

LUARA ROMANA DE SOUZA NASCIMENTO

**PROPOSTA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL: um estudo de caso para o Brasil**

Sorocaba
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*

LUARA ROMANA DE SOUZA NASCIMENTO

**PROPOSTA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL: um estudo de caso para o Brasil**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dra. Sandra R. M. M. Roveda

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Ewbank de M. Vieira

Sorocaba
2020

N244p

Nascimento, Luara Romana de Souza

Proposta fuzzy para avaliação do desenvolvimento sustentável: : um estudo de caso para o Brasil / Luara Romana de Souza Nascimento. -- Sorocaba, 2020

75 f. : tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda

Coorientadora: Henrique Ewbank de Miranda Vieira

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Modelos matemáticos. 3. Conjuntos difusos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação da Sustentabilidade de uma Região: Uma abordagem por modelamento fuzzy


AUTORA: LUARA ROMANA DE SOUZA NASCIMENTO

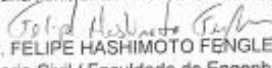
ORIENTADORA: SANDRA REGINA MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA

COORIENTADOR: HENRIQUE EWBANK DE MIRANDA VIEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS AMBIENTAIS,
área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora;


Prof. Dr. SANDRA REGINA MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA
Engenharia Ambiental / Unesp - ICT Sorocaba


Prof. Dr. ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS
Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia / Unesp / Sorocaba


Prof. Dr. FELIPE HASHIMOTO FENGLER
Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS)

Sorocaba, 19 de dezembro de 2019

“O correr da vida embrulha tudo; a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

João Guimarães Rosa

NASCIMENTO, L. R. S. **Proposta Fuzzy Para Avaliação do Desenvolvimento Sustentável: um estudo de caso para o Brasil.** Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). UNESP-Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus Sorocaba, Sorocaba, 2019.

RESUMO

O crescimento das nações despertou o interesse das autoridades mundiais para a investigação da capacidade de suporte das reservas do planeta. O conceito de desenvolvimento sustentável é entendido como sendo a capacidade de desenvolvimento da geração atual evitando a escassez dos recursos naturais para as gerações futuras. O presente trabalho desenvolveu dois Índices de Sustentabilidade Fuzzy (ISF1 e ISF2) para a avaliação do desenvolvimento sustentável. Foram utilizados Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS-IBGE), conforme estabelecido por Kronemberger & Clevelário Júnior, distribuídos nas dimensões ambiental, social, econômica e institucional. Tais indicadores foram agregados uma rede de Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF), semelhante à metodologia SAFE (*Sustainability Assessment Fuzzy Evaluation*), onde o número de variáveis de entrada diminuem a cada nível, tendo ao final o sistema principal da sustentabilidade composto pelo bem estar ecológico e o bem estar humano. Os índices foram aplicados para a realidade brasileira, conforme dados usados por Kronemberger & Clevelário Júnior (2016) no estudo do Barômetro da Sustentabilidade (BS). Os resultados do ISF1, ISF2 e os obtidos no BS (KRONEMBERGUER & CLEVELÁRIO JÚNIOR, 2016), foram comparados. O ISF2 pode ser considerado o modelo mais rigoroso para medir a sustentabilidade.

Palavras-chaves: Índice de Sustentabilidade, Lógica Fuzzy, Desenvolvimento Sustentável

NASCIMENTO, L. R. S. Fuzzy Proposal for Assessing Sustainable Development: a case study for Brazil. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). UNESP- Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus Sorocaba, Sorocaba, 2019.

ABSTRACT

The growth of nations has piqued the interest of world authorities to investigate the carrying capacity of the planet's reserves. The concept of sustainable development is understood to be the development capacity of the current generation avoiding the scarcity of natural resources for future generations. The present research developed two Fuzzy Sustainability Indexes (ISF1 and ISF2) to evaluate the sustainability. This study used Sustainable Development Indicators (IDS-IBGE) distributed in the environmental, social, economic and institutional dimensions. These indicators were added to a network of Fuzzy Inference Systems (SIF), similar to the Sustainability Assessment Fuzzy Evaluation (SAFE) methodology, where the number of input variables decreases at each level, having at the end the main sustainability system composed by ecological well-being and human well-being. The ISF1, ISF2 and Kronemberger & Clevelário Júnior (2016) results in the Sustainability Barometer (BS) study were compared. ISF2 was considered the most several model to classification.

Keywords: Sustainability Index, Fuzzy Logic, Sustainable Development

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao nosso bondoso Deus, obrigada Senhor por me sustentar. Agradeço meus pais Décio e Vitalina por sempre acreditarem no meu potencial e por terem me ensinado com muito amor o que realmente importa nessa vida. Muito obrigada pai e mãe, a filha do pedreiro e da ajudante de serviços gerais concluirá seu curso de mestrado na Unesp. Expresso aqui o meu profundo respeito e gratidão à minha orientadora Professora Sandra Regina M. M. Roveda e ao meu coorientador Professor Henrique Ewbank de M. Veira, obrigada por aceitarem o desafio de trabalhar em condições geográficas remotas e por me apoiarem em tudo. Agradeço ao meu marido Thiago Nascimento por sempre me incentivar à crescer. Agradeço a todos os meus familiares, em especial à minha irmã Taís e meus tios Cléia e Edson. Obrigada também meus queridos amigos, vocês estão guardados aqui “do lado esquerdo do peito”. Agradeço aos demais professores e funcionários do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, obrigada por sempre estarem dispostos a ajudar. Obrigada também Morena.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu marido,
Thiago Nascimento.

SUMÁRIO

1. Introdução	16
2. Referencial Teórico	18
2.1 Histórico do Desenvolvimento Sustentável	18
2.2 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável	19
2.3 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS-IBGE).....	20
2.3.1 Indicadores da Dimensão Ambiental.....	21
2.3.2 Indicadores da Dimensão Social.....	22
2.3.3 Indicadores da Dimensão Econômica.....	24
2.3.4 Indicadores da Dimensão Institucional.....	25
2.4 Modelos para Medir a Sustentabilidade	26
2.4.1 Modelo Pressão Estado Resposta	26
2.4.2 Modelo Pegada Ecológica	27
2.4.3 Modelo Barômetro da Sustentabilidade	28
2.4.4 Análise da Sustentabilidade por avaliação Fuzzy	29
2.5 Modelagem Fuzzy	31
3. Metodologia	34
3.1 Seleção das Variáveis.....	35
3.2 Construção do Modelo.....	35
3.2.1 Fuzzificação.....	37
3.2.2 Base de Regras e Inferência	47
3.2.3 Defuzzificação.....	51
3.3 Coleta de Dados.....	51
4. Resultados e Discussão	56
5. Considerações Finais	67
Referências	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de funcionamento do PER	27
Figura 2 - Pegada Ecológica versus Biocapacidade Total	28
Figura 3 - Gráfico Barômetro da Sustentabilidade	29
Figura 4 - Arquitetura SAFE	31
Figura 5 - Principais estágios para o desenvolvimento de um SIF.....	33
Figura 6 - Funções trapezoidal e triangular.....	33
Figura 7 - Fluxo do desenvolvimento da pesquisa realizada.....	35
Figura 8 - Arquitetura geral do modelo para avaliação do desenvolvimento sustentável de uma região.....	36
Figura 9 - Arquitetura do SIF primário Atmosfera que determina as condições de sustentabilidade para o tema atmosfera a partir dos três indicadores.....	38
Figura 10 – Arquitetura do SIF primário que determina as condições de sustentabilidade para o tema Terra a partir dos três indicadores.	39
Figura 11 - Arquitetura do SIF primário que determina as condições de sustentabilidade para o tema Saneamento a partir dos três indicadores.....	39
Figura 12 - Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c) e da variável de saída (d) do SIF primário Atmosfera.....	40
Figura 13 - Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c) e da variável de saída (d) do SIF primário Terra	41

Figura 14 - Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c) e da variável de saída (d) do SIF primário Saneamento	42
Figura 15 - Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Ambiental a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.....	43
Figura 16 -Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c), (d) e (e) e da variável de saída do SIFsecundário Dimensão Ambiental	44
Figura 17 - Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Social a partir dos temas definidos pelos sistemas primários	45
Figura 18 - Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão econômica a partir dos temas definidos pelos sistemas primários	45
Figura 19 - Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Institucional a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.....	46
Figura 20 - Arquitetura do SIF terciário que determina as condições de sustentabilidade para o subsistema Bem-estar humano a partir das dimensões definidas pelos sistemas secundários.....	46
Figura 21 - Arquitetura do SIF principal que determina o Índice de Sustentabilidade Fuzzy a partir das condições de sustentabilidade dos subsistemas Bem-estar humano e Bem-estar ecológico.....	47
Figura 22 - Frequência de associação dos valores de entrada aos conjuntos fuzzy de saída: Insustentável (0), Potencialmente Insustentável (1), Intermediário (2), Potencialmente Sustentável (3) e Sustentável (4) por meio das escalas 1 e 2, que produzem os índices ISF1 e ISF2.....	49
Figura 23 - Intervalos antes (A) e depois (B) da transformação.....	51

