

A sustentabilidade ambiental no Brasil em 2014

RESUMO – Este artigo apresenta uma pesquisa sobre sustentabilidade, especificamente acerca do índice de sustentabilidade ambiental (ISA) nas unidades federativas do Brasil em 2014. O objetivo do trabalho foi mensurar o ISA por meio da técnica de análise fatorial com as seguintes variáveis: área plantada ou destinada à colheita, quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (produtor), consumo médio per capita de água, índice de perdas na distribuição de água, números de focos de calor, emissão de CO₂ e produção de energia elétrica. As análises foram realizadas no software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). Além da análise fatorial, foi feita uma análise de cluster, com vista a apoiar o desenvolvimento de políticas públicas mais assertivas para estados mais semelhantes em níveis de sustentabilidade. Nos resultados, foi observado que 23 unidades federativas (82,14%) estiveram em apenas um cluster, com nível alarmante para o ISA, enquanto os outros estados apresentaram um nível crítico de ISA. Foi desenvolvida, também, a análise de variância (ANOVA), na qual as variáveis emissão de CO₂ e números de focos de calor foram as que melhor diferenciaram os três clusters.

Termos para indexação: análise fatorial, desenvolvimento, meio ambiente, políticas públicas.

Environmental sustainability in Brazil in 2014

ABSTRACT – This article presents an analysis on sustainability, specifically on the Environmental Sustainability Index (ESI) of the Brazilian states in 2014. The objective of this article is to calculate the ESI using the factor analysis technique with the following variables: planted or harvested area, quantity of fertilizers supplied to the final consumer (producer), average water consumption per capita, loss rate in water distribution, number of heat spots, CO₂ emissions and electricity production. Analyses were carried out using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) software. In addition to the factor analysis, a cluster analysis was performed to support the development of more powerful public policies for states with similar levels of sustainability. The results showed that 23 states (82.14%) were placed in just one cluster, with an alarming level of ESI, whereas the other states presented a critical level of ESI. Furthermore, analysis of variance (ANOVA) was performed, and it showed that the variables CO₂ emissions and number of heat spots were the ones that best differentiated the three clusters.

Index terms: factor analysis, development, environment, public policies.

Ivan de Oliveira Holanda Filho 

Universidade Anhanguera, Polo de Apoio Presencial, Fortaleza, CE, Brasil.
E-mail: ivanfilho@gmail.com

Rubens de Oliveira dos Reis 

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
E-mail: rubens.reis@ufrgs.br

Marcos Paulo Mesquita da Cruz 

Prefeitura Municipal de Caucaia, Caucaia, CE, Brasil.
E-mail: marcospmdac@gmail.com

Filipe Augusto Xavier Lima 

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.
E-mail: filipeaxlima@ufc.br

✉ Autor correspondente

Recebido em
17/5/2024

Aprovado em
18/6/2025

Publicado em
2/12/2025

Como citar

HOLANDA FILHO, I. de O.; REIS, R. de O. dos; CRUZ, M.P.M. da.; LIMA, F.A.X. A sustentabilidade ambiental no Brasil em 2014. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.42, e27652, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2025.v42.27652>.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o debate sobre a importância da sustentabilidade se intensificou, e empresas, governos e organizações não governamentais (ONGs) estão atentos às novas exigências legais do mercado. Strobel et al. (2004) enfatiza que o enfoque econômico, antes preponderante, tem sido, aos poucos, substituído pela abordagem da sustentabilidade, em que o desenvolvimento deve priorizar a natureza. Dentro de uma perspectiva mais atual, sustentabilidade implica manter a capacidade dos sistemas ecológicos, de modo a apoiar a melhoria da satisfação dos sistemas sociais (Sakalasooriya, 2021).

Paralelamente, a variedade de definições de sustentabilidade reflete a falta de entendimento de como as funções do ecossistema podem ser afetadas, como, por exemplo, na agricultura, no curto e longo prazo (Frater & Franks, 2013). Passos & Khan (2019) postulam o argumento de que a sustentabilidade pode ser alcançada e depende da vontade política e social, devendo ser considerada uma demanda perene para o equilíbrio entre o ambiente e seres humanos.

De acordo com Abelo & Lima (2007), problemas ambientais requerem uma visão sistêmica, e a humanidade toma decisões que produzem influências desde as raízes das civilizações humanas, e essas modificações interferem em toda “a teia da vida planetária”. Desse modo, a justificativa deste estudo se baseia na dimensão e na importância do debate político e acadêmico sobre desenvolvimento econômico, sustentabilidade e qualidade de vida. A pesquisa inicia-se nessa dupla indagação norteadora: como mensurar o índice de sustentabilidade ambiental (ISA) nos estados do Brasil, e de que modo esse índice é capaz de ajudar na melhoria da sustentabilidade?

Este trabalho trata do tema esenvolvimento sustentável no Brasil e tem como objetivo geral

mensurar o ISA para o território nacional por meio da análise fatorial, uma técnica estatística. Para isso, algumas variáveis são empregadas, a saber: emissão de CO₂, índice de perdas na distribuição de água, consumo médio per capita de água, números de focos de calor, quantidade de fertilizantes entregues ao consumidor final (produtor), produção de energia elétrica em GWh e área plantada ou colhida em hectares.

É importante ressaltar que o ISA foi calculado com uma parcela dos seus indicadores (sete ao todo). Isso ocorreu porque a utilização completa dos 21 indicadores do ISA no Brasil é limitada, principalmente por falta de dados confiáveis, atualizados e padronizados em nível nacional. Além disso, a heterogeneidade metodológica entre fontes dificulta a padronização dos dados para análise conjunta, o que compromete a validade do índice com todos os 21 indicadores.

Os objetivos específicos deste ensaio são estabelecer clusters (grupos) das unidades federativas do Brasil e verificar qual ou quais variáveis se destacam para a elaboração desses grupos com vista ao desenvolvimento de políticas públicas mais assertivas. Sobre isso, Silva & Mota (2003) apontam políticas públicas relevantes baseadas na aglutinação de clusters com parques ambientais. Além disso, Fujii et al. (2017) e Cai et al. (2022) utilizaram clusters para identificar fatores determinantes na emissão de CO₂ com base em definições da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

Conforme ressaltam Brustin et al. (2020), revisões periódicas do índice devem ser feitas com o intuito de avaliar a evolução do ISA e identificar municípios que estão avançando rumo ao desenvolvimento sustentável. Ações como essas podem orientar governantes para estimular a sustentabilidade em seus estados, promovendo um melhor desenvolvimento humano e ambiental.

O texto está dividido em quatro seções. A primeira concerne ao referencial teórico, no qual são expostos aspectos do desenvolvimento sustentável, da sustentabilidade no Brasil, das dimensões da sustentabilidade e do ISA. A segunda seção é subdividida em: área de estudo e natureza dos dados, que é a descrição de cada variável utilizada na pesquisa; e os métodos de análise (análise fatorial e cluster). Na terceira seção, discutem-se os testes da análise fatorial para a formulação do índice e da análise de clusters para as unidades federativas, além da análise de variância (ANOVA). E, na quarta e última seção, são abordadas as considerações finais.

REVISÃO DE LITERATURA

Incluem-se, nesta seção, elementos teóricos sobre desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade no Brasil. Por último, explica-se o que é o ISA e sua integração a outros índices de desenvolvimento.

Desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade no Brasil

Muitas transformações aconteceram nas últimas décadas, principalmente no século XXI. Mudanças climáticas, ambientais, aumento do nível do mar, intensificação da desertificação em países do Ocidente e Oriente, números de incêndios florestais e diversos problemas sociais se agravaram mediante a produção em massa, produção em larga escala e obtenção, a qualquer custo, do lucro no desenvolvimento do capitalismo. De acordo com a análise de Goodland (1995), o meio ambiente tornou-se uma grande restrição ao progresso, e, mais importante do que a sustentabilidade social, a sustentabilidade ambiental é o suporte à vida. Na opinião de Van Den Bergh (2009), o capitalismo aumentou o consumo de bens; porém, não abrangeu outros aspectos básicos, como ar limpo nas cidades e acesso consciente à natureza.

