro dos limites dos estados de Pernambuco e Bahia principalmente, abrangendo 84 municípios (Figura 1). O Rio São Francisco, principal rio da bacia do Submédio São Francisco, é de grande importância para o abastecimento de água para a população e é uma importante hidrovia nacional para exportação de produtos agrícolas (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2021).

O clima na bacia do Submédio São Francisco e em boa parte do bioma Caatinga predomina o clima Semiárido, com precipitação média inferior a 800 mm ao ano (ALVARES *et al.*, 2014). A vegetação é adaptada a grandes períodos de estiagem, com fitofisionomias que refletem as condições hídricas do solo (COUTINHO, 2016).

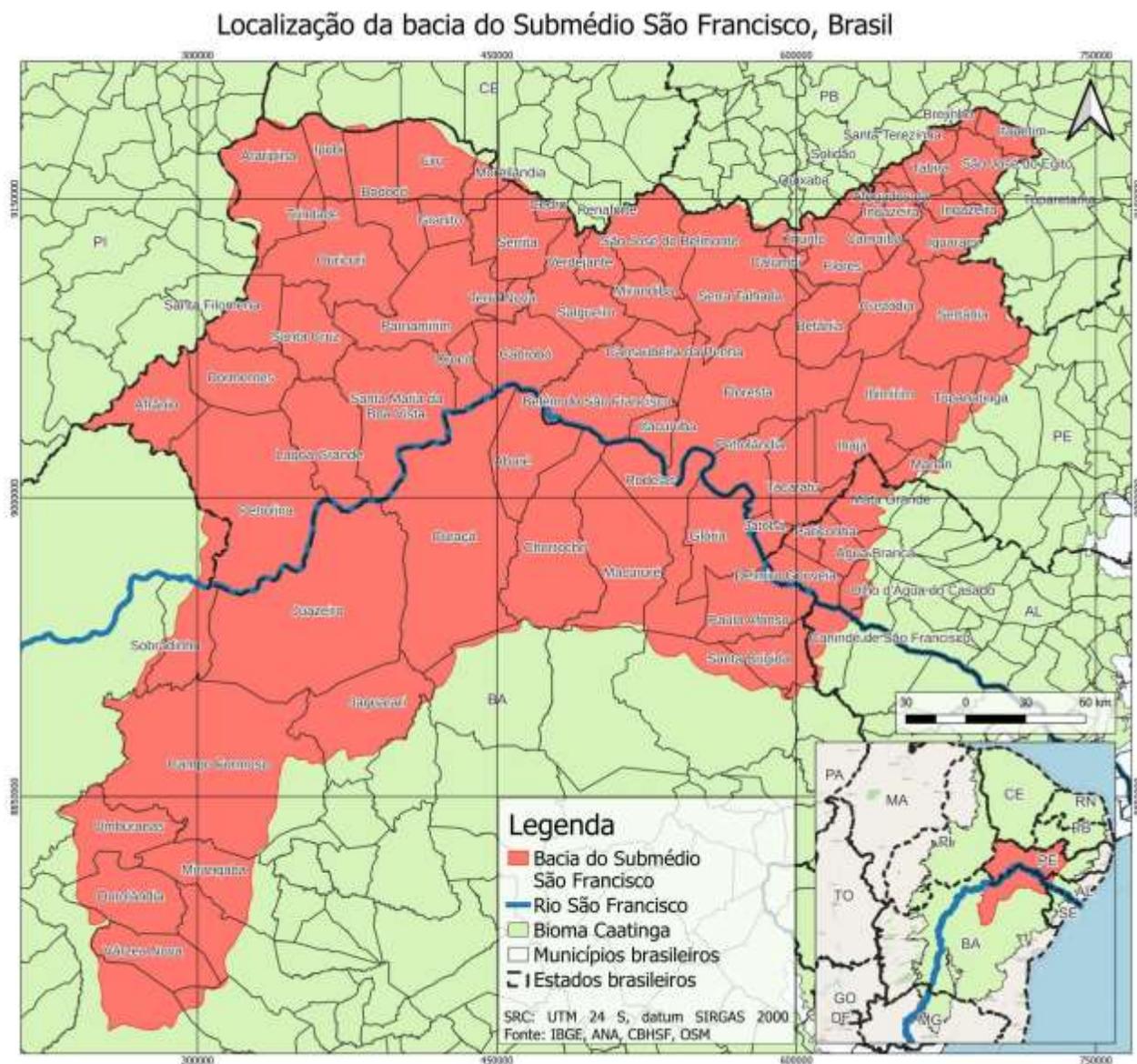


Figura 1 – Mapa de localização da área estudada.

Fonte: Autores (2022).

A população do semiárido brasileiro cresceu em 6% de 2000 a 2017, com o IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) das cidades desta região sendo abaixo da média brasileira (0,727) (IBGE, 2010; ATLAS BRASIL, 2010) e abriga cerca de 24 milhões de pessoas (ALVALÁ *et al.*, 2019). É importante destacar o desenvolvimento produtivo de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), onde houve investimentos públicos para desenvolver a agricultura. Nos dias atuais, são importantes centros para investimento no agronegócio (URBAN SYSTEM, 2020).

2.2. Procedimentos metodológicos

2.2.1. Seleção de indicadores

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a área de estudo, trabalhos envolvendo a degradação da terra e uso de indicadores. Foi feita uma busca no *Google Scholar* por artigos com o objetivo de selecionar possíveis temas para gerar indicadores que são relacionados à degradação. A partir da leitura dos resumos dos artigos nacionais e internacionais foram selecionados aqueles artigos que poderiam ser extraídos indicadores de degradação, com possibilidade de serem distribuídos nos componentes FPEIR, e estes foram lidos completamente. Também foram considerados os relatórios da FAO (1994 e 2003) pela relevância nos estudos sobre degradação.

Os indicadores selecionados foram classificados nos respectivos componentes do modelo FPEIR (EEA, 1999), que é um sistema de organização de indicadores para identificar e descrever processos e interações em sistemas socioambientais (CARR *et al.*, 2007). O modelo FPEIR permite entender o processo de degradação de forma sistêmica, identificando as causas indiretas e diretas da degradação (Força Motriz e Pressão), como estas afetam o estado do ambiente (Estado), as consequências da degradação da terra (Impacto) e soluções para reverter este processo (Resposta). A construção de indicadores para os temas identificados também seguiu algumas etapas metodológicas de Maggino (2017). Tomou-se como referência temporal prioritária a década de 2010 e como escala mínima o nível municipal ou dados mais detalhados que no nível municipal.

O Quadro 1 apresenta a lista de 18 indicadores previamente selecionados, organizados na estrutura dos componentes do modelo FPEIR. No quadro também são apresentados a fonte utilizada para obter o dado, as referências que serviram de base para escolher o indicador e o sentido do indicador, ou seja, se ele possui uma relação direta ou inversa com a componente FPEIR.

Quadro 1 – Indicadores previamente selecionados na pesquisa.

Nome do indicador	Componente FPEIR	Fontes de dados	Ano	Referência para escolha do indicador	Sentido
Percentual de estabelecimentos com produtor ocupante	Força Motriz	IBGE (censo agro) https://sidra.ibge.gov.br/ta-bela/6878	2017	Lima <i>et al</i> (2016); FAO (2003); Agyemang, McDonald e Carve (2007)	Direto
Média do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal	Força Motriz	Atlas Brasil http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/biblioteca	2010	Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso
Percentual de áreas rurais povoadas	Força Motriz	IBGE (censo agro) https://censos.ibge.gov.br/resultados-censo-agro-2017/cnefe.html e https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage	2017	FAO (2003); Agyemang, McDonald e Carve (2007); Vieira <i>et al</i> , 2015	Direto
Média da quantidade produzida de lenha (m ³)	Pressão	IBGE (censo agro) https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/289	2017	Gessesew (2017)	Direto
Produtividade pecuária	Pressão	AdaptaBrasil https://adaptabrasil.mcti.g	2017	Lima <i>et al</i> (2016); Porta e Poch (2011)	Inverso

		ov.br/sobre/lista-de-indicadores			
Quantidade de focos de calor (acumulada)	Pressão	BDQueimadas https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas	2000-2017	Lima <i>et al</i> (2016); Porta e Poch (2011)	Direto
Percentual de desmatamento (acumulado)	Pressão	PRODES/INPE http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/	Até 2016	Lima <i>et al</i> (2016) e Porta e Poch (2011)	Direto
Percentual de expansão agropecuária	Pressão	MapBiomas https://mapbiomas.org/coloes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR	2000 e 2017	Lima <i>et al</i> (2016)	Direto
Percentual dos estabelecimentos que utilizam agrotóxicos (excluído da análise depois da correlação)	Pressão	IBGE (censo agro) https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6851	2017	FAO (1994) e FAO (2003)	Direto
Percentual de área com alta e muito alta erodibilidade e fase erodida	Estado	Embrapa http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/2924	2019	Lima <i>et al</i> (2016); Porta e Poch (2011)	Direto
Média do índice de aridez	Estado	Trabucco e Zomer (2019)	Publicado em 2019, dados de 1970-2000	Vieira <i>et al</i> (2015); Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso
Média da declividade	Estado	TOPODATA/INPE http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/	2010	Vieira <i>et al.</i> (2015); Cowie <i>et al.</i> (2018)	Direto
Média da produtividade de produtos básicos	Impacto	IBGE (Pesquisa Agrícola Municipal) https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas	2010 a 2019	Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso
Percentual de pastagens degradadas	Impacto	MapBiomas https://mapbiomas.org/coloes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-	2017	Incluído pela equipe	Direto

		BR			
Média do número de estabelecimentos que receberam programa de crédito	Resposta	IBGE (censo agro) https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6895	2017	Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso
Percentual de alternativas ao abastecimento de água	Resposta	AdaptaBrasil https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre/lista-de-indicadores	2010	Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso
Percentual do número de estabelecimentos que recebem orientação técnica	Resposta	IBGE (censo agro) https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6881	2017	Incluído pela equipe	Inverso
Percentual de Unidades de Conservação	Resposta	Ministério do Meio Ambiente http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm	2021	Lima <i>et al</i> (2016)	Inverso

Fonte: Autores (2022).