Figura 24 - Classificação de sustentabilidade do Brasil segundo ISF1 e ISF2 para os anos de 2002 e 2011.....	56
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escalas variáveis de saída ISF1 e ISF2.....	50
Tabela 2 - Escala Final ISF.....	52
Tabela 3 - Dados da Dimensão Ambiental.....	52
Tabela 4 - Dados da Dimensão Social.....	54
Tabela 5 - Dados da Dimensão Econômica.....	55
Tabela 6 - Dados da Dimensão Institucional.....	56
Tabela 7 - Resultados para os subsistemas dos modelos ISF1, ISF2 e do modelo do Barômetro da Sustentabilidade (BS).....	57
Tabela 8 - Resultados dos Temas da Dimensão Ambiental.....	58
Tabela 9 - Resultados dos Temas da Dimensão Social.....	60
Tabela 10 - Resultados dos Temas da Dimensão Econômica.....	62
Tabela 11 - Resultados dos Temas da Dimensão Institucional.....	63
Tabela 12 - Resultados das Dimensões.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Temas e Indicadores da Dimensão Ambiental.....	19
Quadro 2 - Temas e Indicadores da Dimensão Social.....	20
Quadro 3 - Temas e Indicadores da Dimensão Econômica.....	22
Quadro 4 - Temas e Indicadores da Dimensão Institucional.....	24

1 INTRODUÇÃO

O planeta Terra apresenta uma população estimada em 7,6 bilhões de habitantes e as projeções até 2100 avaliam que a população mundial pode chegar a 11,2 bilhões de pessoas (ONU, 2017). Uma vez que a sustentação da vida depende da utilização de recursos naturais, o incremento do uso de tais recursos diante do aumento populacional é inevitável. Esta foi uma das percepções que levaram os governantes a se preocuparem com questão e tomarem medidas a fim de debater o tema e levantar soluções para uma questão bastante complexa e necessária, o desenvolvimento sustentável. Com isso, a comunidade internacional se propôs a pensar sobre os limites do desenvolvimento do planeta e os impactos negativos deste processo no meio ambiente e na sociedade.

A sustentabilidade é tema recorrente ao se falar de tomada de decisão em políticas públicas e está presente em definitivo na comunidade científica e nos meios de comunicação de maneira global. Os incêndios na região da Amazônia em 2019 mostraram o quanto este assunto é relevante em âmbito nacional e internacional. A selva amazônica é a maior e mais importante floresta tropical do planeta e concentra cerca de um sexto de toda água doce do globo (VIEIRA, TOLEDO & HIGUCHI, 2018). Um dos assuntos mais discutidos no dias atuais é justamente sobre o desenvolvimento econômico daquela região, do qual o ponto chave é o desafio de explorar os recursos naturais de forma sustentável.

O desenvolvimento sustentável leva em consideração quatro dimensões: econômica, social, ambiental e institucional, porém a maioria dos estudos relacionados ao tema não incluem a dimensão institucional. A literatura tem apontado que a definição de indicadores de sustentabilidade é de grande complexidade, pois nem sempre é possível integrar as dimensões de maneira efetiva (SCIPIONI et. al., 2009). No caso do Brasil, destacam-se os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS-IBGE).

A necessidade de monitoramento faz com que os indicadores recebam atenção especial, pois eles contribuem para mostrar as tendências, os sucessos e falhas na aplicação de políticas públicas sustentáveis (PUPPHACHAI & ZUIDEMA, 2016). Assim, os pesquisadores têm buscado reunir indicadores que simplifiquem a medição do desenvolvimento sustentável, tanto no contexto corporativo quanto no contexto governamental.

Singh (2012) revela que a maioria das metodologias já criadas, seguem os passos de normalização, ponderação e agregação de indicadores a fim de facilitar o processo de avaliação da sustentabilidade e conseqüentemente, de tomada de decisão por parte dos governantes através dessas análises.

Várias metodologias já foram desenvolvidas com o intuito de mensurar a sustentabilidade de organizações, municípios e países, possibilitando assim obter um diagnóstico desses lugares (QUINTELA et. al., 2018). Dentre essas metodologias destaca-se o Barômetro da Sustentabilidade (*Barometer of Sustainability*). Em 2008 e 2016, Kronemberger & Clevelário Junior, realizaram um estudo onde aplicou a metodologia do Barômetro da Sustentabilidade para o Brasil utilizando os IDS-IBGE.

Os avanços relacionados à avaliação da sustentabilidade levaram os cientistas a desenvolverem estudos baseados na lógica fuzzy (FLOUR et. al., 2014), um dos trabalhos pioneiros foi realizado por Munda, Nijkamp & Rietveld (1994), intitulado “*Qualitative multicriteria evaluation for environmental management*”. A lógica fuzzy, desenvolvida em 1965 por Loft Zadeh e permite trabalhar as questões subjetivas envolvidas no tema da sustentabilidade. Phillis, Grigoroudis & Kouikoglou (2011), elaboraram um estudo usando a metodologia do SAFE (Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation) para avaliar a sustentabilidade de vários países.

É imprescindível que se conheça a situação de uma região em relação à sustentabilidade, pois sem esse conhecimento não é possível ter a noção dos pontos críticos e conseqüentemente analisar qual gerenciamento deve ser o mais adequado, ou seja, é através da mensuração da sustentabilidade que é possível saber o real diagnóstico de uma região ou país e a partir disso construir um planejamento adequado em benefício da população. Por isso, os índices desenvolvidos poderão contribuir significativamente para a gestão de políticas públicas ligadas ao desenvolvimento sustentável.

Diante deste contexto, o presente trabalho buscou desenvolver índices, utilizando lógica fuzzy, para a avaliação do desenvolvimento sustentável tomando como base os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS- IBGE). Tal estudo possui grande relevância para a sociedade, uma vez que contribui para subsidiar a tomada de decisão no planejamento de atitudes sustentáveis e engloba a preocupação do atendimento de uma abordagem que contempla as quatro dimensões, social, econômico, ambiental e institucional.

Os índices contribuem também para o monitoramento e acompanhamento de ações ligadas ao tema e que já foram implantadas. Desta forma, é possível presumir um objetivo, acompanhar a trajetória e corrigir os rumos.

Nas próximas seções são apresentados o referencial teórico, seção 2, metodologia na seção 3, resultados e discussões na seção 4 e por fim as considerações finais na seção 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico do Desenvolvimento Sustentável

A Organização das Nações Unidas (ONU), promoveu a primeira conferência chamada Conferência sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano em 1972, na cidade de Estocolmo (Suécia), onde representantes de 113 países e 250 organizações não governamentais e organismos da ONU estiveram presentes (CNUMA, 1972). Porém, o conceito de desenvolvimento sustentável aceita atualmente foi somente consolidado em 1987 no Relatório Brundtland, um documento apresentado pela Comissão Mundial da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) nomeado "Our Common Future". A ideia expressa neste documento é que o Desenvolvimento Sustentável harmoniza o desenvolvimento econômico e social, da geração presente, assegurando o consumo consciente de recursos naturais de forma que as gerações futuras possam também satisfazer suas necessidades (WCDE, 1987).

Este termo foi amplamente debatido durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992, a então chamada Rio 92. A conferência serviu de base para a definição dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), bem como a elaboração da agenda 21. A agenda 21 foi um plano de ação, que contou com a participação de 179 países, cujo o alicerce foi a cooperação entre sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Em 2002, ocorreu a Rio+10, Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável em Joanesburgo, quando foram aprovados os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio, os quais determinaram que os Estados signatários deveriam realizar progressos na formulação e estruturação de Estratégias Nacionais de Desenvolvimento Sustentável até 2015 (POTSCHIN & HAINES-YOUNG, 2006).

Em 2012, vinte anos após a Rio 92, aconteceu a Rio+20, a qual possibilitou analisar os avanços alcançados ao longo desses vinte anos como também os pontos de retrocesso. Desta conferência resultou o documento "The Future We Want", visando o comprometimento dos países membros com o desenvolvimento sustentável (MONTANARELLA & ALVA, 2015). Novos objetivos e metas foram estabelecidos e reunidos na Agenda 30, proposta pela ONU em 2015, possuindo 17 objetivos e 169 metas a serem implementadas até 2030 (ONU, 2015). Esses objetivos e metas, também conhecidos como, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) contemplam aqueles não alcançados pela Rio+10.