Stoffel & Cognese (2016) assinalam que há desafios ao desenvolvimento sustentável e lembram que esse tema vem sendo discutido desde a década de 1970, quando surgiram os primeiros questionamentos sobre a capacidade do planeta de disponibilizar recursos naturais para o desenvolvimento econômico. Ainda de acordo com os mesmos autores, há, neste momento, maior consciência sobre a integração entre economia e meio ambiente, de modo a atender às necessidades atuais e, ao mesmo tempo, não sacrificar as demandas de futuras gerações.

Embora o crescimento econômico continue sendo, indiscutivelmente, um aspecto importante do desenvolvimento, existe uma nova percepção de que crescimento econômico não é necessariamente sinônimo de desenvolvimento, e vários economistas expuseram a incorporação de indicadores sociais como medidas alternativas de desenvolvimento (Aziz et al., 2015). Em 1990, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) lançou o índice de desenvolvimento humano (IDH), que contabiliza indicadores como renda, longevidade e educação, com o escopo de comparar o desenvolvimento entre países (Awan et al., 2012). Oliveira et al. (2020) mensuraram o desenvolvimento humano ao incorporarem a sustentabilidade ambiental, tendo fornecido uma perspectiva mais abrangente e possibilitado sua manutenção, pois não adianta o IDH estar elevado em um período específico, se o índice não for mantido ao longo do tempo, dada a limitação dos recursos naturais. Ghislandi et al. (2019) elenca alguns erros capazes de prejudicar a composição do IDH; entre eles, erros de medição, correlação alta entre seus componentes e inconsistência histórica. Além das críticas do autor, fatores políticos e ambientais, aspectos sobejamente importantes, não são levados em conta no índice. Não à toa, Santos & Santos (2014) consideram que nenhuma medida é suficiente para medir o desenvolvimento, e distintos indicadores servem para uma grande amplitude de propósitos.

Sendo assim, o desenvolvimento sustentável é um conceito complexo, que requer estudos ainda mais específicos devido à importância da sua temática, necessitando de ações conjuntas para um bem comum, que é a melhoria do padrão de vida da população, não somente agora, mas também para as próximas gerações.

No Brasil, há também problemas para conceituar o desenvolvimento sustentável, assim como em outros países. Conforme as reflexões de Nobre & Amazonas (2002) e Nascimento (2012), o desenvolvimento sustentável tem amplos campos de discurso, que ora se opõem e ora se complementam, sendo condicionados por posições de governos, líderes políticos, empresários e organismos multilaterais.

Candiotto & Corrêa (2004) afirmam que o País aderiu a esse paradigma na esfera político-institucional, com a utilização constante dessa temática em documentos, diretrizes, leis e decretos oficiais do governo após 1992, visando à elaboração da Agenda 21 nacional, que teve como objetivo concretizar ações que conduzissem ao desenvolvimento sustentável. Na Constituição da República Federativa do Brasil, é afirmado:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (Brasil, 1988, art.225, caput).

Ainda no tocante ao direito, na Conferência de Estocolmo foi instituído o Direito Ambiental em 1972 (Braun & Robl, 2015). Além disso, desde os anos 1970, surgiram diversas organizações não governamentais (ONGs) que se dedicam à preservação do meio ambiente com projetos educacionais e socioambientais. Em seus estudos, Scheid et al. (2010) defendem o ponto de vista de que as ONGs são efetivamente organizações que se preocupam com a sustentabilidade das localidades em todos os segmentos – econômico, social, cultural, ambiental e político.

Iaquinto (2018) propõe, em seus estudos, dez dimensões da sustentabilidade: ecológica, econômica, social, espacial ou territorial, cultural, política, jurídico-política, ética, psicológica e tecnológica. De acordo com a mesma autora, a sustentabilidade está em “pequenas práticas” em cada relação que acontece no cotidiano, e esses vínculos são importantes para a preservação e recuperação do meio ambiente.

Ferrer et al. (2014) evidenciam que a sustentabilidade, como critério básico, deve organizar a vida coletiva de modo mais democrático, com o objetivo de trazer mudanças significativas que otimizem a utilização do capital social e, assim, satisfaçam as necessidades da humanidade.

Faz-se necessário, com relação a isso, refletir os direitos fundamentais do Estado e o desenvolvimento de políticas públicas que visem combater disparidades e fomentem o acesso às condições básicas para melhores condições de vida (Garcia et al., 2020). Por isso, distintos agentes econômicos e políticos devem atuar com vista a reduzir a desigualdade social, promovendo a equidade e diminuindo a pobreza mundial.

Além da perspectiva econômica e social, problemas ambientais se agravaram nas últimas décadas no País. Nos anos 1970, intensificou-se o desmatamento da Amazônia brasileira, até então com poucas alterações. A partir de 2012, a área desmatada passou a apresentar oscilações, tendo voltado a crescer em 2015. Esse comportamento foi influenciado por mudanças na legislação ambiental e por transformações no cenário econômico do País (Messias et al., 2021; Sampaio et al., 2024).

Entre 2011 e 2015, o desmatamento na Amazônia Legal atingiu seus níveis mais baixos nas últimas duas décadas. Esse período foi marcado por uma significativa diminuição nas taxas anuais de desmatamento, conforme os dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (Prodes) do Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais (INPE, 2025). A redução pode ser atribuída a políticas públicas mais rigorosas, maior fiscalização e iniciativas de conservação implementadas na época.

Apesar das reduções temporárias, o desmatamento na Amazônia continua sendo uma preocupação, especialmente devido à expansão das pastagens. De acordo com o MapBiomas (2024), mais de 90% das áreas desmatadas entre 1985 e 2023 tiveram como primeiro uso a pastagem. Nesse período, a área destinada a pastagens cresceu mais de 363%, tendo passado de aproximadamente 12,7 milhões de hectares para 59 milhões de hectares, o que representa cerca de 14% da área total da Amazônia em 2023.

A região conhecida como AMACRO, que abrange parte dos estados do Acre, Amazonas e Rondônia, foi particularmente afetada, com a área de pastagem aumentando 11 vezes, resultando na perda de quase toda a vegetação nativa nesse território (MapBiomas, 2024). Esses dados reforçam a necessidade urgente de políticas eficazes para conter a expansão das pastagens e promover o uso sustentável da terra na Amazônia.

Sob essa visão, Müller (2019) chama a atenção para o embate de organizações e o planejamento da economia, que colidem com o meio ambiente, o que torna a economia a maior vilã em relação à degradação do meio ambiente. Outro ponto de destaque é que mudanças de padrões de produção não estão dissociadas de decisões políticas, e a desconsideração dessa premissa é passível de causar uma despolitização do desenvolvimento sustentável; porém, a política é necessária no processo de mudanças (Nascimento, 2012).

Muitos aspectos que envolvem sustentabilidade estão sendo desenvolvidos em várias dimensões e debates; no entanto, pesquisas e políticas públicas assertivas fazem-se ainda mais necessárias no contexto atual do Brasil e do mundo.

O índice de sustentabilidade ambiental (ISA)

Diversos índices e indicadores que incorporam as noções de desenvolvimento e meio ambiente são estudados na literatura, tais como o índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM), o índice municipal de qualidade do meio ambiente (IQM), o índice de qualidade de vida humana (IQVH), o Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC-BR), entre outros. No caso do presente trabalho, pretende-se explorar o índice de sustentabilidade ambiental (ISA). O ISA foi criado em 2002 por pesquisadores das universidades de Yale e Columbia e oferecido ao Fórum Econômico Mundial. Martins et al. (2006) esclarecem que, na sua primeira versão, o índice continha 69 variáveis referentes a 20 indicadores, e, em 2005, o ISA foi calculado para 146 países, com um total de 21 indicadores, cada um recebendo o mesmo peso. Esse índice denota atualizações anuais e tem como objetivo relacionar aspectos ambientais do presente e de futuras gerações, sendo esse um destaque do ISA. A elaboração desse índice é complexa (Martins et al., 2006). Para o estudo do ano de 2005, não foi possível extrair dados de referência para todas as suas variáveis.