2.2.2. Extração e tratamento de dados

Os dados utilizados para gerar os indicadores foram extraídos de variadas formas a depender de sua natureza (vetorial, matricial ou tabular). Para obter a média dos valores em grades, e considerando como unidade mínima de mapeamento 25 km², foram geradas grades de 5 x 5 km em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) utilizando o software QGIS. Todos os dados no formato tabular tinham representação municipal e, portanto, possuíam geocódigo que possibilitou a união com o *shapefile* de municípios do IBGE de 2021. Para a obtenção da média dos dados no nível municipal para as grades foi utilizado o software FillCell, de acesso livre, desenvolvido para criar e preencher espaços celulares regulares (grades) em ambiente de geoprocessamento e que é compatível com o LUCCEME, um programa de geração de modelos espaciais dinâmicos desenvolvido por INPE (2017).

Os indicadores que tinham representação tabular municipal foram: Percentual dos estabelecimentos com produtor ocupante, Média da quantidade produzida de lenha (m³), Média do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, Média da produtividade agrícola de produtos básicos, Produtividade pecuária, Percentual dos estabelecimentos que utilizam agrotóxicos, Média do número de estabelecimentos que receberam programa de crédito, Percentual de alternativas ao abastecimento de água e Percentual do Número de estabelecimentos que recebem orientação técnica. As fontes utilizadas para gerar os indicadores estão no Quadro 1.

O indicador Percentual de áreas rurais povoadas passou por um tratamento específico de geoprocessamento, tendo em vista que é composto por pontos em áreas visitadas no Censo Agropecuário de 2017 e por polígonos de setores censitários urbanizados em zona rural (setores rurais de situação 5, 6 e 7). Estas camadas foram convertidas para formato matricial com resolução de 1km, e posteriormente, foi extraído o percentual desse pixels (com ocupação) na grade de 5 x 5 km.

A Produtividade pecuária refere-se a quantidade de cabeças de bovinos, caprinos e ovinos sobre áreas de pastagens plantadas em boas condições, portanto, áreas com maior valor foram consideradas como positivas por manterem um maior número de animais preservando a qualidade das pastagens. O cálculo deste indicador foi realizado pela média entre a produtividade de rebanhos (R) e leite (L). A produtividade de rebanhos foi calculada por meio da razão entre a quantidade de animais de pastoreio e a área de pastagem plantada no município (em hectare), multiplicada pela porcentagem de

pastagens consideradas em boas condições. A produtividade de leite foi calculada pela razão entre o total de produção de leite (mil litros) entre vacas, ovelhas e cabras, e o número de cabeças destes. Foi calculado o logaritmo neperiano da média entre os valores normalizados das duas produtividades consideradas (R e L) para aproximar os valores extremos da média.

No caso dos indicadores Percentual de desmatamento acumulado e Percentual de Unidades de Conservação (UCs), foi calculada a área de cada tema nas grades e depois dividida pela área total da grade, multiplicado por 100 para obter o percentual. No caso do indicador Quantidade de focos de calor (focos acumulados de 2000-2017), foi utilizada a ferramenta Contagem de pontos em polígonos do QGIS, para obter a quantidade de focos em cada grade.

O indicador Percentual de Expansão Agropecuária foi gerado a partir de rasters de uso e cobertura da terra da região de estudo dos anos de 2000 e 2017. As classes envolvendo áreas agropecuárias foram extraídas e depois usada a ferramenta de estatística zonal, a fim de extrair a soma de pixels de agropecuária de cada ano. A área de cada ano foi obtida multiplicando a área do pixel (em metros) pela quantidade dos pixels e dividida por 10.000 para obter o valor em hectares. Utilizou-se a expressão abaixo para obter a expansão agropecuária.

$$\text{ExpAgrp} = ((\text{Área 2017} - \text{Área 2000}) / \text{Área 2000}) * 100$$

O indicador Percentual de áreas com alta e muito alta erodibilidade e fase erodida foi proveniente do mapa de erodibilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil (EMBRAPA, 2020). Apesar da escala ser pequena (1:250.000) em relação aos outros dados, este fator não é crítico, pois a unidade de mapeamento utilizada, de 25km², contempla escalas cartográficas de até 1:25.000.000, considerando o erro admissível de 0,2 mm em um mapeamento cartográfico (IBGE, 1998). As classes escolhidas do dado foram fase erodida, muito alta e alta erodibilidade. A região foi interseccionada no QGIS com a grade para cálculo da área com erodibilidade em cada grade e depois calculado o percentual. No caso dos indicadores Média do índice de aridez e Média da declividade, utilizou-se as Estatísticas zonais para calcular as respectivas médias em cada a grade.

O indicador Média da produtividade agrícola quantifica a eficiência da produção municipal dos alimentos básicos. Foram considerados como tal arroz, feijão, mandioca, milho e trigo. O cálculo é dado primeiramente pela razão da quantidade colhida de cada um das culturas agrícolas citadas em toneladas e as respectivas áreas plantadas. Foi calculada a média da razão citada para cada cultura agrícola entre os anos de 2010 a 2019. Aplicou-se uma normalização para cada produto agrícola, considerando os seus valores máximos e mínimos. O valor final foi resultante da média entre os valores normalizados de cada cultura. Nesse sentido, quanto maior o valor do indicador, maior é a produtividade agrícola de alimentos básicos por município.

Por último, no caso do indicador Percentual de Pastagem Degradada, utilizou-se a ferramenta Estatísticas zonais para obter a contagem dos pixels com pastagem degradada e total de pixels nas grades, e posteriormente foi calculada a razão entre os dois resultados, tudo foi multiplicado por 100 para obter o percentual.

2.2.3. Correlação e exclusão de indicadores

Com todos os indicadores prontos, foi calculada a correlação de Spearman entre os indicadores. Foram observadas as duplas com forte correlação (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009), maior ou igual a 0,7 ou menor ou igual a -0,7, e feita uma análise de eliminação conforme discussão entre a equipe e revisão de literatura. Para tais métodos, utilizou-se os pacotes Hmisc, Corplot, XLSX e Rcorr do programa R. A Figura 2 mostra o correlograma elaborado com a correlação entre os indicadores selecionados. Os valores com “X” significam que a correlação não atingiu um nível de significância de 5% entre as duplas e, portanto, não são passíveis de análise.

Os indicadores que obtiveram maior correlação do mesmo componente FPEIR foram: Média da declividade x Média do índice de aridez (0,49), Quantidade produzida de lenha (m³) x Percentual dos estabelecimentos que utilizam agrotóxicos (0,90), Percentual de desmatamento acumulado x Quantidade de focos de calor (0,57). O grupo decidiu excluir apenas o indicador Percentual dos estabelecimentos que utilizam agrotóxicos, pois a extração de lenha é bem mais expressiva na região da Caatinga.