Várias outras conferências e fóruns mais específicos foram realizados, como o Acordo de Paris, que foi oficialmente firmado em 2017, com a ratificação de 195 países membros da UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). O acordo tratou da questão de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE). Em resposta ao Acordo de Paris, o Fórum Brasileiro de Mudança do Clima (FBMC) emitiu o documento “Proposta Inicial de Implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil (NDC)”, que traçou as metas para a redução de emissões de carbono em 37% até 2025 e em 42% até 2030, em relação ao ano de 2005 (FBMC, 2018). Em outubro de 2019 aconteceu em Viena na Austria a primeira conferência internacional direcionada ao debate sobre energia nuclear como uma fonte sustentavelmente coerente. A conferência foi organizada por organizações internacionais e agências da ONU, e foi nomeada “International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power” (ONU, 2019). Sendo assim, todos estes tratados, debates e conferências contribuem para modificar a relação dos seres humanos como o meio ambiente, principalmente na formulação, implementação e validação de políticas públicas de desenvolvimento.

2.2 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável

Como já comentado, na gestão pública, os indicadores são instrumentos que contribuem para identificar, medir e descrever aspectos relacionados a um determinado fenômeno ou objeto da realidade a respeito do qual o Estado decide por uma ação ou omissão. A principal finalidade de um indicador é, portanto, traduzir de forma mensurável (quantitativamente) ou descritível (qualitativamente), um ou mais aspectos da realidade dada (situação social) ou construída (ação), de maneira a tornar operacional o seu acompanhamento.

A Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (CDS) nasceu em 1992, o objetivo principal era fazer o acompanhamento ativo dos desdobramentos da Rio 92 (ONU, 2019). O capítulo 40 da Agenda 21 fez referência à definição de indicadores de desenvolvimento sustentável para o monitoramento da sustentabilidade dos países, em consequência disso a CDS estabeleceu um planejamento para a elaboração dos indicadores, no quais, posteriormente, cada país se basearia para estabelecimento de seus próprios indicadores.

O período de construção dos primeiros indicadores aconteceu entre os anos de 1996 e 2000. Num primeiro momento, no ano de 1996, o método pressão-estado-resposta serviu como guia para a seleção de 134 indicadores. Estes primeiros indicadores foram fruto da discussão de especialistas e deveriam servir como teste para serem aplicados nos países membros para posteriormente ter seus resultados analisados (MALHEIROS et. al. 2008).

Após a análise dos resultados da fase inicial, os indicadores foram revisados e a segunda edição foi publicada em 2001 com o título “Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies” (MALHEIROS et. al. 2008). Esta edição trouxe um número reduzido de indicadores, 57 no total. Uma das causas da redução no número de indicadores pode ser explicada pela dificuldade encontrada pelos países em relação à disponibilidade de dados. Nesta edição os indicadores foram estruturados em quatro dimensões, a ambiental, a social, a econômica e a institucional.

Em 2007 a CDS publicou a terceira edição dos indicadores “Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies -Third Edition”, sendo esta a mais atual (ONU, 2007). Essa terceira edição traz um número maior de indicadores, comparada com a segunda edição, 96 no total, distribuídos em 15 temas (DANG et. al., 2018). Esse número maior de indicadores na terceira edição pode ser explicado por uma maior facilidade na disponibilidade de dados concomitantemente com desenvolvimento de novas pesquisas para o aprimoramento desses indicadores.

Tendo como base os indicadores propostos pela CDS, foram lançados no Brasil os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS), estes constituem um grupo de indicadores apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo a primeira edição publicada no ano de 2002. Desde 2002, o rol de indicadores vem sendo constantemente aprimorado com o intuito de fornecer um panorama amplo e atual dos temas relacionados ao desenvolvimento do país. A atualização do ano de 2017, contempla 121 indicadores que estão subdivididos em quatro dimensões, a dimensão ambiental, a dimensão social, a dimensão econômica e a dimensão institucional.

2.3 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS-IBGE)

Os IDS possuem o intuito de estudar a sustentabilidade para a “realidade brasileira” (IBGE, 2015) e permitem uma visão abrangente sobre as condições do desenvolvimento sustentável brasileiro. Estes indicadores são a fundamentação de inúmeras pesquisas sobre a sustentabilidade no Brasil. Através de sua agregação e análise é possível obter um diagnóstico do desenvolvimento sustentável em dado momento assim como sua evolução ao longo dos anos (QUINHONEIRO, 2015). As dimensões, ambiental, social, econômica e institucional, assim como seus respectivos indicadores estão detalhados a seguir.

2.3.1 Indicadores da Dimensão Ambiental

A dimensão ambiental está associada ao impacto sofrido pelo meio ambiente devido as ações antrópicas, ou seja, reflete a pressão sobre os recursos naturais e consequentemente sobre a biodiversidade. Um dos grandes desafios do desenvolvimento sustentável é realizar de maneira correta e consciente a utilização desses recursos naturais (IBGE, 2015). A dimensão ambiental possui 13 indicadores distribuídos em cinco temas, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Temas e indicadores da dimensão ambiental

(continua)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
Atmosfera	Consumo industrial de substâncias destruidoras da camada de Ozônio (em t PDO – Potencial de Destruição de Ozônio)	Abrange o uso de substâncias destruidoras da camada de ozônio. Esta camada protege a Terra da radiação UV oriunda do Sol, capaz de, em altas doses, inviabilizar a presença de vida no Planeta.
	Número de veículos per capita (por 1 000 hab.)	Número de veículos leves (carros de passeio) por 1 000 habitantes. As emissões veiculares são a principal fonte de poluição atmosférica nos grandes centros urbanos brasileiros (FEEMA, 2004; CETESB, 2006), com sérias consequências para a qualidade de vida e a saúde da população.
	Queimadas e incêndios florestais (n.º de focos de calor por 1 000 km ² ao ano)	Mede a incidência de focos de calor (relacionados as queimadas) por 1 000 km ² . As queimadas destroem grandes áreas de vegetação nativa, afetam o solo e a qualidade do ar, com reflexos na saúde da população.
Terra	Terras em uso agrossilvipastoril (%)	Apresenta o total das terras em uso pela agropecuária e para plantios florestais no Brasil. Estas áreas são importantes para a produção de alimentos e matérias primas, mas não podem ameaçar a existência dos ecossistemas naturais.
	Desflorestamento na Amazônia Legal (%)	Apresenta a área total desflorestada na Amazônia Legal. As florestas amazônicas são muito ricas em biodiversidade e prestam valiosos serviços ambientais para o Brasil e o mundo.
	Área total antropizada (%)	Apresenta a área total do País que teve sua vegetação original alterada pela ação humana. As áreas naturais são fundamentais para a preservação da biodiversidade e a prestação de serviços ambientais.

Quadro 2 - Temas e indicadores da dimensão ambiental

(conclusão)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
Oceanos, mares e áreas costeiras	Produção do pescado marítima (extrativista) (1000 t)	Mensura a pesca marítima extrativa anual. O peixe se constitui em importante fonte de proteína para a população humana.
Biodiversidade	Áreas protegidas (%)	As áreas protegidas abrangem as unidades de conservação federais de proteção integral e de uso sustentável (exclusive as Áreas de Proteção Ambiental - APA). Estas áreas prestam importantes serviços ambientais e permitem a conservação da biodiversidade
Saneamento	Lixo coletado rural (%)	O indicador representa a parcela da população rural atendida pelos serviços de coleta de lixo doméstico.

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Junior (2016) e IBGE (2015).

2.3.2 Indicadores da Dimensão Social

A dimensão social faz referência a qualidade de vida e as condições sociais em que vivem as famílias brasileiras. É a dimensão com o maior número de indicadores, 21, pois o bem-estar social é caracterizado por diversos fatores que levam em consideração as condições mínimas necessárias para a sobrevivência de uma família (IBGE 2015). É dividida em seis temas, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 3 - Temas e indicadores da dimensão social

(continua)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
População	Taxa de crescimento populacional (%)	Percentual de incremento médio anual da população residente (IBGE, 2012). ED define a partir de taxas de crescimento populacional de países do mundo (IBGE, 2003).
Trabalho e Rendimento	Taxa de desocupação (%)	Representa a proporção da população de 10 anos ou mais de idade que não estava trabalhando, mas procurou trabalho no período de referência. A taxa de desocupação é a percentagem das pessoas desocupadas na semana de referência em relação às pessoas economicamente ativas nessa semana
	Índice de Gini (adimensional)	Expressa o grau de concentração na distribuição do rendimento da população.