Aspectos como qualidade do solo, do ar e da água, assim como fatores ligados à biodiversidade, são integrados à sustentabilidade ambiental. Em se tratando de sustentabilidade ambiental, ela divide-se em grandes eixos: biodiversidade, solo e disponibilidade de recursos hídricos e ar, e cada um desses eixos possui variáveis mensuráveis (Pereira et al., 2016). Pillarisetti & Van den Bergh (2010) fazem uma crítica ao ISA. Explicam que o indicador “ecoeficiência” recebe o mesmo peso que o indicador “sustento humano básico”, o que torna o ISA um índice tanto social como ambiental, de maneira igualitária.

Siche et al. (2007) e Teixeira et al. (2017) consideram que o ISA fornece apoio à tomada de decisões na temática ambiental e que esse

índice tem a capacidade de fornecer informações de caráter técnico e científico. É comum, no entanto, autores analisarem o ISA e agregarem esse índice ao IDH, criando, assim, o índice de desenvolvimento humano-ambiental (IDH-A). Maccari (2014), por exemplo, integrou o IDH ao ISA em estudos com 129 países. Já Oliveira & Sousa (2020b) realizaram um estudo de sustentabilidade nacional de 2010 a 2014 com o ISA. Obtiveram níveis críticos para nove estados pertencentes às regiões Norte e Nordeste do Brasil. Brustin et al. (2020), por sua vez, fizeram adaptações de variáveis para o cálculo do ISA nos municípios de Maringá e Sarandi, no Paraná, tendo os autores utilizado médias ponderadas dos indicadores que integram o índice.

Sem dúvida, existem muitas metodologias para a concepção de índices qualitativos e quantitativos. De acordo com Thomaz et al. (2011), esses índices não devem ser analisados isoladamente, mas comparados entre si, a fim de se obterem conclusões fidedignas quanto ao que está sendo analisado.

METODOLOGIA

Nesta seção, encontram-se as variáveis selecionadas, suas respectivas fontes de dados e estudos de autores que utilizaram as mesmas variáveis em suas pesquisas. E, ainda, são apresentadas as características do método da análise fatorial para composição do ISA, e a análise de cluster para as unidades federativas do estudo.

Área de estudo e natureza dos dados

A área de estudo deste trabalho considera as unidades federativas do Brasil. Constitui uma abordagem quantitativa, e a pesquisa tem características descritivas e explicativas. Foram utilizados indicativos secundários, e todas as variáveis selecionadas são do ano de 2014, elencadas na Tabela 1.

A escolha dessas variáveis ocorreu porque elas podem ser utilizadas para fornecer informações importantes sobre o meio ambiente.

Tabela 1. Variáveis para composição do ISA e fontes de dados.

| Variável | Fonte de dados | Estudo de outros autores |
|--|--|---------------------------------|
| Área plantada ou destinada à colheita (hectares) | Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2014 (ANDA, 2015); produção agrícola municipal 2014 (IBGE, 2015) | Pereira et al. (2016) |
| Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (toneladas) | Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2014 (ANDA, 2015); produção agrícola municipal 2014 (IBGE, 2015) | Costantini & Monni (2005) |
| Consumo médio per capita de água (litros) | Diagnósticos dos serviços de água e esgotos – 2010 (SNIS, 2015) | Oliveira & Sousa (2020a, 2020b) |
| Índice de perdas na distribuição de água (litros) | Diagnósticos dos serviços de água e esgotos – 2010 (SNIS, 2015) | Oliveira & Sousa (2020a, 2020b) |
| Números de focos de calor | Queimadas: monitoramento de focos (INPE); CPTEC; IBGE (2017) | Oliveira & Sousa (2020a, 2020b) |
| Emissão de CO ₂ (toneladas) | Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2017) | Martins et al. (2014) |
| Produção de energia elétrica (em GWh) | Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), vinculada ao Ministério de Minas e Energia | Maccari (2014) |

Fonte: adaptado de Oliveira & Sousa (2020b).

Além de realizar comparações com tais métricas, é possível fazer o seu monitoramento, evidenciando políticas públicas que forneçam qualidade de vida e governança ambiental.

Embora o ISA seja originalmente composto por 21 indicadores¹ agrupados em 5 componentes temáticos, esta pesquisa limitou-se a utilizar 7 desses indicadores. A escolha restrita decorreu, sobretudo, da indisponibilidade de dados atualizados, confiáveis e padronizados para todos os 21 indicadores no contexto brasileiro em 2014. O recorte foi feito seguindo-se os pressupostos de Martins et al. (2006), para quem a elevada heterogeneidade metodológica entre fontes nacionais, assim como a incompatibilidade temporal das séries, inviabiliza a incorporação de todos os indicadores propostos internacionalmente. Além disso, alguns indicadores enfrentaram restrições adicionais por apresentarem cobertura geográfica muito limitada, o que comprometeu sua representatividade em nível internacional e/ou nacional para o caso do Brasil.

O índice de sustentabilidade é uma ferramenta de medição que agrega diversos indicadores e/ou dimensões em um único valor comparável, permitindo uma avaliação mais abrangente e integrada da sustentabilidade (Singh et al., 2007). Essa abordagem é essencial para captar a complexidade e a natureza multidimensional do conceito de sustentabilidade, o que dificilmente seria alcançado por meio da análise isolada de indicadores individuais.

A presente pesquisa fez, portanto, uma adaptação do trabalho de Oliveira & Sousa (2020b) com diferentes ponderações atribuídas pelas autoras. Sendo assim, foram utilizadas as mesmas variáveis que as do trabalho supracitado, com a inclusão da variável produção de energia elétrica (em GWh); e a substituição da variável área plantada com as principais culturas por área plantada ou destinada à colheita (em hectares).

¹

Dado que sistemas complexos são dinâmicos e resilientes, é essencial revisar periodicamente os indicadores e seus respectivos pesos, especialmente os complementares, para refletir mudanças nas condições que fundamentam sua construção. Feil & Schreiber (2017) enfatizam que os índices de sustentabilidade oferecem uma visão estática do sistema avaliado, mas ganham caráter dinâmico quando analisados ao longo do tempo, permitindo identificar tendências de avanço ou retrocesso na sustentabilidade.

Em Singh et al. (2012), por exemplo, o cálculo do ISA² exige informações detalhadas sobre externalidades ambientais, distribuição de renda, consumo de recursos naturais e outros elementos que, em países como o Brasil, muitas vezes são incompletos, inconsistentes ou não sistematizados em bases estatísticas oficiais. Essa carência compromete a acurácia e a comparabilidade dos resultados ao longo do tempo ou entre diferentes regiões.

Outro desafio está na valoração monetária de bens e serviços não mercantis, como trabalho doméstico não remunerado, degradação ambiental ou perda de biodiversidade. A tentativa de converter esses fatores em unidades monetárias envolve forte grau de subjetividade e dependência de premissas normativas, o que pode distorcer a realidade social e ambiental dos países em desenvolvimento. Esse problema é agravado pela diversidade socioeconômica e ecológica brasileira, que torna inviável a aplicação de métricas padronizadas em escala nacional.

A presente análise deve ser interpretada como uma aplicação adaptada do ISA,

² O ISA foi desenvolvido pelos pesquisadores das universidades de Yale e Columbia, tendo sido calculado em 2005 para 146 países. Seus 21 indicadores são: qualidade do ar, biodiversidade, solo, qualidade da água, quantidade da água, redução da poluição do ar, redução da poluição do ecossistema, redução do desperdício e consumo, redução da pressão demográfica, redução da poluição da água, gestão dos recursos naturais, saúde ambiental, subsistência básica, exposição a desastres naturais, governança ambiental, ecoeficiência, capacidade de resposta da iniciativa privada, ciência e tecnologia, participação internacional em esforços colaborativos, emissão de gases de efeito estufa, e redução de “transbordamentos” ambientais.

destacando-se que os sete indicadores utilizados representam uma subconjuntura ambiental relevante, porém, não exaustiva, do escopo do índice original.