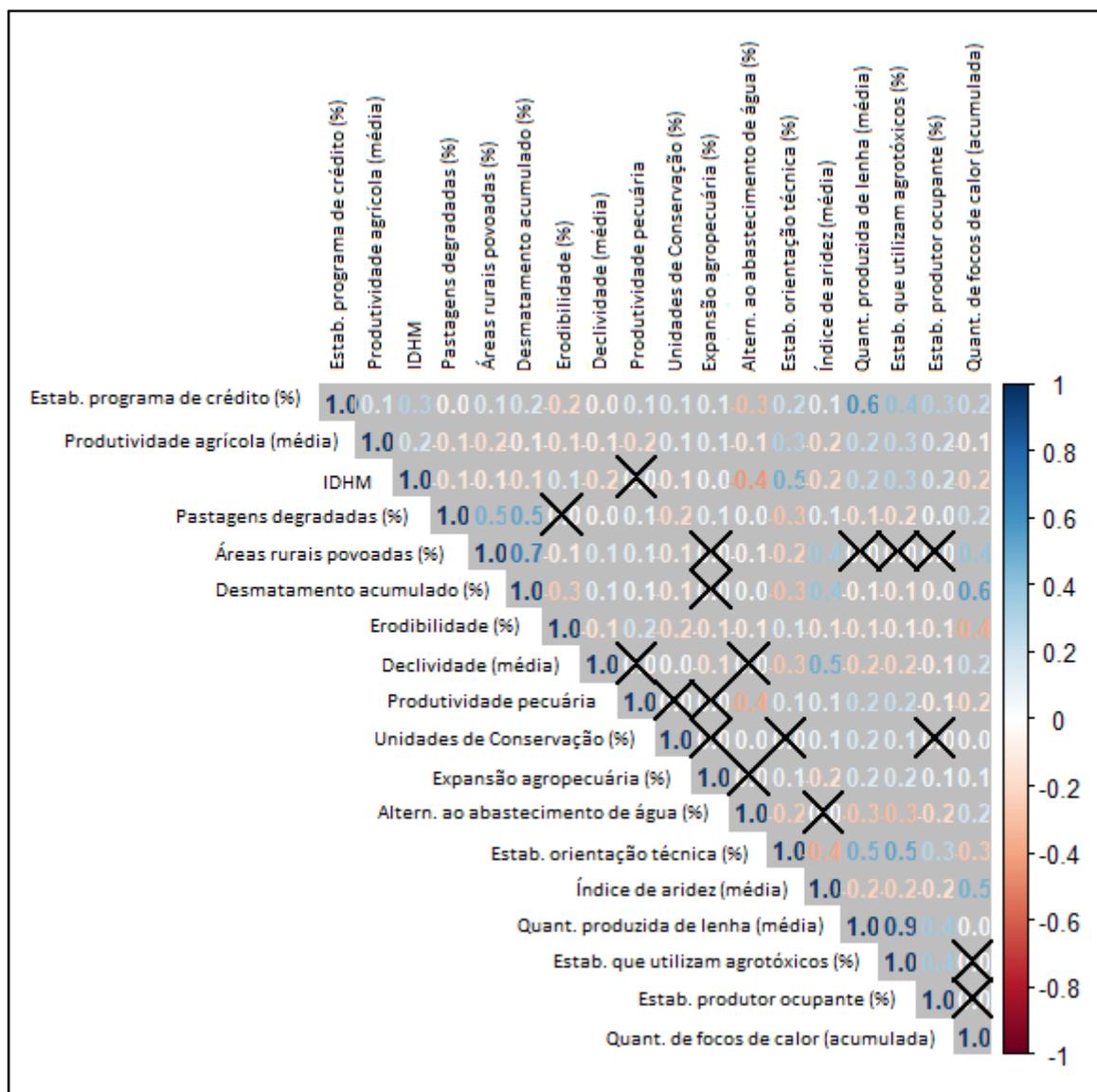


Figura 2 – Correlograma dos indicadores.

Fonte: Autores (2022).

2.2.4. Normalização de dados

Os 17 indicadores selecionados foram normalizados (0 a 1) e os *outliers* tratados segundo a técnica de *winsorization*, conforme cálculo proposto por Nardo *et al.* (2008).

Os indicadores dos componentes FPEI com sentido inverso à degradação (que contribuem para diminuí-la) foram invertidos para possibilitar a comparação com os demais indicadores, sendo estes Média do IDHM, Produtividade do Rebanho, Média do índice de aridez e Média da produtividade agrícola de produtos básicos. Todos os indicadores que integram o componente Resposta não foram invertidos porque a proposta é evidenciar que eles têm potencial para reverter a degradação e também porque estes indicadores foram agrupados em um índice separado dos demais componentes FPEI.

Em seguida partiu-se para a geração dos índices, agrupando os indicadores de cada componente FPEIR. Para a geração dos índices foi calculada uma mediana entre os indicadores. Os valores dos índices foram normalizados e as tabelas resultantes foram importadas para o QGIS.

As planilhas com índices de cada componente FPEIR foram unidas com as grades e gerados cinco mapas temáticos de cada componente, e mais um mapa com a média dos valores de FPEI calculada a partir dos valores finais dos índices individuais.

3. Resultados e discussão

Os resultados em forma de 5 índices espacializados, resultantes de 17 indicadores, mostram padrões distintos em cada componente, sendo que nos componentes F, P, E e I, as áreas com maior vulnerabilidade à degradação são aquelas próximas ao valor 1, e no caso do componente R, as áreas com maior potencial para reverter a degradação correspondem àquelas com valores mais próximos a 1.

Os indicadores de Força Motriz apresentados na Figura 3 foram: Estabelecimentos com produtor ocupante, Média do IDHM e Áreas rurais povoadas. Este conjunto de indicadores representa o crescimento populacional em áreas rurais e as condições de vida da população. Vieira *et al* (2015) consideraram que a população impacta a região nordeste através do uso de terra que pode levar a uma maior degradação. Sobre o IDHM, Lima *et al* (2016) citam que os habitantes da região abaixo da linha da pobreza podem não saber manejar corretamente o solo ou não compreender a importância deste recurso inerente à natureza, soma-se a isso a ausência de programas de assistência técnica rural e educação ambiental. A falta de acesso à terra, representada pelos estabelecimentos com produtor ocupante, também pode contribuir como causa indireta para esse processo de degradação (FAO, 2003).

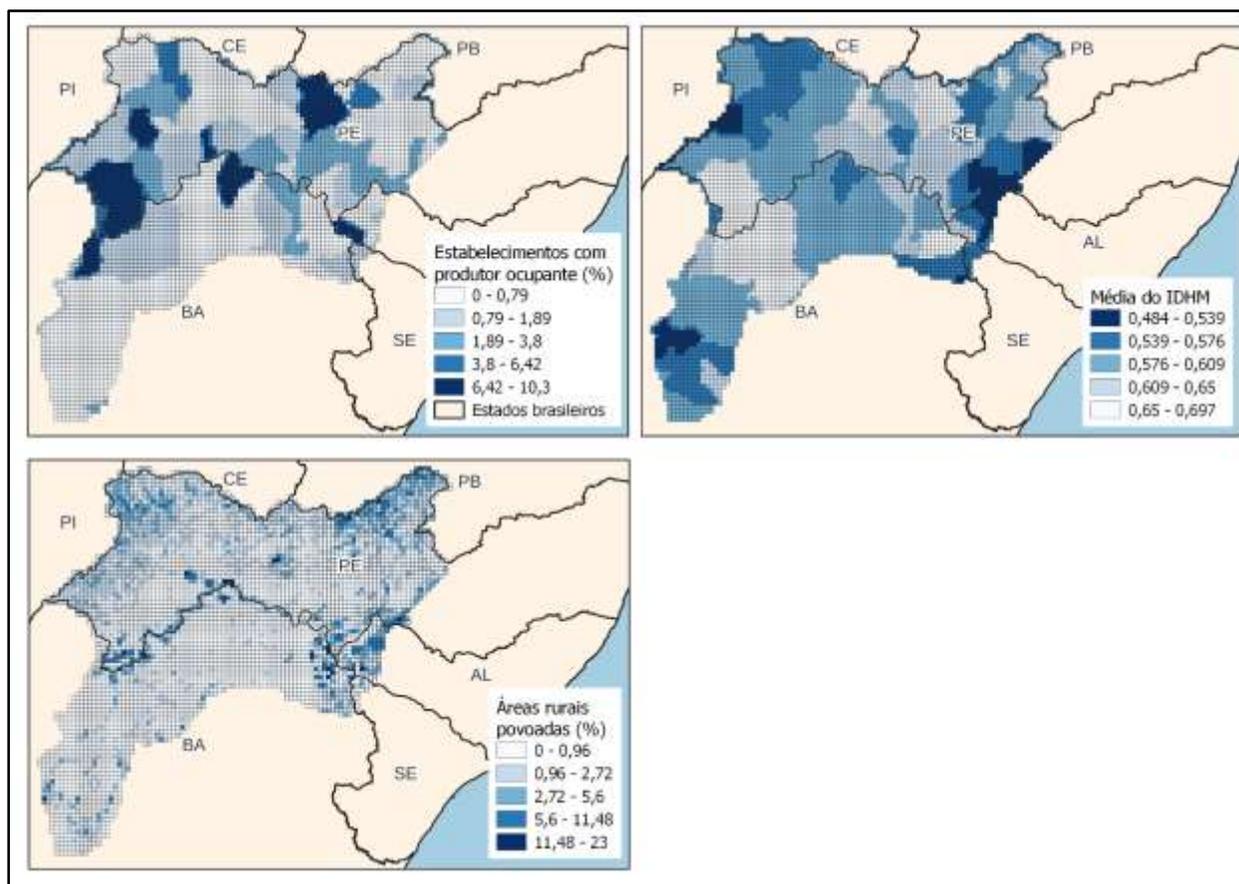


Figura 3 – Distribuição espacial dos indicadores do Índice de Força Motriz.
Fonte: Autores (2022).

O mapa deste índice (Figura 4) apresenta áreas com maior potencial de degradação em várias regiões da bacia, com menores valores na porção sul da bacia, na Bahia. No leste e extremo sul da bacia o indicador que mais contribuiu para o

maior valor do índice foi o IDHM, por serem áreas com menor IDHM em relação às demais, enquanto as áreas com produtor ocupante tiveram mais influência sobre o centro e noroeste da bacia (classe de 0,8 a 1). As áreas rurais povoadas distribuem-se principalmente ao longo do rio São Francisco, na divisa entre Bahia e Pernambuco, e no nordeste da bacia, e tiveram menor influência no resultado do índice.