Quadro 4 - Temas e indicadores da dimensão social

(continua)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
Trabalho e Rendimento	Rendimento médio mensal (R\$)	Rendimento médio mensal da população de 10 anos ou mais de idade com rendimento
	Salário mínimo	Valor do salário mínimo necessário para uma família de 4 pessoas (2 adultos e 2 crianças) para 2011. (DIEESE).
	Razão de rendimento por sexo (mulher/homem) (adimensional)	A situação ideal é razão igual a 1, que representa igualdade de oportunidade econômica; quanto mais distante de 1, maior a desigualdade.
	Razão de rendimento por cor ou raça (negros + pardos/brancos) (adimensional)	A situação ideal é razão igual a 1, que representa igualdade de oportunidade econômica; quanto mais distante de 1, maior a desigualdade.
Saúde	Esperança de vida ao nascer	Número médio de anos que um recém-nascido esperaria viver, se estivesse sujeito a uma lei de mortalidade observada em dada população (IBGE, 2012).
	Taxa de mortalidade infantil (‰)	É o número de óbitos de menores de 1 ano de idade em relação a 1 000 nascidos vivos.
	Imunização contra doenças infecciosas infantis (%)	Representa a proporção de crianças de crianças menores de 1 ano com cobertura vacinal completa em relação ao total de crianças nesta faixa etária.
Educação	Escolaridade (nº)	Média de anos de estudo da população de 25 anos ou mais de idade.
	Taxa de escolarização (7-14 anos) (%)	O indicador representa a população de 7 a 14 anos de idade que frequenta escola.
	Taxa de alfabetização (%)	Proporção de pessoas de 15 anos ou mais de idade alfabetizadas em relação ao total de pessoas do mesmo grupo etário.
	Razão de alfabetização por sexo (adimensional)	A situação ideal é razão igual a 1, que representa igualdade de acesso à educação; quanto mais distante de 1, maior a desigualdade.
	Razão de alfabetização por cor ou raça (adimensional)	A situação ideal é razão igual a 1, que representa igualdade de acesso à educação; quanto mais distante de 1, maior a desigualdade.
Habitação	Domicílios com acesso a rede geral de água (%)	Percentual de domicílios com acesso a rede geral de água.

Quadro 5 - Temas e indicadores da dimensão social

(conclusão)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
Habitação	Domicílios com acesso a rede geral de esgoto ou fossa séptica (%)	Percentual de domicílios com acesso a rede geral de esgoto ou fossa séptica.
	Domicílios com coleta de lixo (direta e indireta) (%)	Percentual de domicílios com coleta de lixo.
	Domicílios com iluminação elétrica (%)	Percentual de domicílios com iluminação elétrica.
	Densidade média de moradores por dormitório (n.º pessoas/dormitório)	Número de moradores por dormitório.
Segurança	Coefficiente de mortalidade por homicídios (nº/ 100 mil habitantes)	Número de homicídios por 100 mil habitantes
	Coefficiente de mortalidade por acidentes de transporte (nº/ 100 mil habitantes)	Número de mortes por acidentes de transporte por 100 mil habitantes.

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Junior (2016) e IBGE (2015)

2.3.3 Indicadores da Dimensão Econômica

A dimensão econômica refere-se ao consumo sustentável e ao gerenciamento adequado dos recursos naturais relacionado ao crescimento econômico do país e está ligada à capacidade de geração de riquezas de uma nação ao mesmo tempo em que leva em consideração o consumo sustentável e a utilização de tecnologias que provoquem o menor impacto possível ao meio ambiente (IBGE, 2015). Representada por 9 indicadores divididos em dois temas, conforme o Quadro 3.

Quadro 6 - Temas e indicadores da dimensão econômica

(continua)		
Tema	Indicador	Definição/Definição
Quadro Econômico	PIB – Produto Interno Bruto per capita (R\$)	O PIB per capita mede a riqueza potencial da população de um país.
	Taxa de Investimento (%)	Expressa, em percentual, a relação entre a formação bruta de capital fixo e o PIB, calculada a preços de mercado.

Quadro 7 - Temas e indicadores da dimensão econômica

(conclusão)		
Tema	Indicador	Definição/Descrição
Quadro Econômico	Balança Comercial - Saldo/PIB (%)	Expressa a relação de trocas entre as economias no mundo, através do saldo das importações e exportações de mercadorias do País em um determinado período.
	Grau de Endividamento (Dívida Externa/PIB - %)	Expressa a situação do País em relação à dívida
Padrões de produção e consumo	Consumo de Energia per capita (TEP/pessoa.ano)	Expressa o consumo final anual de energia por habitante, em um determinado território
	Intensidade Energética (PIB em US\$/Consumo de Energia em KWh)	A Intensidade Energética (IE) mede a eficiência com que a energia é usada para gerar riqueza econômica em um país.
	Participação de Fontes Renováveis na Oferta de Energia (%)	Expressa a composição da matriz energética brasileira, segundo as diferentes fontes de energia. Percentual de participação das fontes energéticas renováveis sobre o total de energia gerado
	Reciclagem (%)	Apresenta o desempenho das atividades de reciclagem de alguns tipos de materiais por indústrias em um território, em determinado período. Calculado como a média aritmética do percentual de reciclagem do alumínio, papel, vidro, latas de aço e embalagens PET.
	Coleta Seletiva (%)	Percentual de lixo seletivamente coletado.

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Junior (2016) e IBGE (2015)

2.3.4 Indicadores da Dimensão Institucional

A dimensão institucional tem relação com os esforços gastos na criação e manutenção de organizações que promovem discussões, elaboram formas de consicentização e que procuram engajar o poder público e a população como co-responsáveis nas práticas ligadas ao desenvolvimento sustentável. Esta dimensão representa o empenho despendido pelo poder público e pela população em ações para se alcançar o desenvolvimento sustentável (IBGE, 2015). O Quadro 4 apresenta os 9 indicadores que compõem os quatro temas desta dimensão.

Quadro 8 - Temas e indicadores da dimensão institucional

Tema	Indicador	Definição/Definição
Estrutura Institucional	Ratificação de Acordos Globais Ambientais (%)	Proporção de acordos assinados e ratificados pelo Brasil em comparação com outros países.
	Existência de Conselhos de Meio Ambiente Municipais (%)	Proporção de municípios com conselhos de meio ambiente ativos.
Capacidade Institucional	Gastos com Pesquisa e Desenvolvimento (%)	Percentual de dispêndio em P&D - Pesquisa e Desenvolvimento em relação ao PIB.
	Acesso a Serviços de Telefonia (nº telefones/1 000 habitantes)	Acesso ao serviço de telefone fixo por mil habitantes.
	Acesso à Internet (%)	Percentual de domicílios particulares permanentes com acesso à Internet.
Articulação Institucional	Representação da Sociedade Civil no Conselho de Meio Ambiente (%)	O indicador mensura a participação da sociedade nas decisões sobre meio ambiente na escala local.
	Implementação de Parceria na Área Ambiental (%)	Percentual de Municípios que implementaram convênio ou cooperação técnica para desenvolver ações na área ambiental em 2002.
Agenda 21	Implementação da Agenda 21 Local (%)	Somatório da população dos Municípios que iniciaram a implantação da Agenda 21 Local, como proporção da população total do País.
	Agenda 21 Local com Fórum (%)	Somatório da população dos Municípios com Fórum da Agenda 21 Local, como proporção da população total do País.

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Junior (2016) e IBGE (2015)

2.4 Modelos para medir a sustentabilidade

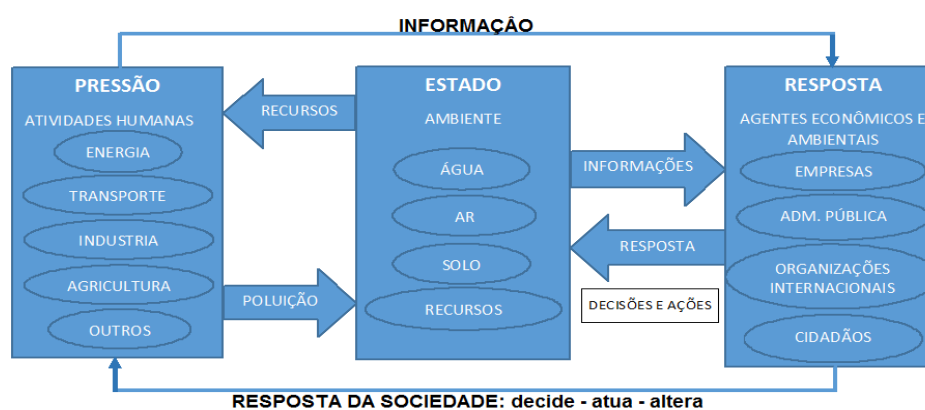
A partir da década de 1970 foram desenvolvidas várias ferramentas para se medir a sustentabilidade. Dentre as mais usuais estão o Modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), Método da Pegada Ecológica (MPE) e o Barômetro da Sustentabilidade (BS) (LOPES et. al., 2016).