Métodos de análise

Análise fatorial

O cálculo do ISA foi realizado no software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) por meio da análise fatorial (AF). Segundo Hair et al. (2009), a estrutura de variáveis deve ser analisada; por isso, a análise fatorial ou a análise fatorial confirmatória são as técnicas recomendadas. Nessa experimentação, não foram feitas hipóteses prévias. Então, utilizou-se a técnica fatorial exploratória. Marôco (2014) ensina que, na AF, a análise exploratória de dados visa analisar uma estrutura de um conjunto de variáveis inter-relacionadas, cujo objetivo é estabelecer uma escala de medidas para os fatores. Os fatores controlam as variáveis originais, como mostra a Equação 1 (equação da análise exploratória):

$$X_i = \alpha_{i1}F_1 + \alpha_{i2}F_2 + \dots + \alpha_{im}F_m + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots p) \quad (1)$$

em que

X_i = i-ésimo escore da variável em análise.

α_i = constante (carga fatorial) que mede a importância dos fatores da composição de cada variável.

F_m = fatores aleatórios (comum a variáveis).

ε_i = componente aleatório.

Fávero & Belfiore (2017) explicam que o primeiro fator F_1 é formado pelo maior valor percentual de variância compartilhada das variáveis de origem, e a adequação global da extração dos fatores é executada por testes estatísticos.

Para o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), foi utilizado o critério de Hair et al. (2009) de adequação da AF. Considera-se 0,90–1,00: muito bom; 0,80–0,89: bom; 0,70–0,79: médio; 0,60–0,69: razoável; 0,50–0,59: ruim; e < 0,50: inaceitável. Os valores do teste de KMO variam entre 0 e 1. Em consonância com Hair et al. (2009) sobre a análise fatorial, os agrupamentos são feitos pela correlação das variáveis, de modo que variáveis em um grupo (fator) tenham elevadas correlações umas com as outras.

Bezerra & Lima (2022), em estudo sobre o desenvolvimento rural no Ceará, utilizam a AF para o estudo da correlação de variáveis com os fatores, e, ao estimarem-se os fatores, é obtida a medida *eigenvalue* (autovalor), também conhecida como raiz característica. Desse modo, os autovalores mostram a variância explicada por parte de cada fator.

Com todas as especificidades e a quantidade de fatores determinada, é feita a rotação deles. Dois métodos são empregáveis: ortogonais e oblíquos. No presente ensaio, adotou-se o método de rotação ortogonal, especificamente, o método Varimax. De acordo com Fávero et al. (2009), esse método minimiza o número de variáveis com altas cargas, ou seja, tem o objetivo de simplificar uma variável para um único fator.

Em conformidade com Oliveira & Sousa (2020b), o ISA é calculado pelo somatório entre o escore atribuído a cada variável e o termo de ponderação referente aos indicadores, algebraicamente representado na Equação 2 (equação do índice de ISA), a seguir:

$$ISA = p_1.I_1 + p_2.I_2 + \dots + p_n.I_n \quad (2)$$

em que

I = indicadores de sustentabilidade.

p = termos de ponderação dos indicadores.

Nessa pesquisa, a ponderação dos indicadores de sustentabilidade foi obtida pelos

pesos (p_i) atribuídos a cada variável. Carneiro Neto et al. (2008) e Oliveira & Sousa (2020a) utilizaram a mesma estimativa para o cálculo dos índices de sustentabilidade agroambiental e do índice de sustentabilidade ambiental, respectivamente. A Equação 3 representa a ponderação dos indicadores (cômputo do termo de ponderação dos indicadores).

$$p_i = \frac{(F_1 \cdot C_1) + (F_2 \cdot C_2) + \dots + (F_i \cdot C_i)}{(F_1 \cdot \sum^n C_1) + (F_2 \cdot \sum^n C_2) + \dots + (F_i \cdot \sum^n C_i)} \quad (3)$$

Em consonância com Oliveira & Sousa (2020b) e Frainer et al. (2017), foi utilizada a seguinte classificação, de ideal a crítico: valores do ISA de 0,7501 a 1: ideal; valores de 0,5001 a 0,7500: aceitável; valores de 0,2501 a 0,5000: alerta; e valores de 0 a 0,2500: crítico. A ponderação dos indicadores foi feita por meio da adaptação de Pereira et al. (2016), em estudos de mensuração do índice de sustentabilidade para o Mato Grosso do Sul com a frequência de citação das dimensões analíticas do ISA, conforme a Tabela 2.

A adoção da ponderação por frequência das dimensões analíticas (Pereira et al., 2016) constitui uma estratégia metodológica fundamentada e coerente com os referenciais internacionais sobre sustentabilidade. Essa abordagem permite que o cálculo do ISA reflita a relevância empírica de cada dimensão com base em sua recorrência nos principais índices

Tabela 2. Ponderação dos indicadores do ISA.

| Variáveis | Pesos |
|--|-------|
| Área plantada ou destinada à colheita (hectares) | 0,375 |
| Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (toneladas) | 0,25 |
| Consumo médio per capita de água | 1 |
| Índice de perdas na distribuição de água | 1 |
| Números de focos de calor | 0,5 |
| Emissão de CO ₂ | 0,875 |
| Produção de energia elétrica (em GWh) | 0,5 |

mundiais, como o índice da performance ambiental (EPI), *environmental sustainability index* (ESI) e o índice de desenvolvimento sustentável (IDS). Assim, ao atribuir-se maior peso às dimensões mais frequentemente citadas, tais como água, biodiversidade, ar e solo, deve-se priorizar aspectos amplamente reconhecidos como críticos para a sustentabilidade ambiental.

Tal escolha metodológica reduz a subjetividade na atribuição de pesos, fortalece a comparabilidade do índice com métricas já consolidadas e orienta a formulação de políticas públicas mais alinhadas com os desafios ambientais prioritários da região.

Ao adaptar-se essa lógica ao contexto nacional, como no estudo do ISA para o Brasil em 2014, potencializa-se a capacidade do índice de captar as variáveis ambientais mais críticas, com base em um referencial validado globalmente, o que torna o ISA mais robusto e tecnicamente fundamentado para subsidiar políticas públicas.

Análise de cluster

Segundo Fávero et al. (2009), a análise de cluster (agrupamentos) é uma técnica estatística de interdependência para agrupar sujeitos e variáveis em grupos homogêneos com base no grau de semelhança dos indivíduos em relação às variáveis já predeterminadas. Ainda de acordo com o autor, essa técnica é considerada uma análise exploratória ou de interdependência, em que suas aplicações não denotam caráter preditivo para outras observações iniciais da amostra.

Campos & Carvalho (2007) explicam que a análise de agrupamentos utiliza o conceito de distância entre as unidades de classificação. Entre as distâncias como mensuração, a distância geométrica no espaço multidimensional é uma das mais conhecidas, chamada de distância euclidiana, conforme descrita na Equação 4.

$$D(X_p, X_k^A) = [\sum_{i=1} (X_{il} - X_{ik})^2]^{1/2} \quad (4)$$

em que

$Xl, Xk (1 \neq k)$ são comparados em seus níveis pertencentes ao vetor de observações (Campos & Carvalho, 2007).

Os elementos de um mesmo grupo devem ser o mais semelhantes possível entre si, e, quanto à diferenciação entre os grupos, essa diferença deve ser a maior possível. A distância euclidiana é ordinariamente utilizada, ou, ainda, o coeficiente de correlação (Gong & Richman, 1995).

Na análise factorial, dois métodos para combinação dos elementos entre os grupos são utilizados: os métodos hierárquicos e os não hierárquicos. Nos métodos hierárquicos, grupos são formados por níveis distintos de distância ou semelhança; já no método não hierárquico, é evidenciado que, no conjunto de grupos estabelecido, os elementos se agrupam simultaneamente, e assim é possível deslocar os elementos (Campos & Carvalho, 2007). Neste estudo, recorreu-se ao método hierárquico, cabendo ao pesquisador fazer ponderações acerca de qual método é melhor para sua pesquisa. Ainda nesse tocante, foi empregada a metodologia aglomerativa do “vizinho mais próximo” ou, ainda, método de ligação simples. Em Hair et al. (2009), tal abordagem é provavelmente o algoritmo aglomerativo mais versátil e define uma vasta gama de padrões de aglomeração.

Foram selecionados três clusters para separar as unidades federativas com baixo e/ou baixíssimo ISA, valor intermediário e valores mais elevados na amostra. Realizou-se, ainda, a análise de variância (ANOVA), tendo sido possível identificar as variáveis que melhor separam os clusters. França et al. (2019) utilizaram a ANOVA para analisar a diferença entre três ou mais médias no estudo de sustentabilidade ambiental nos estados produtores de refeições de clubes paulistanos. Em Fávero et al. (2009), a discriminação dos grupos é visualizada com as variáveis com maior valor de estatística F.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentadas a estatística descritiva das variáveis que compõem o ISA, a análise factorial do índice e a análise de cluster.