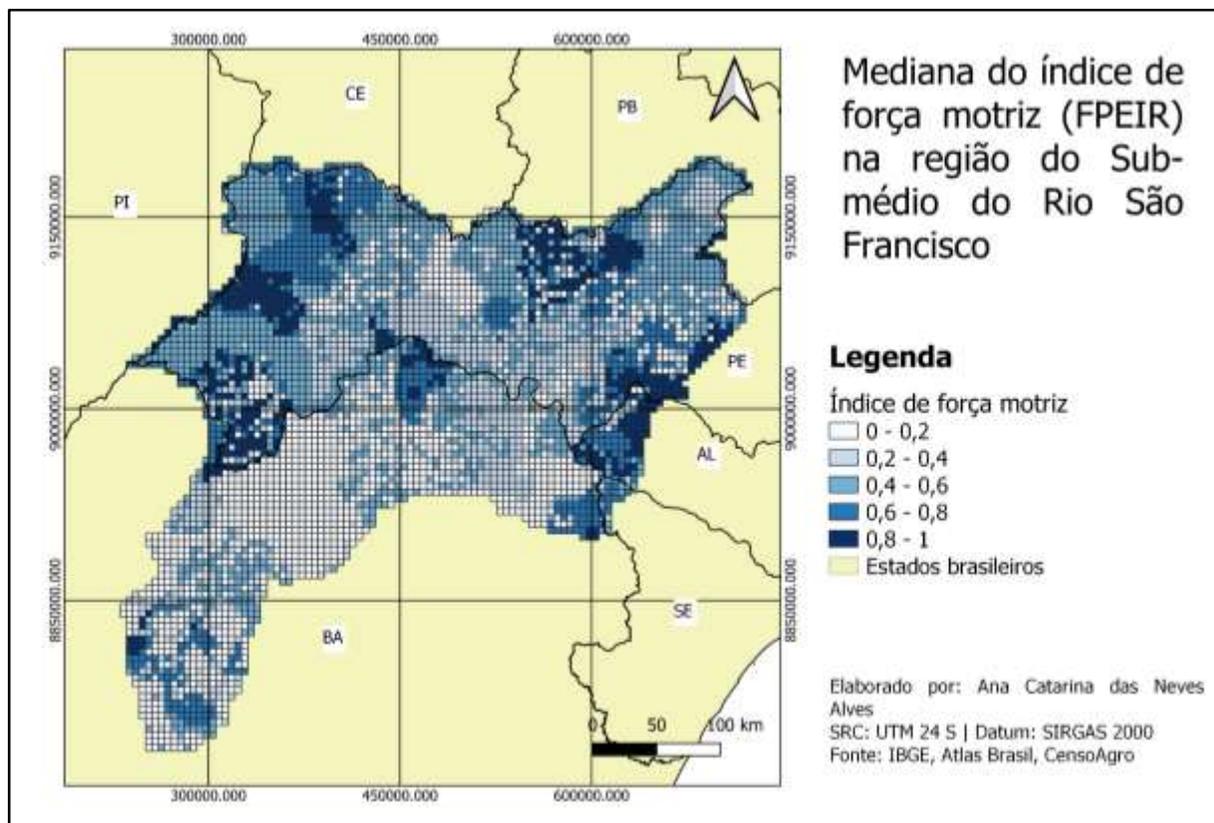


Figura 4 – Índice de Força Motriz.
 Fonte: Autores(2022).

Na Figura 5 é possível conferir os indicadores Média da quantidade produzida da lenha (m^3), Produtividade pecuária, Quantidade de focos de calor (acumulada), Percentual de desmatamento (acumulado) e Percentual da expansão agropecuária, que juntos compõem o índice de Pressão. De acordo com Demartelaere *et al* (2022), o desmatamento causa danos irreversíveis a Caatinga, pois pode levar a desertificação, associado com os incêndios florestais que começam de forma antrópica e prejudicam o solo (LATUF; RIOS; PEREIRA, 2022) e a exploração brasileira de lenha, que não é suficiente para sustentar a indústria gesseira (GRANJA *et al*, 2017). Lima *et al* (2016) ainda citam o sobrepastoreio, que compacta o solo, perdendo sua atividade biológica.

Petrolina e Juazeiro representam juntos um dos polos nacionais de agricultura irrigada, sendo o mais desenvolvido do Vale do São Francisco (ANA, 2019). Apesar da importância econômica da agricultura, estudos mostram que o manejo inadequado pode degradar o solo por meio da erosão hídrica e salinização (FAO, 2003; KOSMAS *et al*, 2014). De acordo com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio São Francisco (CBHSF, 2016), a agricultura irrigada é uma das principais causadoras de salinização dos solos e o submédio São Francisco está incluído na classe de alto risco de salinização.

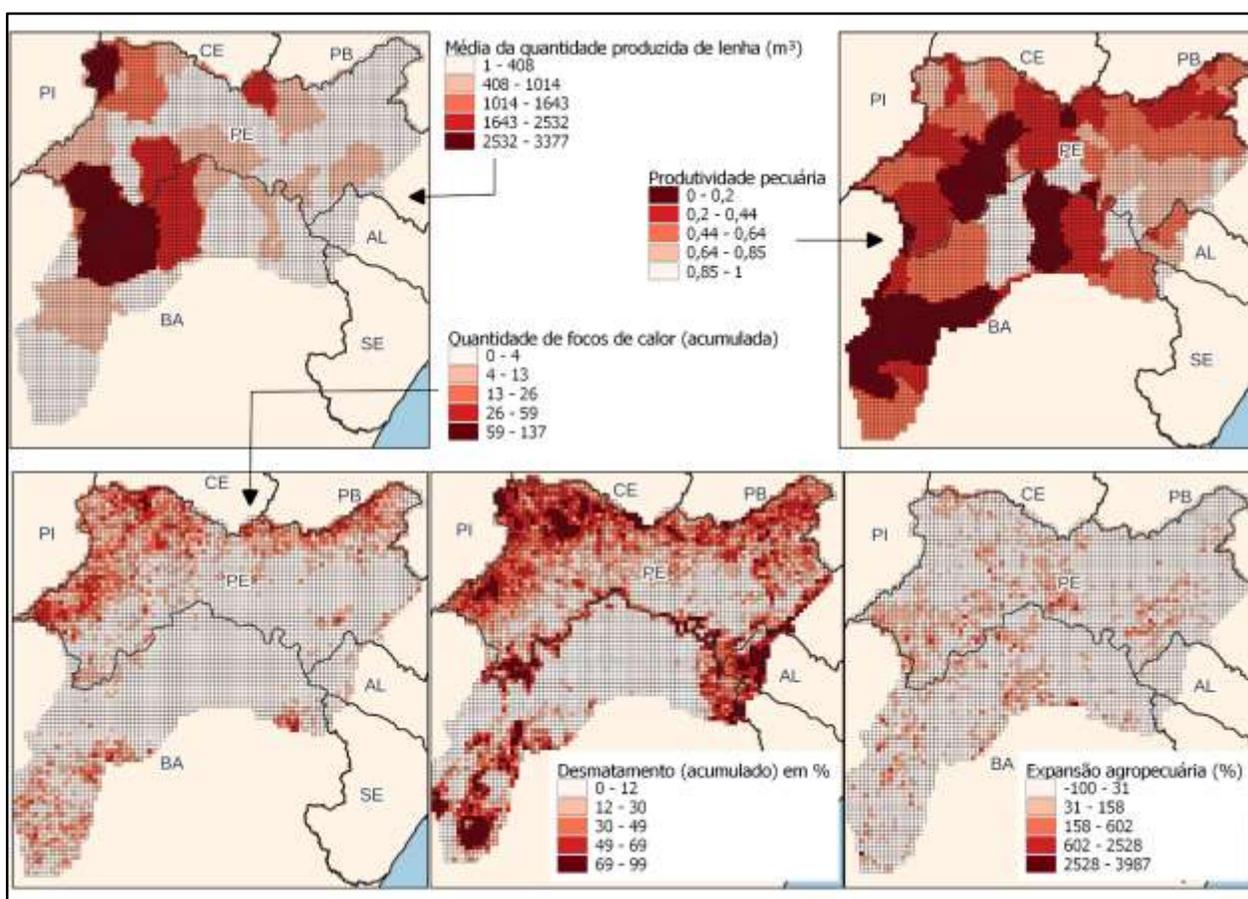


Figura 5 – Distribuição espacial dos indicadores do Índice de Pressão.

Fonte: Autores (2022).

No índice de pressão (Figura 6), as áreas mais críticas estão no oeste e norte da bacia, com valores maiores nos municípios de Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Araripina ($> 0,6$). Estes locais são de grande importância econômica para região, visto que Petrolina (PE) tem grande investimento em agricultura irrigada (MANETA *et al*, 2009), Santa Maria da Boa Vista (PE) situa-se na região de influência Petrolina-Juazeiro, e Araripina participa do Polo Gesseiro que extrai a gipsita, um componente importante para produção de gesso (GRANJA *et al*, 2017).