2.4.1 Modelo Pressão-Estado-Resposta

O modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) foi criado pela OECD- *Organization for Economic Co-Operation and Development* (OECD, 1993). Esta metodologia se baseia em indicadores de pressão, indicadores de estado e indicadores de resposta. O princípio do modelo é a relação de causalidade (SOUZA et. al., 2014), onde o meio ambiente sofre pressões

antrópicas que resultam em um determinado impacto que caracteriza um estado e esse estado provoca uma resposta do governo e setor privado a respeito das medidas a serem tomadas para a solução dos problemas (ALBUQUERQUE et. al., 2017). A Figura 1 apresenta o mecanismo de funcionamento do PER. Segundo Kermerich (2014), uma desvantagem relacionada ao uso do PER é o levantamento somente das pressões antrópicas sobre o meio ambiente, uma vez que o meio também é afetado por fenômenos naturais.

Figura 1 - Mecanismo de funcionamento do PER



Fonte: Silva et. al., 2016

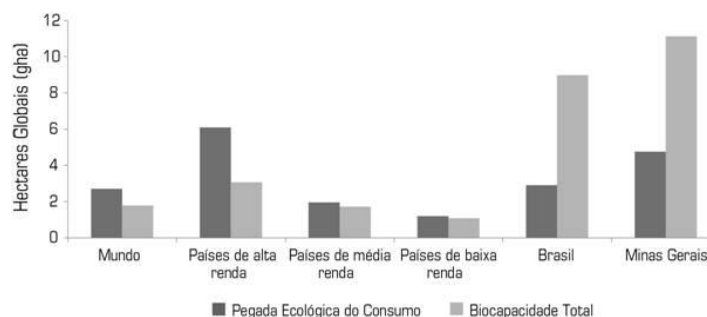
2.4.2 Modelo Pegada Ecológica

O método Pegada Ecológica (PE), Global Foot Print, foi desenvolvido pelos pesquisadores Wackernagel & Rees em 1996 (WACKERNAGEL & REES, 1996). Baseiando-se na “capacidade de carga” ou “biocapacidade” a PE tem por objetivo calcular “a área necessária para sustentar uma determinada população ou sistema econômico” (SANTOS, 2013; FROEHLICH, 2014), ou seja, o modelo propõe que a demanda de recursos naturais necessários para a manutenção de certa população seja expressa em área de terra produtiva. Gonzalez et. al. (2015), fizeram um estudo em que avaliaram a pegada ecológica, em hectares globais, de alguns países para o ano de 2007 e para o estado de Minas Gerais em 2008. O trabalho forneceu um panorama das necessidades das populações e da capacidade de suporte do meio ambiente, Biocapacidade Total, apresentado na Figura 2.

Observando os resultados obtidos por Gonzales, et. al., 2015, apresentados na Figura 2, percebe-se que para o Brasil e para o Estado de Minas Gerais a Biocapacidade Total é superior à Pegada Ecológica do Consumo. Isso demonstra que os recursos são superiores às demandas de consumo. Já para o mundo, países de alta renda, países de média renda e países de baixa renda, o consumo é superior à Biocapacidade Total, ou seja, os recursos disponíveis não são

suficientes para atenderem à demanda. Nota-se também que nos países de alta renda a disparidade entre consumo e biocapacidade é mais do que nos países de média e baixa renda.

Figura 2 - Pegada Ecológica versus Biocapacidade Total



Fonte: Gonzalez et. al., 2015

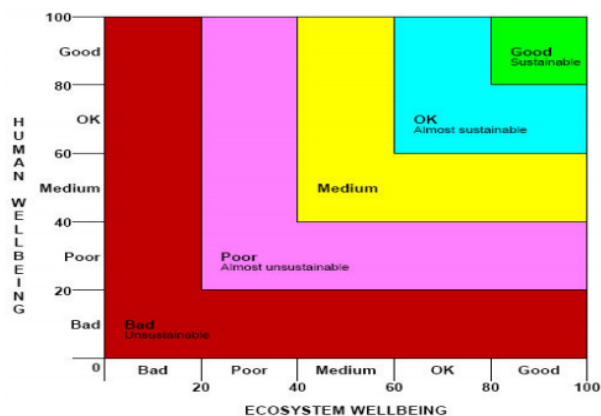
2.4.3 Modelo Barômetro da Sustentabilidade

O Barômetro da Sustentabilidade foi concebido em 1997 pelo pesquisador Robert Prescott-Allen (PRESCOTT-ALLEN, 1997) e consiste em um modelo que se fundamenta em duas dimensões de estudo, o bem-estar ecológico ou do ecossistema e o bem-estar humano (AMORIM, 2014). Segundo destaca Dalchiavon (2017),

O “bem-estar humano” é a condição na qual todos os membros da sociedade podem determinar e satisfazer suas necessidades, dentro de uma amplitude de escolhas, e “bem-estar do ecossistema” é uma condição na qual o ecossistema mantém sua diversidade e qualidade, sua capacidade de suportar toda a vida e seu potencial para se adaptar para mudanças providas pelas opções futuras (DALCHIAVON, 2017, p. 58).

O modelo possui flexibilidade, uma vez que o analista é quem determina quais os indicadores que serão usados (KRONEMBERGER & CLEVELÁRIO JÚNIOR, 2016). Segundo Lucena et. al. (2010), o BS pode ser aplicado tanto local quanto globalmente e somente indicadores quantificáveis é que podem ser considerados, o que constitui uma limitação. Os resultados do BS são expressos em um gráfico bidimensional, apresentado na Figura 3, que relaciona o bem-estar ecológico (*Ecosystem Wellbeing*) e o bem-estar humano (*Human Wellbeing*), onde é possível verificar o “grau de sustentabilidade do sistema analisado” (CARVALHO, 2012). Kronemberger & Clevelário Júnior (2008, 2016), realizaram estudos para a aplicação desta metodologia no Brasil, utilizando os IDS-IBGE como referência.

Figura 3 - Gráfico Barômetro da Sustentabilidade



Fonte: Carvalho, 2012

O gráfico apresentado na figura 3 mostra que, de acordo com o modelo, a sustentabilidade pode ser classificada em cinco estados, Insustentável (*Bad-Unsustainable*), Quase Insustentável (*Poor-Almost unsustainable*), Médio (*Medium*), Quase Sustentável (*OK-Almost sustainable*) e Sustentável (*Good-Sustainable*). É possível observar também que as classes variam de 0 a 100, de Insustentável a Sustentável, respectivamente.

2.4.4 Análise de Sustentabilidade por Avaliação Fuzzy

Phillis & Andriantiatsaholiniaina (2001) desenvolveram um modelo para avaliar o avanço de países em relação ao desenvolvimento sustentável combinando indicadores de sustentabilidade ecológica e humana. Os autores utilizaram a lógica fuzzy para a construção do modelo denominado SAFE (Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation). Este método baseia-se na construção de uma rede de Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF) formando níveis de agregação nos quais o número de variáveis de entrada diminui ao longo desses níveis. No sistema final, existem apenas duas variáveis de entrada, a sustentabilidade do ecossistema e a sustentabilidade humana, que são agregadas para expressar a sustentabilidade da região em estudo. A arquitetura geral do modelo é apresentada na Figura 4.