Análise descritiva das variáveis do ISA

Na Tabela 3, observa-se a estatística descritiva, na qual o estado do Mato Grosso tem o valor máximo de quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (produtor), enquanto o Acre tem o menor valor. O consumo per capita de água tem valor médio de 151,454 litros, com o valor máximo para o Rio de Janeiro e mínimo para o estado de Alagoas. Ainda sobre a variável perdas de água, ela teve variância de 152,885, com destaque para o Amapá, com valor máximo de 78,20, e valor mínimo de 27,10 para o Distrito Federal.

A variável número de focos de calor deve ser analisada mais atentamente. Em concordância com Oliveira & Sousa (2020b), Pará e Maranhão estão com números elevados, e Sergipe tem o valor mínimo para essa variável. As mesmas autoras realizaram estudos que compararam os anos de 2010 e 2014, e houve diminuição dos números de focos de calor de maneira geral, porém, ainda assim, esse quantitativo é alto no Brasil.

Santos et al. (2020) constataram que as queimadas no Pará são recorrentes e contribuem, negativamente, tanto para o aumento da emissão de gases do efeito estufa quanto para a redução da biodiversidade das áreas afetadas. Ainda de acordo com os autores, as queimadas são um dos principais problemas ambientais no Brasil, criando graves ameaças à biodiversidade. As queimadas e o desmatamento são responsáveis por externalidades no meio ambiente que influenciam, direta e negativamente, a qualidade da água e do ar e a saúde das pessoas, além de afetarem a economia e a produção do País, sendo passíveis, inclusive, de produzirem efeito global (Barbosa, 2021).

Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis que compõem o ISA das unidades federativas em 2014.

| Variáveis | Média | Variância | Amplitude | Mínimo | Máximo |
|--|----------------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor (toneladas) | 519.209,26 | 552.467.931.376,89 | 2.517.696,00 | 853,00 | 2.518.549,00 |
| Consumo médio per capita de água (litros) | 151,454 | 1.040,386 | 150,02 | 100,79 | 250,81 |
| Índice de perdas na distribuição de água (litros) | 43.2711 | 152,885 | 51,10 | 27,10 | 78,20 |
| Números de focos de calor | 6.343,815 | 78.882.350,234 | 35.437,0 | 89,0 | 35.526,0 |
| Emissão de CO ₂ (toneladas) | 69.583.803,030 | 4.176.591.781.557.060,000 | 240.861.967,000 | 5.438.341,000 | 246.300.308,000 |
| Produção de energia elétrica (GWh) | 21.869,593 | 551.000.800,712 | 98.707,0 | 127,0 | 98.834,0 |
| Área plantada ou destinada à colheita (hectares) | 2.823.365,333 | 14.033.902.729.119,700 | 13.570.754,000 | 43.172,000 | 13.613.926,000 |

Quanto à emissão de CO₂, em 2014, o estado do Pará tem valor máximo para a variável, enquanto o Amapá tem o mínimo. A média dessa variável é alta (69.583.803,030), afetando os biomas do País. A produção de energia elétrica tem uma grande variância, com destaque nacional de produção para o Paraná e baixo valor de produção para o Distrito Federal. É importante verificar que, muitas vezes, a produção de energia pode não ser consumida em sua totalidade por um estado, e, assim, a energia pode ser distribuída para outros estados. O estado gerador dessa energia causa, frequentemente, impactos ambientais significativos na região.

Por último, a área plantada ou destinada à colheita tem valor máximo e mínimo, respectivamente, para Mato Grosso e Amapá, com média entre as unidades federativas de 2.823.365,333 e amplitude de 13.570.754,000. Não à toa, a agricultura tem um papel fundamental na economia e é objeto de evolução constante, principalmente com a modernização da agricultura (Seidlle & Fritz Filho, 2016).

Análise fatorial para o ISA

No início da análise fatorial, foi realizado o teste KMO. Segundo Hair et al. (2009), são valores aceitáveis aqueles de 0,5 a 1,0. Nesta pesquisa, obteve-se como resultado o valor de 0,55, ou seja, um pouco acima do aceitável, que é 0,5.

O teste de esfericidade de Bartlett também foi verificado com valor abaixo de 5% de significância, no qual se rejeita a hipótese nula de que a matriz de correlação seja uma matriz identidade. A seguir, a Tabela 4 contém informações das variáveis em três fatores com raízes características superiores a 1. Os três fatores conjuntos correspondem a 84,19% da variância total dos dados. Valores semelhantes foram encontrados em Oliveira & Sousa (2020a) no estudo do índice de sustentabilidade ambiental dos estados brasileiros, também com três fatores.

O primeiro fator explica quase 50% da variância total. O segundo fator explica 20,65% da variância, e o terceiro explica apenas 14,76% dos dados. A seguir, na Tabela 5, observa-se que todas as comunidades têm valores maiores que 0,5; assim sendo, mais de 50% da variância foi reproduzida pelos pesos fatoriais (Norusis, 1990).

Ainda na Tabela 5, adiante, verifica-se que C₁ expressou maior associação com quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (produtor); área plantada ou destinada à colheita; e emissão de CO₂. Para C₂, houve maior associação para as variáveis “índice de perdas na distribuição de água” e “números de focos de calor”; e para C₃, um maior poder associativo com consumo médio per capita de água. Gallopin (1997) argumenta que valores negativos são explicados por questões altamente complexas

Tabela 4. Raiz característica e variância da matriz de correlação.

| Fatores | Raiz característica | Variância explicada pelo fator | Variância acumulada (%) |
|---------|---------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1 | 3,415 | 48,78 | 48,78 |
| 2 | 1,445 | 20,65 | 69,43 |
| 3 | 1,033 | 14,76 | 84,19 |

Tabela 5. Matriz de cargas fatoriais para variáveis para o ISA.

| Variáveis | Componente | | | Comunalidade |
|--|------------|--------|--------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| Área plantada ou destinada à colheita | 0,883 | 0,043 | -0,382 | 0,928 |
| Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor | 0,894 | 0,020 | -0,346 | 0,919 |
| Consumo médio per capita de água | 0,262 | -0,512 | 0,706 | 0,831 |
| Índice de perdas na distribuição de água | -0,521 | 0,616 | -0,070 | 0,655 |
| Números de focos de calor | 0,452 | 0,743 | 0,419 | 0,933 |
| Emissão de CO ₂ | 0,848 | 0,371 | 0,297 | 0,944 |
| Produção de energia elétrica em GWh | 0,756 | -0,334 | -0,022 | 0,684 |

no âmbito da sustentabilidade, e um indicador, por exemplo, é capaz de ter impacto negativo em um aspecto e positivo em outro. Comparando-se este trabalho com o estudo de Oliveira & Sousa (2020b), as comunalidades foram todas maiores, com exceção da variável “índice de perdas na distribuição de água”.

Após a elaboração da matriz de cargas fatoriais, foi feita a estimativa do peso (p_i) de cada variável conjuntamente em função das raízes características (autovalores). A Tabela 6 mostra a matriz de coeficientes e os pesos (p_i).

O mesmo procedimento foi realizado por Palácio (2004) na elaboração do índice de qualidade da água; Lopes et al. (2009), na obtenção do índice de sustentabilidade do perímetro urbano; Oliveira & Sousa (2020b), na comparação do índice de sustentabilidade ambiental dos estados brasileiros em 2010 e 2014; e Oliveira & Sousa (2020a), em pesquisa sobre o desenvolvimento sustentável no Brasil. Os maiores valores do índice significam maior sustentabilidade, e quanto menor esse valor, menor o nível de sustentabilidade, como

explicado na metodologia. Após a definição dos pesos associados aos indicadores de sustentabilidade, determinou-se o ISA de acordo com a Equação 1 para cada unidade federativa.