De maneira geral, o índice acompanha os padrões espaciais do indicador de desmatamento, que é maior ao longo de toda a área ao norte da bacia, ao longo do rio São Francisco e leste da bacia e no extremo sul da bacia, figura 4, concordando com as grades com valores de 0,4 a 1. O desmatamento é uma das principais causas da degradação da terra, conforme FAO (2003). A produtividade pecuária influenciou toda a porção oeste da bacia, do extremo sul ao noroeste e norte da bacia. A concentração de focos de calor ocorre principalmente no noroeste da bacia, enquanto a expansão agropecuária ocorre de maneira dispersa sobre o território.

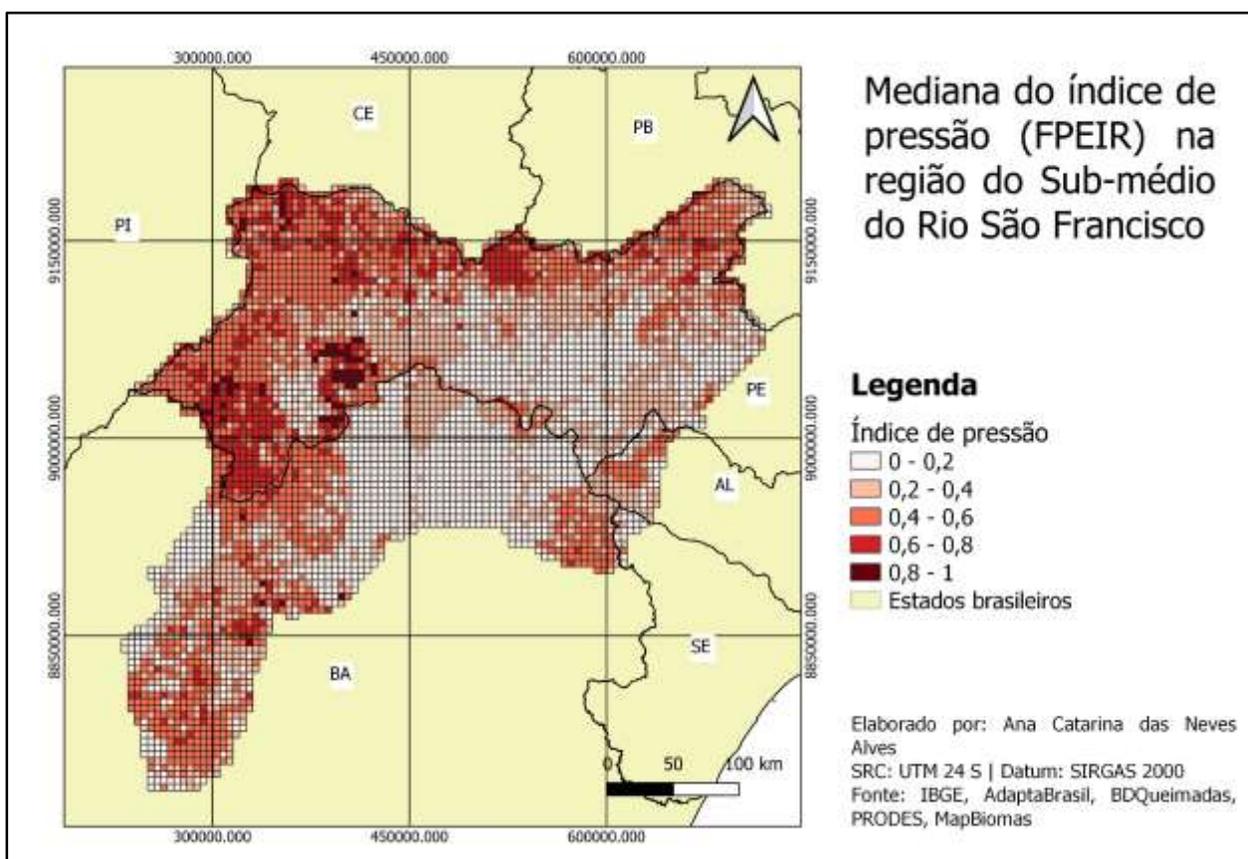


Figura 6 – Índice de Pressão.

Fonte: Autores (2022).

Os indicadores de Estado (Figura 7) estão representados por Percentual de áreas com alta e muito alta erodibilidade e fase erodida, Média do índice de aridez e Média da declividade. A maior declividade do terreno predispõe o solo a processos erosivos e o indicador média da declividade é maior em áreas isoladas que bordeiam o nordeste, leste e sudoeste da bacia. A erodibilidade do solo é representada por fatores intrínsecos do solo, como granulometria, profundidade e conteúdo de carbono orgânico (EMBRAPA, 2020). Outra questão a ser levada em consideração é o clima por influenciar a degradação (LOPES; LEAL, 2015), expresso na pesquisa pelo Índice de Aridez, que relaciona a precipitação e a evapotranspiração. Essa suscetibilidade natural apresentada pelos três indicadores associada à atividades humanas impactantes contribui para intensificar a degradação.

Em relação ao índice de Estado (Figura 8), é possível verificar grandes regiões mais suscetíveis no centro e sudoeste da bacia. No submédio São Francisco predominam áreas de alta e muito alta erodibilidade, com exceção da região a noroeste da bacia, que no mapa do índice de Estado possui um menor índice, influenciando o resultado representado na figura 10. O índice de aridez também contribuiu para o padrão espacial do índice de estado, com maiores valores de aridez em toda a região central da bacia e sul. No trabalho de Bezerra *et al.* (2020) é possível verificar que as áreas no centro e sul da bacia possuem suscetibilidade muito alta à degradação, o mesmo padrão de maior vulnerabilidade à degradação pode ser visualizado no índice de Estado (Figura 8).

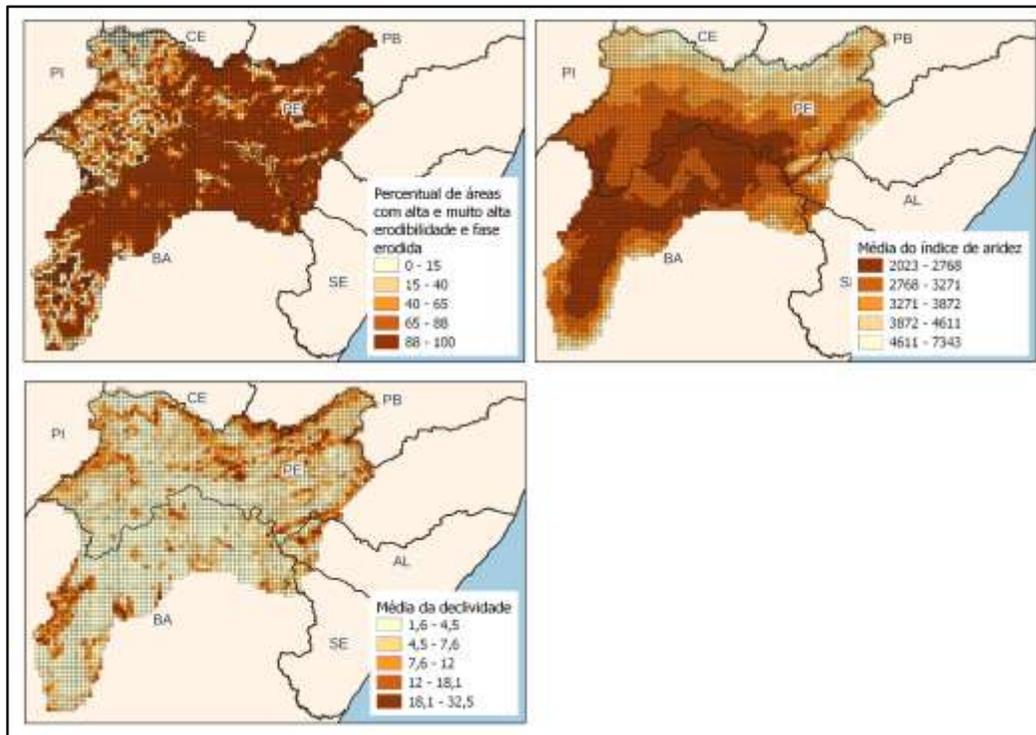


Figura 7 – Distribuição espacial dos indicadores do Índice de Estado.
Fonte: Autores (2022).