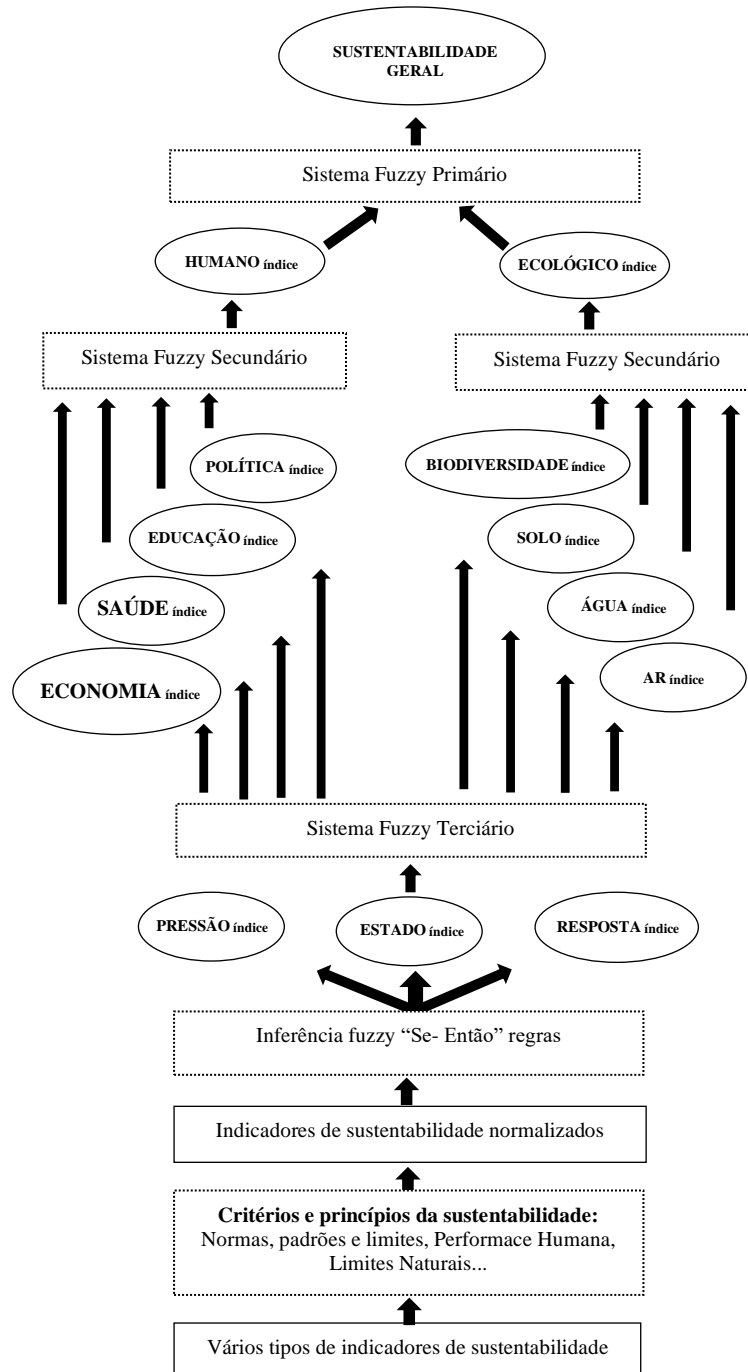
Alguns trabalhos deram seqüência no aprofundamento desta metodologia, dentre eles tem-se os estudos “Sustainability ranking and improvement of countries” (PHILLIS, GRIGORODIS & KOUIKOGLU, 2011) e “SAFE 2013: Sustainability of countries updated” (GRIGORODIS, KOUIKOGLU & PHILLIS, 2014). Estes trabalhos utilizam o SAFE como base para a avaliação da sustentabilidade e mostram em seus resultados um ranking dos 128 países estudados em dois momentos (2010 e 2013), onde os países mais sustentáveis

aparecem nas primeiras posições e os menos sustentáveis aparecem nas últimas posições. O Brasil está na 51ª posição no ano de 2010 e aparece na 35ª posição no ano de 2013, o que representa um avanço significativo do desenvolvimento sustentável no país.

Phillis, Kouikoglou & Verdugo (2017), fizeram um ranking de sustentabilidade com as principais cidades do globo, onde novamente o SAFE foi a base do estudo. A cidade de São Paulo ficou na 37ª posição e a cidade do Rio de Janeiro na 61ª posição num total de 106 cidades.

Nalashi et. al. (2019), utilizaram a metodologia SAFE no desenvolvimento de um modelo para analisar a sustentabilidade de um país, baseado em clusterização e aprendizado supervisionado. Os autores construíram e compararam dois modelos, “Fuzzy c-means clustering + Classification and Regression Tree (CART)” e “Fuzzy c-means clustering + Neuro-Fuzzy (ANFIS)”, sendo que o primeiro apresentou melhores resultados do que o segundo. Com o SAFE pode-se trabalhar um número grande de indicadores, ambientais, sociais, econômicos e institucionais, considerando a contribuição de todos no resultado final da sustentabilidade.

Figura 4 - Arquitetura SAFE



Fonte: Adaptado de Phillis & Andrintsiatsaholiniaina, 2001

2.5 Modelagem Fuzzy

A modelagem apoiada na lógica fuzzy fornece uma disposição matemática formal muito adequada na avaliação do progresso sustentável pois possibilita tanto a incorporação dos especialistas, que se apresentam com maior frequência nas situações que procuram aderir com

os aspectos das dimensões da sustentabilidade, assim como dos inúmeros tipos de incerteza como incompletude e inconsistência expostos nas informações (JADERI, 2014).

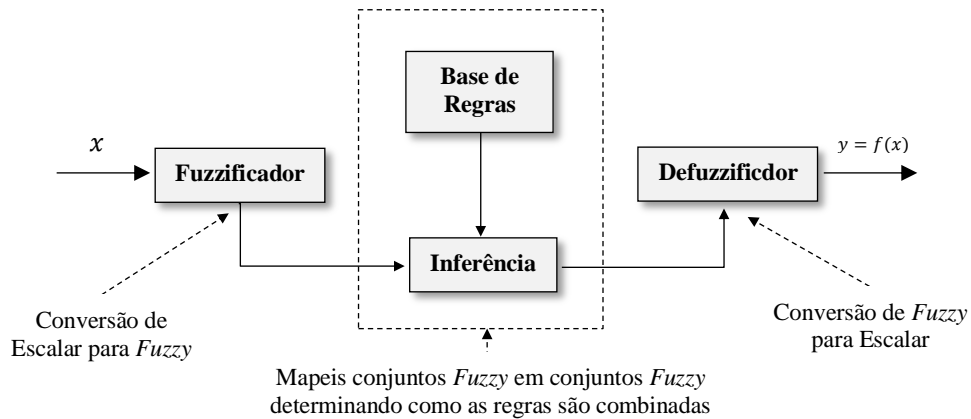
Nesta dissertação o termo lógica fuzzy será utilizado para além de compreendê-la como extensão da lógica clássica. Representa aqui um formalismo que, apoiado na teoria dos conjuntos fuzzy, possibilita representar e manipular informações qualitativas com o intuito de tomar decisões. A teoria dos conjuntos fuzzy, foi proposta por Lofti Zadeh (ZADEH, 1965), é uma teoria que vem sendo cada vez mais utilizada na formulação de modelos que contemplam subjetividades e incertezas (BARROS, BASSANEZI & LODWIK, 2017).

A ideia central fundamenta-se no pertencimento de um elemento que em um conjunto fuzzy deixa de ser limitado à verdadeiro ou falso como predizia a lógica clássica e passa a assumir valores lógicos intermediários entre a não pertinência, que recebe valor 0 (zero) e a pertinência completa do elemento neste conjunto, que assume valor 1 (um). Isto quer dizer que um valor lógico fuzzy é um valor qualquer no intervalo $[0, 1]$. A formalização de um conjunto fuzzy é dada pela função característica, Eq. 1, definida a seguir:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \} \quad \text{Eq.1}$$

Dados dois ou mais conjuntos fuzzy, as operações de intersecção (operador and), união (operador or) e complementar de subconjuntos fuzzy (operador not) ligam esses conjuntos de maneira a produzir um único subconjunto fuzzy, isto é, um dos subconjuntos dados. Essas concepções são primordiais para estabelecer os procedimentos dos sistemas de inferência fuzzy ou sistemas fundamentados em regras fuzzy. Tais sistemas apresentam uma abordagem que têm a habilidade de simular o raciocínio humano a partir das considerações de especialistas sobre a compreensão e resposta ao problema. São elaborados considerando basicamente quatro estágios: fuzzificação, base de regras, inferência e defuzzificação, apresentados na Figura 5.

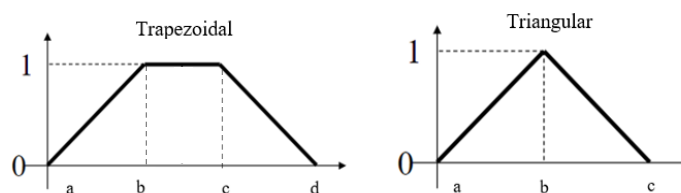
Figura 5 - Principais estágios para o desenvolvimento de um SIF



Fonte: Adaptado de Santos & Benicasa, 2012

No primeiro estágio, definido como fuzzificação, as entradas do sistema são modeladas por conjuntos fuzzy com seus relativos domínios. Para manifestar a contribuição de cada indicador na determinação das condições de um certo tema, por exemplo, as condições da Terra, serão adotados k valores linguísticos e montadas as funções de pertinência, ($j = 1, 2, \dots, k$), pertencentes a cada indicador, que apontam para cada dado de entrada x_i um valor no conjunto $[0, 1]$, isso, representa o grau de pertinência de x_i no conjunto fuzzy j . As funções de pertinência do tipo trapezoidal possuem quatro pontos principais em seu domínio (a, b, c e d), onde para valores do domínio maiores ou iguais a “ b ” e menores ou iguais a “ c ”, a pertinência é total no termo linguístico representado, ou seja, pertinência 1. Para valores entre “ a ” e “ b ”, a pertinência varia crescendo de 0 a 1, e para valores entre “ c ” e “ d ”, a pertinência decresce de 1 a 0. As funções triangulares possuem três pontos principais (a, b e c), no ponto “ b ”, a pertinência é total no termo linguístico representado, já para os valores entre “ a ” e “ b ”, a pertinência cresce variando de 0 a 1 e para valores do domínio entre “ b ” e “ c ”, a pertinência decresce variando de 1 a 0, Figura 6.