No geral, os estados têm valores altos para a variável índice de perdas na distribuição de água e para números de focos de calor, com médias respectivas de 43,2711 litros e 6.343,815. Em Silveira (2018), a utilização de energia elétrica é predominante; porém, essa produção energética acarreta diversos e graves impactos sociais e ambientais, tais como: deslocamento de comunidades locais, perda de biodiversidade devida ao alagamento de áreas extensas e emissão de gases de efeito estufa provenientes da decomposição de matéria orgânica submersa.

Ainda na temática energética, Santos et al. (2008) chamam a atenção para a intensificação de metano (CH₄) gerado nos reservatórios das hidrelétricas, que intensifica o efeito estufa. Nesse tocante, Andrade & Mattei (2013) destacam a emissão de CO₂ liberado na decomposição de árvores que são inundadas e ficam acima da superfície, decorrente das construções de

Tabela 6. Matriz de coeficientes (escores) e pesos (p_i) associados ao ISA.

| Variáveis | Componente | | | Pesos |
|--|------------|-------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| Área plantada ou destinada à colheita (hectares) | 0,937 | 0,220 | -0,029 | 0,260 |
| Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor | 0,931 | 0,227 | 0,014 | 0,262 |
| Consumo médio per capita de água | -0,062 | 0,108 | 0,903 | 0,065 |
| Índice de perdas na distribuição de água | -0,497 | 0,186 | -0,611 | -0,153 |
| Números de focos de calor | 0,062 | 0,961 | -0,073 | 0,114 |
| Emissão de CO ₂ | 0,514 | 0,798 | 0,208 | 0,233 |
| Produção de energia elétrica em GWh | 0,702 | 0,077 | 0,431 | 0,219 |

hidrelétricas, ou em seus reservatórios. Sendo assim, a problemática energética da construção e manutenção de hidrelétricas pode estar relacionada a diversos outros fatores, como a emissão de metano e gás carbônico na atmosfera.

Na Tabela 7, visualiza-se que 81,48% dos estados estão em nível crítico, e 18,52% em nível de alerta. Por isso, ações emergentes precisam ser feitas no País, demandando a melhoria da sustentabilidade.

Tabela 7. Frequências absoluta e relativa do ISA das unidades federativas de 2014.

| ISA | Frequência absoluta | Frequência relativa (%) |
|-----------|---------------------|-------------------------|
| Ideal | 0 | 0 |
| Aceitável | 0 | 0 |
| Alerta | 5 | 18,52 |
| Crítico | 22 | 81,48 |
| Total | 27 | 100 |

Comparando-se os achados de Oliveira & Sousa (2020b)³ com os resultados deste estudo, observou-se que, neste estudo, a maioria dos estados está em situação crítica, e nenhum estado está em condições aceitáveis, diferentemente do que ocorreu no experimento

³ No trabalho de Oliveira & Sousa (2020b), foram empregados os mesmos indicadores que os do presente estudo, tendo como única diferença a variável que trata dos fertilizantes. Enquanto, na pesquisa das autoras, a variável utilizada é a quantidade de fertilizantes por unidade de área, aqui, utiliza-se quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final (produtor).

citado, em que as autoras obtiveram 4 estados com nível aceitável e 14 em alerta.

Análise de cluster para o ISA

Para a análise de cluster, foi utilizado o método hierárquico, como já exposto na metodologia. Na Tabela 8, identifica-se a composição de cada um dos três clusters selecionados. O cluster 1 é o maior grupo, com 23 unidades federativas, e, nesse cluster, o ISA varia de 0 a 0,27.

Os estados não diferem muito no ISA e têm, como já expresso, nível crítico ou em alerta. Os clusters 2 e 3 têm apenas duas unidades federativas. O cluster 2 tem ISA de 0,33 para o estado do Pará e 0,34 para Mato Grosso. Já o cluster 3 apresenta ISA de 0,23 para Minas Gerais e de 0,32 para o estado de São Paulo.

Apesar de Minas Gerais possuir um ISA mais baixo e ter características para estar no cluster 1, o estado apresenta valores muito próximos em algumas variáveis, quando comparado ao estado de São Paulo, como, por exemplo, o índice de perdas na distribuição de água, a emissão de CO₂ e o consumo médio per capita de água. Mais do que isso, Minas Gerais tem o maior número de municípios do Brasil (853), enquanto São Paulo ocupa o segundo lugar, com 645 municípios, de acordo com o IBGE. Essas são semelhanças que justificam o fato de esses dois estados estarem no mesmo cluster.

Tabela 8. Os três clusters das unidades federativas do Brasil utilizados para o ISA.

| Cluster 1 | Cluster 2 | Cluster 3 |
|---------------------|------------------|------------------|
| Rondônia | Pará | Minas Gerais |
| Acre | Mato Grosso | São Paulo |
| Amazonas | | |
| Amapá | | |
| Roraima | | |
| Tocantins | | |
| Maranhão | | |
| Alagoas | | |
| Piauí | | |
| Rio Grande do Norte | | |
| Sergipe | | |
| Ceará | | |
| Paraíba | | |
| Pernambuco | | |
| Espírito Santo | | |
| Bahia | | |
| Rio de Janeiro | | |
| Paraná | | |
| Santa Catarina | | |
| Rio Grande do Sul | | |
| Goiás | | |
| Mato Grosso do Sul | | |
| Distrito Federal | | |

A Tabela 9 mostra o resumo descritivo que complementa a Tabela 8. Infelizmente, nenhum estado se configura como ideal ou aceitável de acordo com o ISA. São 23 estados, pertencentes ao cluster 1, que estão com valores críticos e/ou em alerta. Portanto, mudanças são necessárias no cenário nacional para elevar o ISA a níveis aceitáveis.

Tabela 9. Resumo descritivo dos clusters.

| Descrição dos clusters | Distribuição dos resumos | |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Absoluto | Percentual (%) |
| Cluster 1 | 23 | 82,14 |
| Cluster 2 | 2 | 8,93 |
| Cluster 3 | 2 | 8,93 |
| Total | 27 | 100 |

Os níveis críticos e alarmantes encontrados estão, de certo modo, relacionados ao número de crimes ambientais que aumentam a cada dia. Takada & Ruschel (2012) recomendam que leis mais rigorosas sejam criadas em consonância com a crescente criminalidade ambiental no País. Como enfatizam Oliveira & Sousa (2020b), o monitoramento e o cumprimento das leis ambientais são vitais e pertinentes ao poder público.

Por fim, entre as variáveis que mais contribuíram para a formação dos clusters, emissão de CO₂ e números de focos de calor foram destaques na ANOVA, o que evidencia que esses são os obstáculos mais graves para o desenvolvimento sustentável no Brasil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria da qualidade de vida das pessoas é o objetivo central dos governantes dos países. Aspectos ambientais são constantemente abordados e atrelados à economia e ao comportamento dos agentes sociais e políticos, que, juntos, procuram minimizar e/ou solucionar problemas decorrentes dos impactos da ação antrópica na natureza. De acordo com o objetivo deste trabalho, foi oferecida uma proposta de mensurar o ISA das unidades federativas no ano de 2014, por meio da análise fatorial.

Em suma, o índice mostrou valores críticos e alarmantes para os estados brasileiros. Altas taxas de emissão de CO₂, focos de calor, aumento do consumo de energia elétrica e perdas de água na distribuição têm grande efeito no meio ambiente, devendo ser encarados pelos governantes como problemas relevantes que devem ser solucionados.

Constatou-se que problemas ambientais também estão relacionados com manejo e uso do solo que interferem na qualidade da água e do ar, afetando também a biodiversidade. Torna-se evidente que um problema ambiental tem consequências graves que comprometem

a conservação da vida no médio e longo prazo. Entende-se que a construção do índice e a análise conjunta de agrupamentos, como expressados neste artigo, são de grande valia para a melhoria da sustentabilidade por meio de coleta de dados, monitoramento, avaliações e ações coordenadas de políticas públicas.