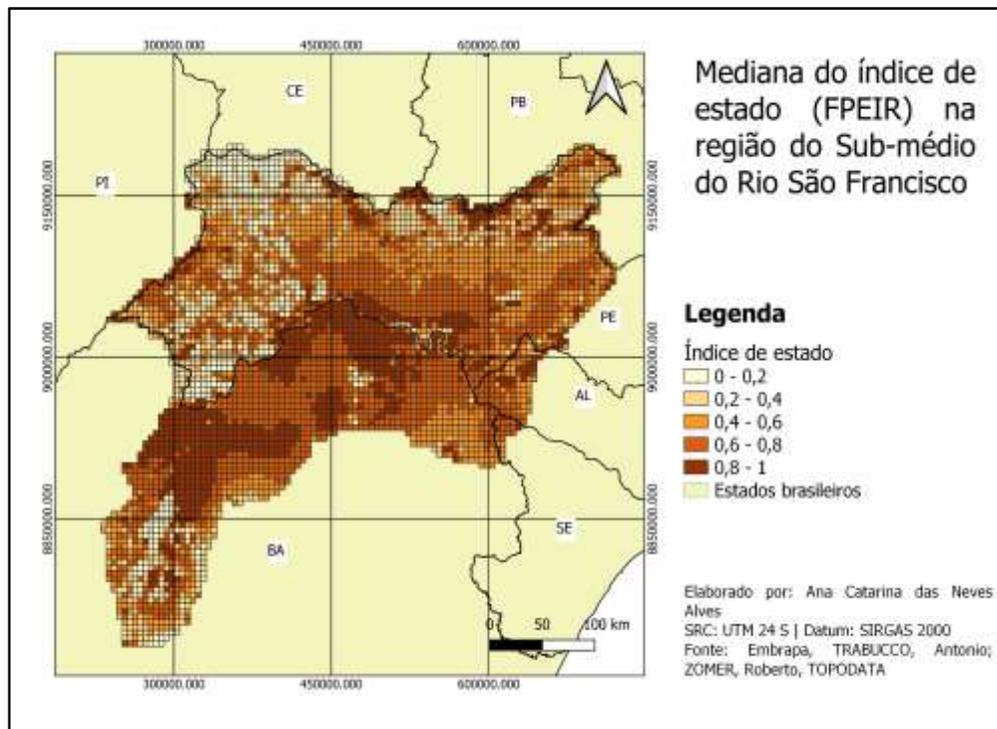


Figura 8 – Índice de Estado.
Fonte: Autores (2022).

O índice de impacto representa as mudanças sociais e econômicas provocadas pelas mudanças no estado do ambiente (EEA, 1999). A degradação da terra leva a perda da produtividade biológica e econômica da terra (UNCCD, 2017), dessa forma é importante verificar a perda de produtividade na produção de produtos básicos para a alimentação de quem vive na bacia, como arroz, feijão, milho, mandioca e trigo, além da qualidade das pastagens por afetar a produtividade pecuária, representados no mapa dos indicadores (Figura 9).

O índice de Impacto (Figura 10) apresenta os maiores valores nas regiões sudeste e noroeste da bacia, nestas áreas as pastagens foram mapeadas como severamente degradadas pelo estudo de Santos *et al.* (2022). O indicador de Pastagens degradadas (%) apresenta padrão semelhante ao mapa da Figura 10, sendo o mais correspondente ao índice de impacto. No caso da produtividade agrícola, as áreas com menor produtividade ocorrem no noroeste, centro e nordeste da bacia.

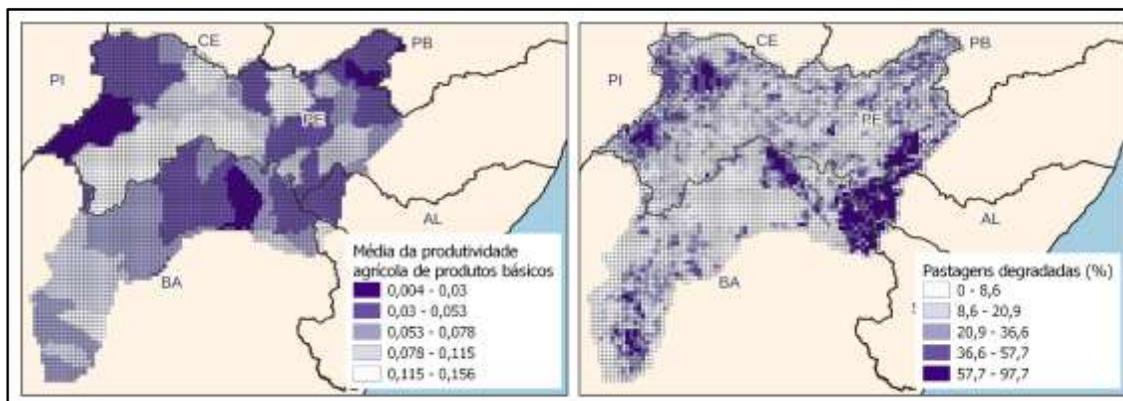


Figura 9 – Distribuição espacial dos indicadores do Índice de Impacto.

Fonte: Autores(2022).

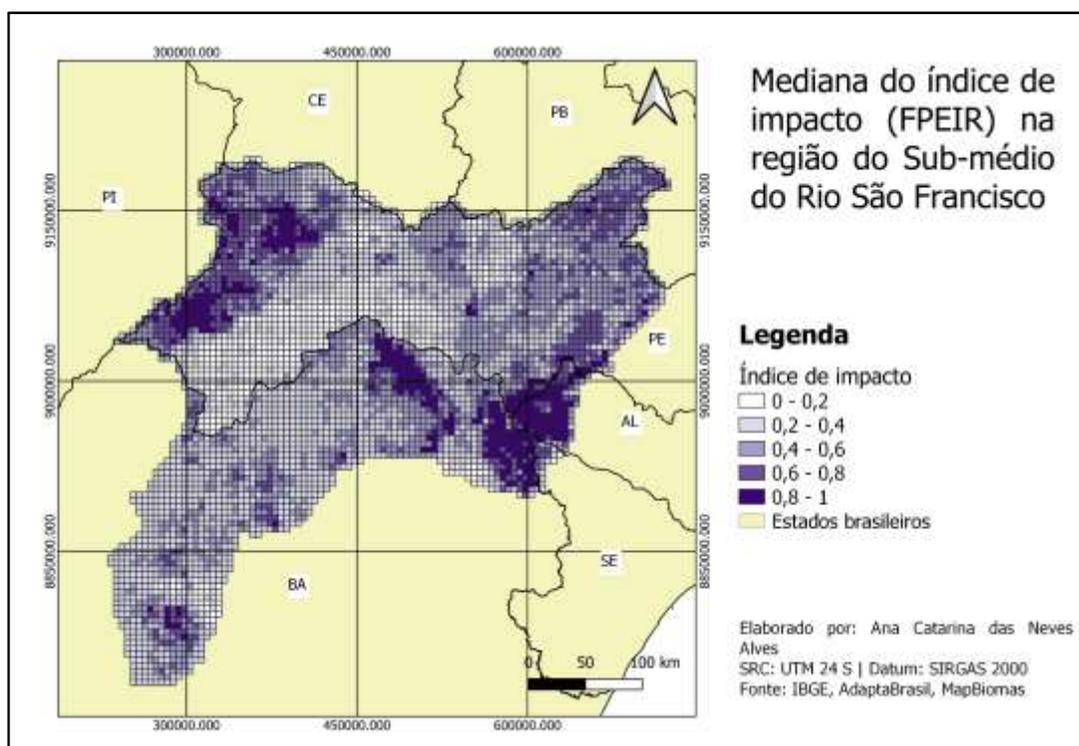


Figura 10 – Índice de Estado.

Fonte: Auores (2022).

O mapa da Figura 12 mostra a média dos índices FPEI e evidencia as áreas onde os quatro componentes que contribuem para a degradação possuem valores mais altos (0,6 a 0,83) e valores mais baixos (menor que 0,6). As áreas com maiores valores, mais vulneráveis à degradação, localizam-se sobretudo nas regiões noroeste e sudeste da bacia, mas há também manchas menores no centro, extremo sul e borda noroeste da bacia.

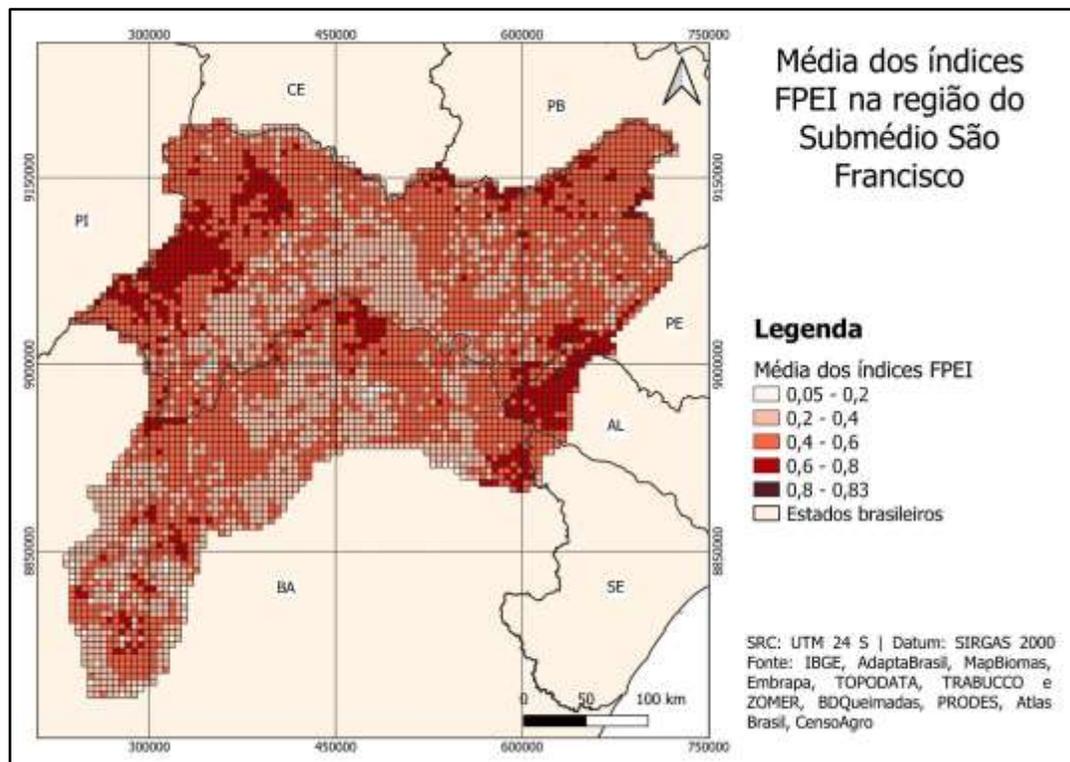


Figura 12 – Média dos índices FPEI.