Figura 6 - Funções trapezoidal e triangular



Fonte: Autoria Própria

No estágio seguinte, é produzida a base de regras, constituída por um conjunto de ordens linguísticas na forma “Se <antecedente> Então <consequente>” que representam a relação entre as variáveis de entrada e saída conforme as informações dos especialistas. O estágio de inferência é o recurso pelo qual as informações subjetivas definidas pela base de regras são analisadas matematicamente. Finalmente, a defuzzificação reside em alterar o valor fuzzy de saída em um valor numérico que não seja fuzzy, ou seja, num valor crisp (BARROS, BASSANEZI & LODWIK, 2017).

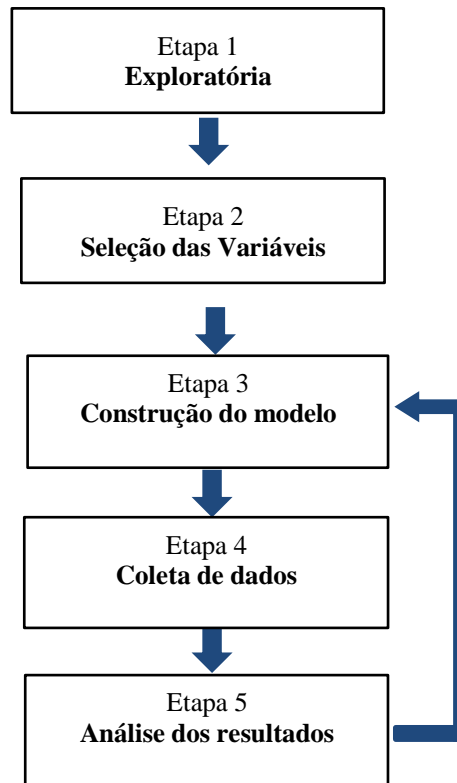
Soares (2014), desenvolveu um estudo, baseado na lógica fuzzy, para avaliar a sustentabilidade dos municípios brasileiros. O autor considerou as dimensões social, econômica e ambiental e seus resultados mostraram que a maioria dos municípios foram classificados com um índice de sustentabilidade muito baixo. Haider (2018), desenvolveu uma metodologia na qual utilizou a lógica fuzzy para estudar a sustentabilidade de uma pequena região. O modelo foi aplicado para um distrito no Canadá, os resultados revelaram boa situação da área de estudo em relação à sustentabilidade, sendo que o autor pôde concluir que a metodologia desenvolvida era realmente eficiente para a análise de pequenas regiões. Rossi, Gastaldi & Gecchele (2013), usaram a lógica fuzzy para avaliar a sustentabilidade em políticas alternativas de transportes no município de Mira em Portugal. Os autores que criaram dois modelos, um empregou a lógica fuzzy e outro utilizou AHP. Os resultados mostraram que o modelo empregando a lógica fuzzy apresentou melhor desempenho. Cassini (2019) utilizou a teoria dos conjuntos fuzzy na construção de um índice para mensurar o desempenho de alguns países do mediterrâneo em relação aos ODS na área agroalimentar, o autor concluiu que o sistema agroalimentar é mais sustentável nos países do norte do que nos países do sul. Um diferencial do estudo é que o autor considera que os indicadores podem pertencer a mais de uma dimensão diferente. Singh (2012), introduziu a técnica Neuro-Fuzzy no estudo da sustentabilidade, a associação de redes neurais e lógica fuzzy se mostrou uma excelente ferramenta de avaliação.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento dos índices para avaliar a sustentabilidade a partir de uma abordagem fuzzy contemplou quatro etapas principais, indicadas na Figura 7. A primeira etapa caracterizando-se como exploratória, compreendeu a análise e estudo sobre desenvolvimento sustentável, modelos para avaliar a sustentabilidade e fundamentos da teoria dos conjuntos fuzzy. A análise de pesquisas científicas foi realizada por meio da revisão da literatura

utilizando as bases de dados Science direct e Web of science. As demais etapas estão descritas nas seções seguintes.

Figura 7 – Fluxo do desenvolvimento da pesquisa realizada



Fonte: Autoria Própria

3.1 Seleção das Variáveis

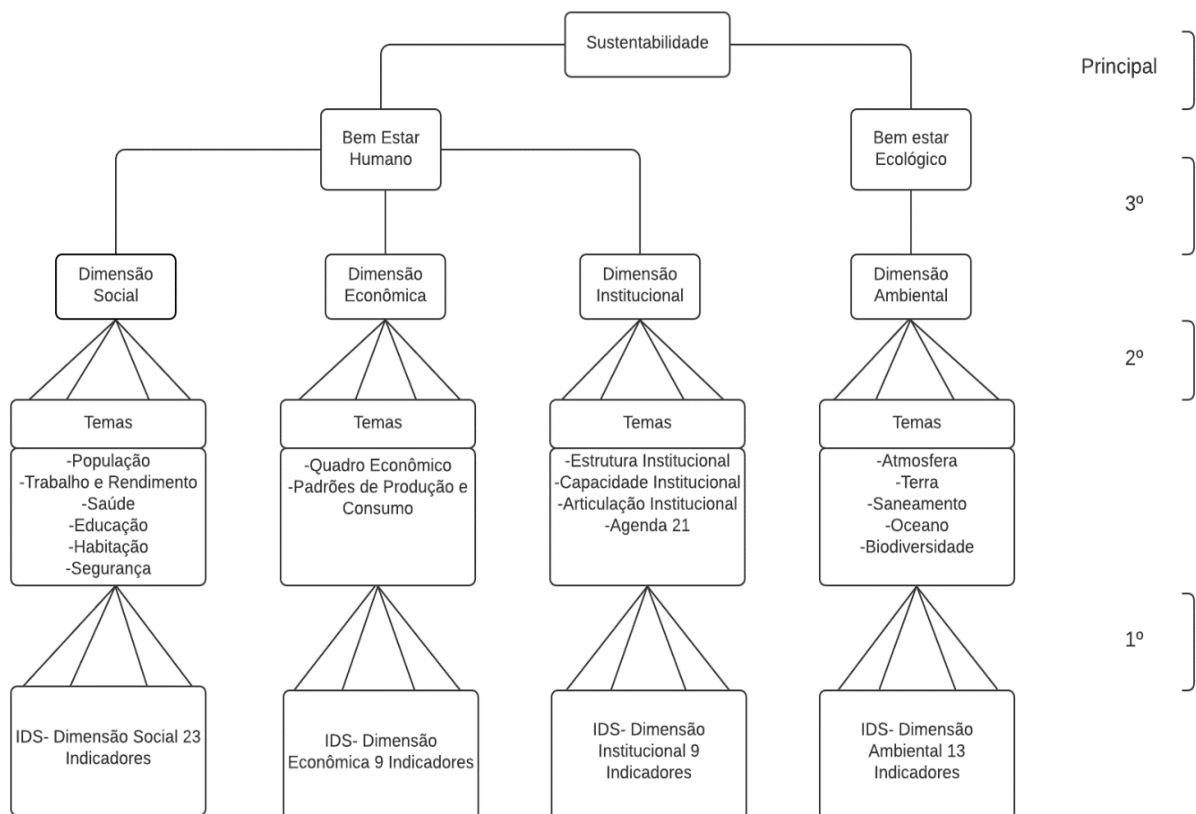
Neste estudo os IDS formaram as variáveis de entrada dos sistemas iniciais. Optou-se por adotar, na íntegra os indicadores e dimensões selecionados por Kronemberger & Clevelário Junior (2016), adaptados do Relatório de Desenvolvimento Sustentável , (IBGE, 2010), onde observou-se a disponibilidade de dados e a representatividade para o cenário brasileiro como critérios principais da escolha. Foram contemplados 53 indicadores distribuídos nas dimensões ambiental, social, econômica e institucional, detalhadas no capítulo 2.

3.2 Construção do Modelo

O objetivo deste estudo foi o desenvolvimento de índices para avaliar a condição de desenvolvimento sustentável por meio de uma abordagem fuzzy. Priorizou-se a utilização de uma estrutura baseada em temas, na qual os indicadores são agrupados em temas com relevância para a avaliação pretendida.