Os dados analisados revelaram avanços pontuais no combate ao desmatamento e à degradação ambiental na Amazônia, especialmente entre 2011 e 2015, mas também evidenciaram retrocessos recentes, associados, principalmente, à expansão das pastagens. Nesse contexto, é urgente que os estados amazônicos adotem estratégias mais robustas e específicas para alcançar um desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

Certamente, para promover um sistema de gestão ambiental mais eficaz e integrado, cada estado deverá estabelecer suas próprias metas e indicadores com base em variáveis estratégicas referentes à área plantada, uso de fertilizantes, consumo e perdas de água, focos de calor, emissões de CO₂ e produção de energia. A criação de indicadores estaduais possibilitaria o acompanhamento contínuo dos impactos ambientais e o desenvolvimento de políticas que atendessem às necessidades e potencialidades locais de forma específica. Com efeito, os dados obtidos podem embasar decisões e ações sobre planejamento territorial, uso responsável dos recursos naturais e promoção de uma produção mais sustentável, complementando a transição ecológica das economias regionais.

Para além das diretrizes gerais, recomenda-se que os governos estaduais implementem as seguintes medidas: fortalecimento dos sistemas de monitoramento em tempo real, como o Deter (Detecção de Desmatamento em Tempo Real) e o MapBiomas Alerta, com parcerias locais, para ampliar a capacidade de resposta rápida às infrações ambientais; criação de incentivos fiscais e creditícios para produtores que adotem

práticas de agricultura e pecuária de baixo impacto, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o manejo florestal sustentável; regularização fundiária ambientalmente orientada, condicionando o acesso a títulos e créditos ao cumprimento do Código Florestal e à recomposição de áreas de reserva legal e de preservação permanente; valorização e financiamento da bioeconomia local, com fomento à cadeia de produtos não madeireiros, extrativismo sustentável e turismo de base comunitária; ampliação de unidades de conservação e territórios indígenas, garantindo recursos para gestão e fiscalização dessas áreas; e educação ambiental de base e formação técnica voltada à sustentabilidade, tanto no ensino fundamental e médio quanto em capacitações para pequenos produtores e comunidades tradicionais.

Ao mesmo tempo, o Estado tem o dever de regulamentar, articular, controlar e fiscalizar, criando mecanismos para a proteção e uso sustentável do meio ambiente, e, assim, intervir em atividades que afetam diretamente a natureza. Assim sendo, sugere-se a continuidade de estudos do ISA com outras metodologias estatísticas e/ou econometrísticas que avancem nas estratégias de sustentabilidade do País. Outra possibilidade é a integração do ISA com outros índices, como o IDH, por exemplo, no intuito de amplificar a mensuração do desenvolvimento com acepções sociais, ecológicas e econômicas.

REFERÊNCIAS

ABELO, L.S.; LIMA, P.V.P.S. Indicadores de Sustentabilidade: a possibilidade da mensuração do desenvolvimento sustentável. **REDE-Revista Eletrônica do Prodema**, v.1, p.55-76, 2007.

ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes 2014**. São Paulo, 2015.

ANDRADE, A.L.C. de; MATTEI, L. A (in)sustentabilidade da matriz energética brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, v.19, p.9-36, 2013.

- AWAN, M.S.; ASLAM, M.A.; WAQAS, M. Social Development Disparities among Districts of Punjab. **MPRA Munich Personal RePEc Archive**, 2012.
- AZIZ, S.A.; AMIN, R.M.; YUSOF, S.A.; HANEEF, M.A.; MOHAMED, M.O.; OZIEV, G. A critical analysis of development indices. **Australian Journal of Sustainable Business and Society**, v.1, p.37-53, 2015.
- BARBOSA, J. de A. **Impactos das queimadas e políticas ambientais**: uma análise utilizando jogos agregativos. 2021. 59p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- BEZERRA, F.N.R.; LIMA, F.A.X. Multidimensionalidade do Desenvolvimento Rural nos municípios do Ceará. **Revista Cerrados**, v.20, p.149-186, 2022. DOI: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202207>.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- BRAUN, D.M.R.; ROBL, R.S. O ICMS ecológico como instrumento auxiliar para o alcance da sustentabilidade. In: SOUZA, M.C. da S.A. de; ARMADA, C.A. (Org.). **Sustentabilidade, meio ambiente e sociedade**: reflexões e perspectivas. Umuarama: Ed. Universidade Paranaense, 2015. p.76-97.
- BRUSTIN, P.; TISCHNER, P.; DIAS, L.; BARBADO, N.; REIS, A. Aplicação do índice de salubridade ambiental (ISA) para diagnóstico de áreas urbanas: um estudo dos municípios de Maringá-PR e Sarandi-PR. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.9, p.234-252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020234-252>.
- CAI, B.; LIU, H.; ZHANG, X.; PAN, H.; ZHAO, M.; ZHENG, T.; NIE, J.; DU, M.; DHAKAL, S. High-resolution accounting of urban emissions in China. **Applied Energy**, v.325, art.119896, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119896>.
- CAMPOS, K.C.; CARVALHO, H.R. Análise estatística multivariada: uma aplicação na atividade agrícola irrigada do Município de Guaiúba-CE. **Revista de Economia da UEG**, v.3, p.108-124, 2007.
- CANDIOTTO, L.Z.P.; CORRÊA, W.K. Desenvolvimento rural Sustentável: algumas considerações sobre o discurso oficial do Governo federal. **Revista Geografia**, v.29, p.265-280, 2004.
- CARNEIRO NETO, J.A.; ANDRADE, E.M. de; ROSA, M. de F.; MOTA, F.S.B.; LOPES, B.F.J. Índice de sustentabilidade agroambiental para o perímetro irrigado Ayres de Souza. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1272-1279, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000400036>.
- COSTANTINI, V.; MONNI, S. Sustainable human development for European countries. **Journal of Human Development**, v.6, p.329-351, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/14649880500287654>.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**: ano base 2014. Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 29 jul. 2023.
- FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1187p.
- FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P.; SILVA, L.F. da; CHAN, B.L. **Análise de dados**: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Campus, 2009. 646p.
- FEIL, A.A.; SCHREIBER, D. Analysis of the structure and criteria in the elaboration of a sustainability index. **Sustainability in Debate**, v.8, p.30-43, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n2.2017.21516>.
- FERRER, G.R.; GLASENAPP, M.C.; CRUZ, P.M. Sustentabilidade: um novo paradigma para o direito. **Revista Novos Estudos Jurídicos-Eletrônica**, v.19, p.1433-1464, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14210/nej.v19n4.p1433-1464>.
- FRAINER, D.M.; SOUZA, C.C. de; REIS NETO, J.F.; CASTELÃO, R.A. Uma aplicação do Índice de Desenvolvimento Sustentável aos municípios do estado de Mato Grosso do Sul. **Interações**, v.18, p.145-156, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v18i2.1524>.
- FRANÇA, I.R.; SPINELLI, M.G.N.; MORIMOTO, J.M. Avaliação e percepção de sustentabilidade ambiental em unidades produtoras de refeições de clubes paulistanos. **Revista Univap**, v.25, p.68-79, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v25i49.2212>.
- FRATER, P.; FRANKS, J. Measuring agricultural sustainability at the farm-level: a pragmatic approach. **International Journal of Agricultural Management**, v.2, p.207-235, 2013. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.175061>.
- FUJII, H.; IWATA, K.; MANAGI, S. How do urban characteristics affect climate change mitigation policies? **Journal of Cleaner Production**, v.168, p.271-278, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.221>.
- GALLOPIN, G.C. Indicators and their use: information for decision-making. In: MOLDAN, B.; BILLHARZ, S.; MATRAVERS, R. **Sustainability indicators**: a report on the project on indicators of sustainable development. New York: Wiley, 1997. p.13-27.
- GARCIA, D.S.S.; DETTONI, J.L.; SOUZA, Ú.G.T. de F. A pobreza e a dimensão social da sustentabilidade. **Revista Eletrônica Direito e Política**, v.15, p.492-512, 2020.
- GHISLANDI, S.; SANDERSON, W.C.; SCHERBOY, S. A simple measure of human development: the human life indicator. **Population and Development Review**, v.45, p.219-233, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/padr.12205>.