Fonte: Autores (2022).

Por fim, na Figura 13 estão representados os indicadores de Resposta, sendo eles: Média do número de estabelecimentos que receberam programa de crédito, Alternativas ao abastecimento de água, Número de estabelecimentos que receberam orientação técnica e percentual de UCs.

Os indicadores com maior semelhança ao índice de Resposta foram: Percentual do número de estabelecimentos que recebem orientação técnica e Média do número de estabelecimentos que receberam programa de crédito, com maiores valores para os municípios de Petrolina e Juazeiro, oeste do mapa. No caso do crédito, Araripina (PE) no noroeste da bacia se destaca. O Percentual de UCs de Proteção Integral também contribuiu para influenciar o padrão observado no noroeste e sudoeste da bacia. Já o indicador de alternativas ao abastecimento de água contribuiu para o maior valor no sudeste do mapa.

No trabalho de Lima *et al.* (2016) também são levados em consideração temas semelhantes aos mencionados acima, como programas de transferência de renda, famílias atendidas com tecnologias sociais de acesso à água e proteção de UCs.

O índice de Resposta (Figura 14) concentra os maiores valores, com maior potencial de reverter a degradação, no oeste e noroeste da bacia. Este índice aponta quais ações podem reverter a degradação, principalmente com políticas públicas para conservação do meio ambiente, assessoria técnica e disponibilidade de água. No mapa é possível verificar municípios como Petrolina (PE), Juazeiro (BA) e Araripina (PE), já mencionados anteriormente, com maior potencial para combater a degradação.

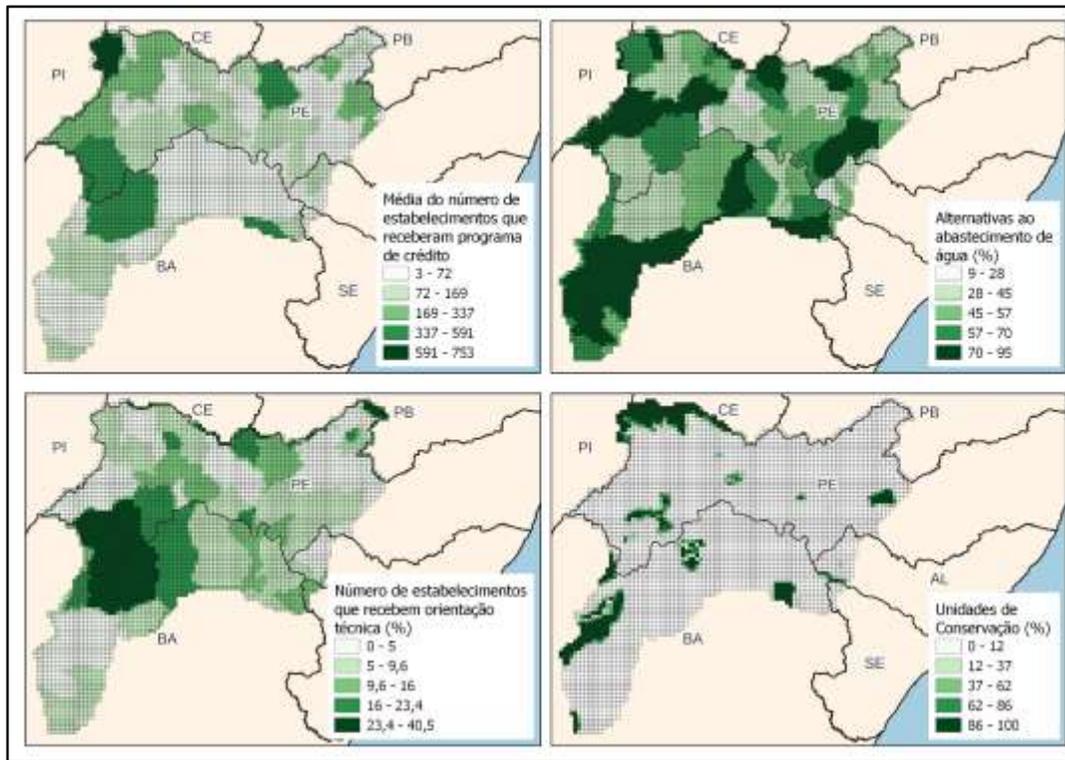


Figura 13 – Distribuição espacial dos indicadores do Índice de Resposta.
Fonte: Autores (2022).

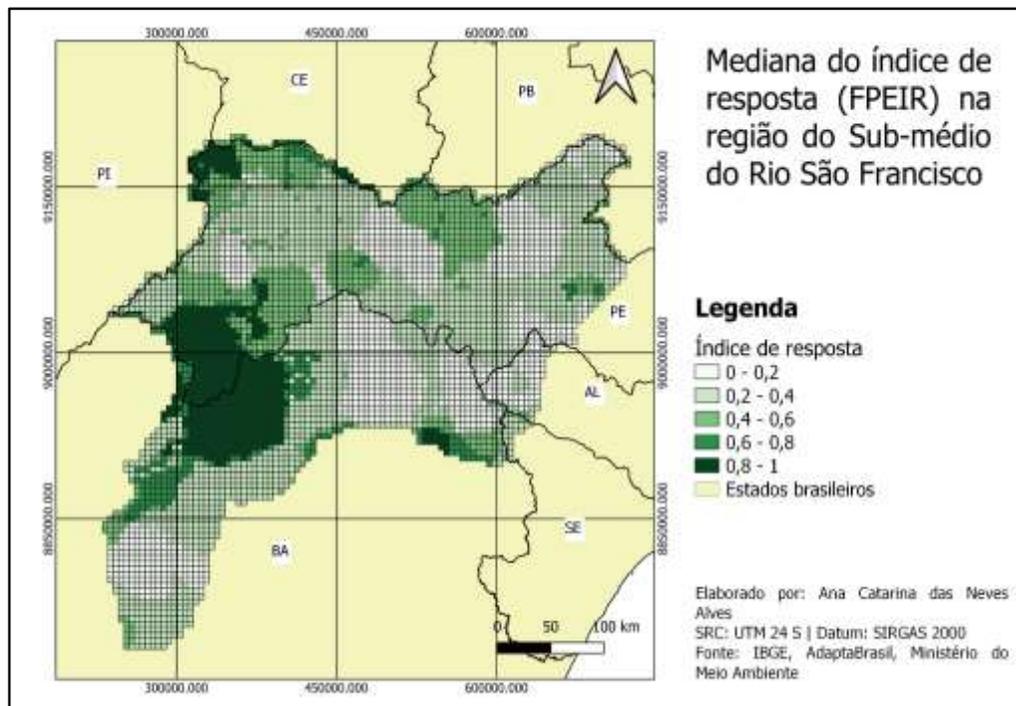


Figura 14 – Índice de Resposta.
Fonte: Autores (2022).

É importante ressaltar que existem práticas sendo aplicadas no semiárido brasileiro para reduzir a degradação da terra que não puderam ser quantificadas no presente trabalho, como a agroecologia e o reflorestamento. As experiências apresentadas por Curado, Santos e Oliveira (2014) mostram a importância da agricultura baseada na agroecologia na promoção do uso sustentável dos recursos naturais. O estudo de Pérez-Marin *et al.* (2017) evidencia que o reflorestamento e a diversificação de agroecossistemas introduzem práticas de conservação do solo e melhoria da capacidade de convivência com o semiárido, contribuindo no combate à degradação da terra.

4. Conclusão

O modelo FPEIR é uma ferramenta importante para entender de forma sistêmica a degradação da terra, compreendendo-a como processo composto por relações socioambientais que interagem. O uso de índices permitiu a mensuração da degradação de uma maneira que facilitou a compreensão deste fenômeno que é complexo. Observou-se que cada componente FPEIR tem a capacidade de mostrar características particulares do processo de degradação, visto que os padrões espaciais foram diferenciados em cada índice.

Observou-se a partir dos indicadores que as condições de vida da população e a ocupação em áreas rurais, atreladas a atividades que alteram as condições do ambiente como queimadas e desmatamento, geram consequências para o meio físico. Essas forças motrizes e pressões, atreladas aos padrões climáticos, geram uma suscetibilidade à degradação. As consequências dessas alterações no ambiente também impactam a sociedade e a economia, diminuindo a produtividade agropecuária.

Em termos de indicadores, aqueles que mais contribuíram para os padrões espaciais visualizados nos mapas de índices foram: IDHM para Força Motriz, Desmatamento para Pressão, Índice de Aridez no Estado, Pastagens degradadas no Impacto e Estabelecimentos que recebem orientação técnica e programas de crédito no índice de Resposta.

As áreas mais vulneráveis à degradação localizam-se sobretudo nas regiões noroeste e sudeste da bacia, mas há também manchas menores no centro, extremo sul e borda noroeste da bacia. Em relação à resposta, destacam-se as áreas a oeste, noroeste e sudeste da bacia.

Algumas políticas públicas consideradas no estudo podem contribuir para reduzir a situação da degradação na bacia, como o nível de orientação técnica e crédito dados aos produtores rurais e a presença de unidades de conservação. É importante ressaltar que iniciativas de restauração da vegetação também podem contribuir para reverter esse processo, embora não tenham sido mensuradas no estudo por falta de dados disponíveis para a bacia.

Espera-se que este estudo tenha contribuído na indicação de áreas mais vulneráveis para que sejam executadas iniciativas de restauração por parte do poder público e privado na bacia, e que próximos estudos possam analisar indicadores de resposta não mencionados neste artigo, como ações de reflorestamento e agroecossistemas.

Agradecimentos

Ao CNPq pelas bolsas de pesquisa PIBIC e PCI; ao projeto Nexus (FAPESP número 2017/22269-2) pelo apoio financeiro; e aos pesquisadores do LADIS/INPE pelas discussões que enriqueceram a pesquisa.

Referências

- AGYEMANG, I.; MCDONALD, A.; CARVER, S. Application of the DPSIR framework to environmental degradation assessment in northern Ghana. In: *Natural Resources Forum*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2007. p. 212-225.
- ALVALÁ, R. et al. Drought monitoring in the Brazilian Semi-arid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, 2017.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J.L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. 2014.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Polos nacionais de agricultura irrigada: mapeamento de áreas irrigadas com imagens de satélite. Brasília: ANA, 2019.

- BEZERRA, F. G. S. et al. Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. *Ecological Indicators*, v. 117, p. 106579, 2020.
- CARR, Edward R. et al. Applying DPSIR to sustainable development. *International journal of sustainable development & world ecology*, v. 14, n. 6, p. 543-555, 2007.
- CARREIRO, Gabriela Alves; ARCOVERDE, Gustavo Felipe Baluê; BARROS, Jocilene Dantas. Aplicação de Abordagem Metodológica para Proxy de Degradação da Terra Usando Amplitude Temporal do Índice Rain Use Efficiency–RUE–para os Biomas Cerrado e Caatinga no Brasil. *Espaço Aberto*, v. 12, n. 2, p. 265-288, 2022.
- CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. *Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco*. Alagoas, 2016.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil*. CGEE: Brasília, 2016.
- COWIE, Annette L. et al. Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science & Policy*, v. 79, p. 25-35, 2018.
- COUTINHO, L. M. *Biomas brasileiros*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- CURADO, F. F.; SANTOS, A. da S. dos; OLIVEIRA, M. de J. Sistematização de experiências agroecológicas no Território Semiárido Nordeste II, Bahia. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília, v. 31, n. 2, p. 349-380, maio/ago. 2014.
- DEMARTELAERE, A. C. F. et al. Revisão bibliográfica: impactos em áreas nativas da caatinga causadas pelas atividades econômicas e as técnicas de reflorestamento. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 4, p. 25285-25306, 2022.
- EMBRAPA. *Vetor compactado - Mapa de erodibilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil (Primeira aproximação)*. 2020. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/2924>. Acesso em: 14 jan. 2022.
- EEA - European Environment Agency. *Environmental indicators: Typology and overview*. Technical Report nº 25. Copenhagen, 1999.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Data sets, indicators, and methods to assess land degradation in drylands: report of the LADA e-mail conference, 9 October - 4 November*. Rome, 2003.
- _____. *The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994.
- FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.
- GRANJA, C. V. A. et al. Degradação Ambiental: Exploração de Gipsita no Polo Gesseiro do Araripe. *Id On Line Revista de Psicologia*, v. 11, n. 36, p. 239-267, 2017.
- GESSESEW, W. S. Application of DPSIR framework for assessment of land degradation: a review. *Forest*, v. 3, n. 1, p. 4-000, 2017.
- IBGE. *Noções básicas de cartografia*. Rio de Janeiro: IBGE, 1998.
- _____. *Censo agropecuário*. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 11 set. 2021.
- _____. *Brasil em síntese*. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>. 2021. Acesso em: 29 jul. 2021.
- IPBES. The IPBES assessment report on land degradation and restoration. MONTANARELLA, L., SCHOLES, R., AND BRAINICH, A. (Eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 2018. 744 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392>

- INPE. *LuccME e FillCell*. 2017. Disponível em: <http://luccme.ccst.inpe.br/category/download-pt/>. Acesso em: 30 out. 2023.
- NARDO, Michela. *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. OECD publishing, 2008. Disponível em: <https://www.oecd.org/els/soc/handbookonconstructingcompositeindicatorsmethodologyanduserguide.htm>.
- KOSMAS, C. et al. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach. *Environmental management*, v. 54, n. 5, p. 951-970, 2014.
- LATUF, M. O.; RIOS, G. S.; PEREIRA, R C.. Análise multitemporal de incêndios florestais ocorridos no Estado de Minas Gerais entre 2001 e 2020. *Revista Cerrados*, v. 20, n. 01, p. 120-148, 2022.
- LEAL, I. R. et al. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil. *Conservation Biology*, v. 19, n. 3, p. 701-706, 2005.
- LIMA, R. da C. C.; CURI, W. F.; SANTOS, A. P. S. do; COSTA, T. S. P. da S. Sistema de avaliação espacial do processo de desertificação no Semiárido brasileiro. *Gaia Scientia*. 2016.
- LOPES, I.; LEAL, B. G. índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da bahia e pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 17, dez. 2015. ISSN 2237-8642. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/42413/27315>>. Acesso em: 26 ago. 2022.
- MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. *Hidrovia do São Francisco*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/old/hidrovia-do-sao-francisco#:~:text=A%20hidrovia%20do%20S%C3%A3o%20Francisco,%2C%20Paracatu%2C%20Grande%20e%20Corrente>. Acesso em: 31 ago. 2022.
- MAGGINO, F.. *Complexity in society: from indicators construction to their Synthesis*. 1. ed. Roma, Itália: Springer, 2017.
- MANETA, M. P. et al. Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 96, n. 8, p. 1191-1200, 2009.
- MAPBIOMAS. Plataforma - MapBiomas - Qualidade de Pastagem, 2018. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/pastagem>. Acesso em: 29 ago 2023.
- MEDEIROS, A. H. C. et al. Análise temporal do uso do solo no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *Sustentare*, v. 2, n. 3, p. 69-79, 2018.
- PÉREZ-MARIN, Aldrin M. et al. Agroecological and social transformations for coexistence with semi-aridity in Brazil. *Sustainability*, v. 9, n. 6, p. 990, 2017.
- PÉREZ-MARIN, A.M. et al. Monitoring desertification using a small set of biophysical indicators in the brazilian semiarid region. *Sustainability*, v. 14, n. 15, p. 9735, 2022.
- PORTA, J.; POCH, R. M. DPSIR analysis of land and soil degradation in response to changes in land use. *Spanish Journal Soil Science*, v. 1, p. 100-115, 2011.
- SANTOS, Claudinei Oliveira dos et al. Assessing the Wall-to-Wall Spatial and Qualitative Dynamics of the Brazilian Pasturelands 2010–2018, Based on the Analysis of the Landsat Data Archive. *Remote Sensing*, v. 14, n. 4, p. 1024, 2022.
- SILVA, Marcos Vinícius da et al. Pilot monitoring of caatinga spatial-temporal dynamics through the action of agriculture and livestock in the brazilian semiarid. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 19, p. 100353, 2020.
- TRABUCCO, A.; ZOMER, R. J. Global aridity index and potential evapotranspiration (ET0) climate database v2. *CGIAR Consort Spat Inf*, v. 10, p. m9, 2018.

UNCCD. *Good Practice Guidance*. SDG Indicator 15.3.1. 2017. Disponível em: <https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-10/Good%20Practice%20Guidance_SDG%20Indicator%2015.3.1_Version%201.0.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

_____. Intergovernmental Negotiating Committee for the elaboration of an International Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. *General Assembly*. 1994. Disponível em: https://observatoriop10.cepal.org/sites/default/files/documents/treaties/unccd_eng.pdf. Acesso em: 6 jul. 2021.

URBAN SYSTEM. *Melhores Cidades Para Fazer Negócios 2.0*. 2020. Disponível em: https://d335luupugy2.cloudfront.net/cms/files/48668/1607610027Relatorio_MCN_Urban_2020.pudf. Acesso em: 11 ago. 2022.

VANDERLEI, Daniela Rocha; QUADROS, Cedenir Pereira; SÁ, Claudileide Silva. Geleia de bagaço de uva e chia proveniente da produção vinícola da região do submédio São Francisco. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 4237-4248, 2020.

VENDRUSCOLO, Jhony et al. Monitoring desertification in semiarid Brazil: using the Desertification Degree Index (DDI). *Land Degradation & Development*, v. 32, n. 2, p. 684-698, 2021.

VIEIRA, R. M. S. P. et al. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast, *Solid Earth*, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.