- GONG, X.; RICHMAN, M.B. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the rockies. **Journal of Climate**, v.8, p.897-931, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0897:OTAOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0897:OTAOC>2.0.CO;2).
- GOODLAND, R. The concept of environmental sustainability. **Annual Reviews of Ecology, Systematics**, v.26, p.1-24, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000245>.
- HAIR JR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.
- IAQUINTO, O.B. A sustentabilidade e suas dimensões. **Revista da ESMESC**, v.25, p.157-178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/revistadaesmesc.v25i31.p157>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Edição 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabela>>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2014**. Rio de Janeiro, 2015.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Taxas anuais de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal – PRODES. **TerraBrasilis**, 2025. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates>. Acesso em: 27 maio 2025.
- LOPES, B.F.; ANDRANDE, M.E. de; AQUINO, D. do N.; LOPES, J.F.B. Proposta de um índice de sustentabilidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, p.185-193, 2009.
- MACCARI, N. Environmental sustainability and human development: a greening of human development index. **SSRN**, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2426073>.
- MAPBIOMAS. Mais de 90% do desmatamento da Amazônia é para abertura de pastagem. **MapBiomas**, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/2024/10/03/mais-de-90-do-desmatamento-da-amazonia-e-para-abertura-de-pastagem/>>. Acesso em: 27 maio 2025.
- MARÔCO, J. **Análise estatística com o SPSS Statistics**. 6.ed. Pêro Pinheiro: Report Number, 2014. 990p.
- MARTINS, P.R.A.; FERRAZ, F.T.; COSTA, M.M. da. Sustentabilidade Ambiental como Nova Dimensão do Índice de Desenvolvimento Humano dos Países. **Revista do BNDES**, v.13, p.139-162, 2006.
- MESSIAS, C.G.; SILVA, D. e; SILVA, M.B. da; LIMA, C.T. de; ALMEIDA, C.A. de. Análise das taxas de desmatamento e seus fatores associados na Amazônia Legal Brasileira nas últimas três décadas. **RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v.52, p.18-41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v52i0.74087>.
- MÜLLER, H.O. O direito ambiental frente a análise econômica do direito. **Revista Saber Acadêmico**, n.27, p.31-41, 2019.
- NASCIMENTO, E.P. do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, v.26, p.51-64, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100005>.
- NOBRE, M.; AMAZONAS, M. de C. (Org.). **Desenvolvimento sustentável**: a institucionalização de um conceito. Brasília: Ibama, 2002. 367p.
- NORUSIS, M.J. **SPSS base system user's guide**. Chicago: SPSS, 1990. 520p.
- OLIVEIRA, R.B. de; SOUSA, E.P. de. Desenvolvimento humano sustentável no Brasil: interação entre bem-estar social e saúde ambiental. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, v.32, p.47-66, 2020a.
- OLIVEIRA, R.B. de; SOUSA, E.P. de. Índice de Sustentabilidade Ambiental dos Estados Brasileiros, 2010 e 2014. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.9, p.376-395, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020376-395>.
- OLIVEIRA, R.B. de; SOUSA, E.P. de; RODRIGUES, A. da S.; KHAN, A.S. Índice de desenvolvimento humano sustentável: uma abordagem para países. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS REGIONAIS E URBANOS, 18., 2020, Salvador. **Anais**. Salvador: ABER, 2020. v.1. p.1-15. ENABER 2020.
- PALÁCIO, H.A. de Q. **Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu, Ceará**. 2004. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- PASSOS, A.T.B.; KHAN, A.S. O impacto do PRONAF sobre a sustentabilidade agrícola de agricultores familiares na microrregião do vale do médio Curu, no Estado do Ceará. **Revista de Economia Aplicada**, v.23, p.53-78, 2019.
- PEREIRA, M. da S.; SAUER, L.; FAGUNDES, M.B.B. Mensurando a sustentabilidade ambiental: uma proposta de índice para o Mato Grosso do Sul. **Interações**, v.17, p.327-338, 2016. DOI: <https://doi.org/10.20435/1984042X2016215>.
- PILLARISETTI, J.R.; van den BERGH, J.C.J.M. Sustainable nations: what do aggregate indexes tell us? **Environment, Development and Sustainability**, v.12, p.49-62, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-008-9179-7>.
- SAKALASOORIYA, N. Conceptual analysis of sustainability and sustainable development. department of geography. **Open Journal of Social Sciences**, v.9, p.396-414, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4236/jss.2021.93026>.
- SAMPAIO, M.A. dos S.; ARAÚJO, A.C.P.L. de; LIMA, F.A.X.; COSTA, E.M. A fiscalização ambiental e o desmatamento na amazônia legal: uma análise para o período de 2004 a 2019. **Espaço Aberto**, v.14, p.109-130, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2024.62654>.

SANTOS, K. de S.; SILVA, D.D. da; GUIMARÃES, R.J. de P.S. e. Análise multitemporal de focos de queimadas e variáveis climáticas, no Estado do Pará. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.14, p.118-133, 2020.

SANTOS, M.A. dos; ROSA, L.P.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E.O. dos; ROCHA, C.H.E.D'A.; SIKAR, E.; SILVA, M.B.; JUNIOR, M.P.B. Emissões de gases do efeito estufa por hidrelétricas. **Ecologia Brasiliensis**, v.12, p.116-129, 2008.

SANTOS, M.E.; SANTOS, G. Composite indices of development. In: CURRIE-ALDER, B.; KANBUR, R.; MALONE, D.M.; MEDHORA, R. (Ed.). **International Development: ideas, experience and prospects**. Oxford: Oxford University Press, 2014. p.133-150. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199671656.003.0009>.

SCHEID, L.L.; MAFALDA, M.P.; PINHEIRO, M.T. O papel das organizações não governamentais – ONGS para a divulgação da imagem turística do Brasil. In: ENCONTRO SEMINTUR JR., 1.; SEMINÁRIO DE PESQUISA EM TURISMO DO MERCOSUL, 6., 2010, Caxias do Sul. **Saberes e fazeres no turismo: interfaces**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2010. SEMINTUR 2010.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Totais 2015**. Rio de Janeiro: Observatório do Clima, 2017.

SEIDLLE, E.P.; FRITZ FILHO, L.F. A evolução da agricultura e o impacto gerado pelos processos de inovação: um estudo de caso no município de Coxilha-RS. **Revista Economia e Desenvolvimento, Santa Maria**, v.28, p.388-409, 2016.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, v.10, p.137-148, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2007000200009>.

SILVA, N.C.B. da; MOTA, J.A. A técnica de cluster como ferramenta para a gestão ambiental. **Sociedade e Estado**, v.18, p.199-220, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-69922003000100011>.

SILVEIRA, G.P. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Opinión Jurídica**, v.17, p.123-147, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22395/ojum.v17n33a5>.

SINGH, R.K.; MURTY, H.R.; GUPTA, S.K.; DIKSHIT, A.K. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, v.15, p.281-299, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>.

SINGH, R.K.; MURTY, H.R.; GUPTA, S.K.; DIKSHIT, A.K. Development of composite sustainability performance index for steel industry. **Ecological Indicators**, v.7, p.565-588, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.06.004>.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnósticos dos Serviços de Água e Esgotos – 2010**. Brasília: Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-eesgotos/diagnostico-ae-2010>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

STOFFEL, J.A.; COLOGNESE, S.A. O desenvolvimento sustentável sob a ótica da sustentabilidade multidimensional. **Revista da FAE**, v.18, p.18-37, 2016.

STROBEL, J.S.; CORAL, E.; SELIG, P.M. Indicadores de sustentabilidade corporativa: uma análise comparativa. In: ENCONTRO ANUAL DA ANPAD, 28., 2004, Curitiba. **Anais**. Curitiba: ANPAD, 2004. EnANPAD 2004.

TAKADA, M.; RUSCHEL, C.V. A (in)eficácia das penas nos crimes ambientais. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica**, v.3, p.1043-1062, 2012.

TEIXEIRA, M.D. de J.; SOUSA, L.V. de C.; FARIA, A.M. de M. Bem-estar fundamental e econômico: uma análise crítica do PIB e dos indicadores de sustentabilidade. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.6, p.4-40, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e120174-40>.

THOMAZ, P.G.; ASSAD, R.S.; MOREIRA, L.F.P. Uso do Fator de impacto e do índice H para avaliar pesquisadores e publicações. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v.96, p.90-93, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2011000200001>.

VAN DEN BERGH, J.C.J.M. The GDP Paradox. **Journal of Economic Psychology**, v.30, p.117-135, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joep.2008.12.001>.