Para definir a estrutura geral a ser adotada foi considerado a importância de que o modelo possa produzir um índice para expressar de maneira clara, para os tomadores de decisão assim como para a sociedade em geral, a situação da localidade em relação ao desenvolvimento sustentável. Além disso, outra expectativa para o modelo é que a avaliação permita o monitoramento do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável. Dessa forma, optou-se por uma rede de sistemas de inferência fuzzy (SIF), que agregam os indicadores em temas, que por sua vez, são agregados em dimensões cuja agregação define os subsistemas que avaliam o Bem-estar ecológico e o Bem-estar humano e que, por fim, são agregados para gerar o índice de sustentabilidade fuzzy, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Arquitetura geral do modelo para avaliar as condições do desenvolvimento sustentável de uma localidade



Fonte: Autoria Própria

Mais especificamente, os IDS são agregados pelos SIF primários (nível 1) gerando a condição de sustentabilidade dos temas. Os temas, por sua vez são as variáveis de entrada para os SIF's secundários (nível 2), que determinam a sustentabilidade para as dimensões.

A dimensão ambiental revela as condições de Bem-estar ecológico e as dimensões social, econômica e institucional são agregada por um SIFterciário (nível 3) para expressar as condições de Bem-estar humano. Por fim, o Bem-estar ecológico e Bem-estar humano são as variáveis de entrada para o SIF principal, cuja variável de saída é o índice de Sustentabilidade Fuzzy. A construção do SIF principal bem como dos SIF's nos níveis 1, 2 e 3 pode ser resumida em três fases: fuzzificação, base de regras e inferência e defuzzificação, descritas a seguir.

3.2.1 Fuzzificação

A fase de fuzzificação consiste em modelar as variáveis de entrada e saída do sistema por conjuntos fuzzy. Os valores do domínio utilizados para fuzzificação de cada indicador, que representam as variáveis de entrada nos sistemas primários, foram adotados a partir da escala de desempenho proposta por Kronemberger & Clevelário Junior (2016), apresentadas nas tabelas a, b, c e d dos apêndices. Foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais para os conjuntos fuzzy Insustentável (I) e Sustentável (S) e funções de pertinência triangulares para os conjuntos fuzzy Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN) e Potencialmente Sustentável (PS).

Os indicadores, utilizados como variáveis de entrada nos SIF's primários, possuem duas características distintas, o que os levou a serem agrupados da seguinte forma: indicadores com comportamento “quanto menor melhor” (SB – Smaller Better) e com comportamento “quanto maior melhor” (LB – Larger Better), (PHILLIS, GRIGOROUDIS & KOUIKOGLOU, 2011). Por exemplo, o indicador “queimadas e incêndios florestais” (SB), quanto menores são seus valores, significa que menores são os números de incêndios florestais que aconteceram em determinado período de tempo, o que conseqüentemente caracteriza uma situação de melhor sustentabilidade. Para o indicador “destinação adequada do lixo coletado” (LB), situações de melhor sustentabilidade são representadas quanto maior for o valor do indicador, pois isso indica que há maior quantidade de lixo coletado sendo destinado adequadamente. Ou seja, quanto menores são os valores dos indicadores do tipo SB, melhor a condição de sustentabilidade que eles representam, já os indicadores do tipo LB, uma situação mais sustentável é representada tanto quanto maiores são os valores do indicador.

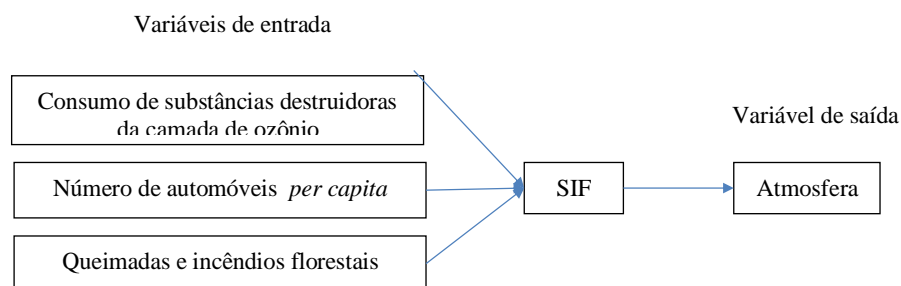
A fim de permitir combinações de diferentes indicadores sempre atribuindo o valor 1 ao melhor desempenho e 0 ao pior os valores do domínio foram reescalados para valores no intervalo [0,1] por meio da equação 1 (PHILLIS, GRIGOROUDIS & KOUIKOGLOU, 2011):

$$x_c(t) = \begin{cases} 0, & z_c(t) \leq v_c \\ \frac{z_c(t)-v_c}{\tau_c-v_c}, & v_c < z_c(t) < \tau_c \\ 1, & \tau_c \leq z_c(t) \leq T_c \\ \frac{U_c(t)-z_c}{U_c-T_c}, & T_c < z_c(t) < U_c \\ 0, & U_c \leq z_c(t), \end{cases} \quad (1)$$

Onde $x_c(t)$ é o valor reescalado, $z_c(t)$ é valor antes do reescalamento, v_c e τ_c são os limites inferiores e superiores respectivamente do domínio dos indicadores do tipo “quanto menos melhor” (SB) e U_c e T_c são os valores dos limites inferiores e superiores respectivamente dos domínios dos indicadores do tipo “quanto mais melhor” (LB).

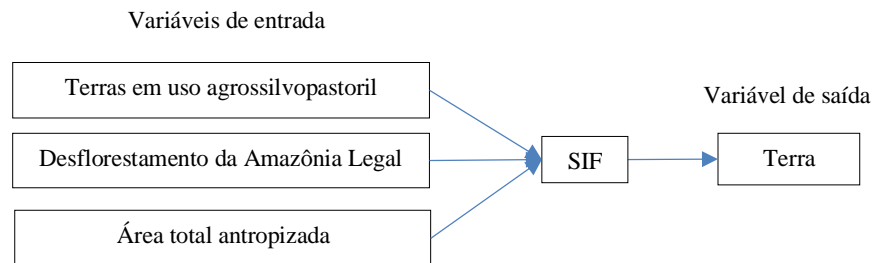
Para ilustrar o processo de fuzzificação escolheu-se apresentar os procedimentos realizados para a dimensão ambiental, pois as demais dimensões foram fuzzificadas de forma similar. Nesta dimensão foram elaborados três SIF's primários, para os temas atmosfera, terra e saneamento. Os temas oceano e biodiversidade entraram diretamente no SIF secundário da dimensão ambiental como variáveis de entrada, pois cada um possui apenas um indicador. As Figuras de 9 a 11 mostram a arquitetura dos SIF's primários atmosfera, terra e saneamento. Os sistemas foram implementados usando a ferramenta FuzzyToolKit (KNOTT, HOVELL & KARIMIAN, 2013) do software livre R (R CORE TEAM, 2019).

Figura 9 - Arquitetura do SIF primário que determina as condições de sustentabilidade para o tema Atmosfera a partir dos três indicadores.



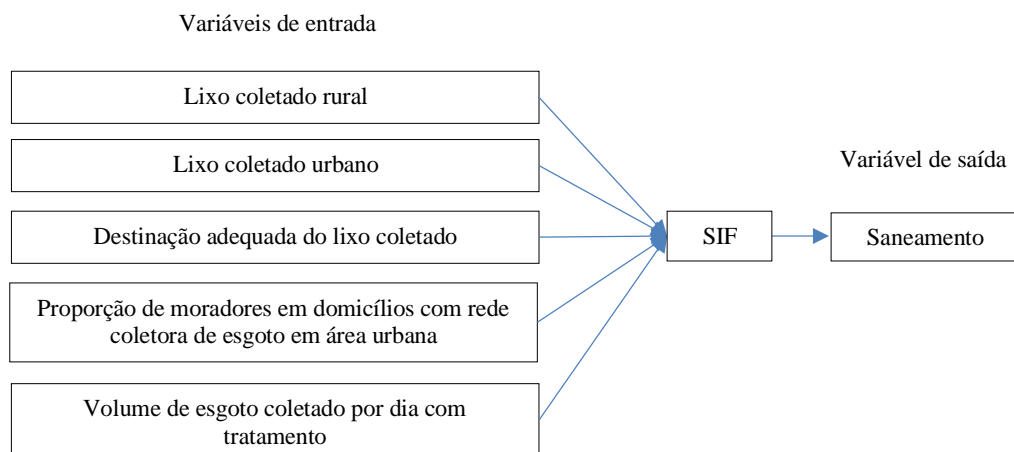
Fonte: Autoria Própria

Figura 10 - Arquitetura do SIF primário que determina as condições de sustentabilidade para o tema Terra a partir dos três indicadores.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11- Arquitetura do SIF primário Saneamento que determina as condições de sustentabilidade para o tema Saneamento a partir dos cinco indicadores.

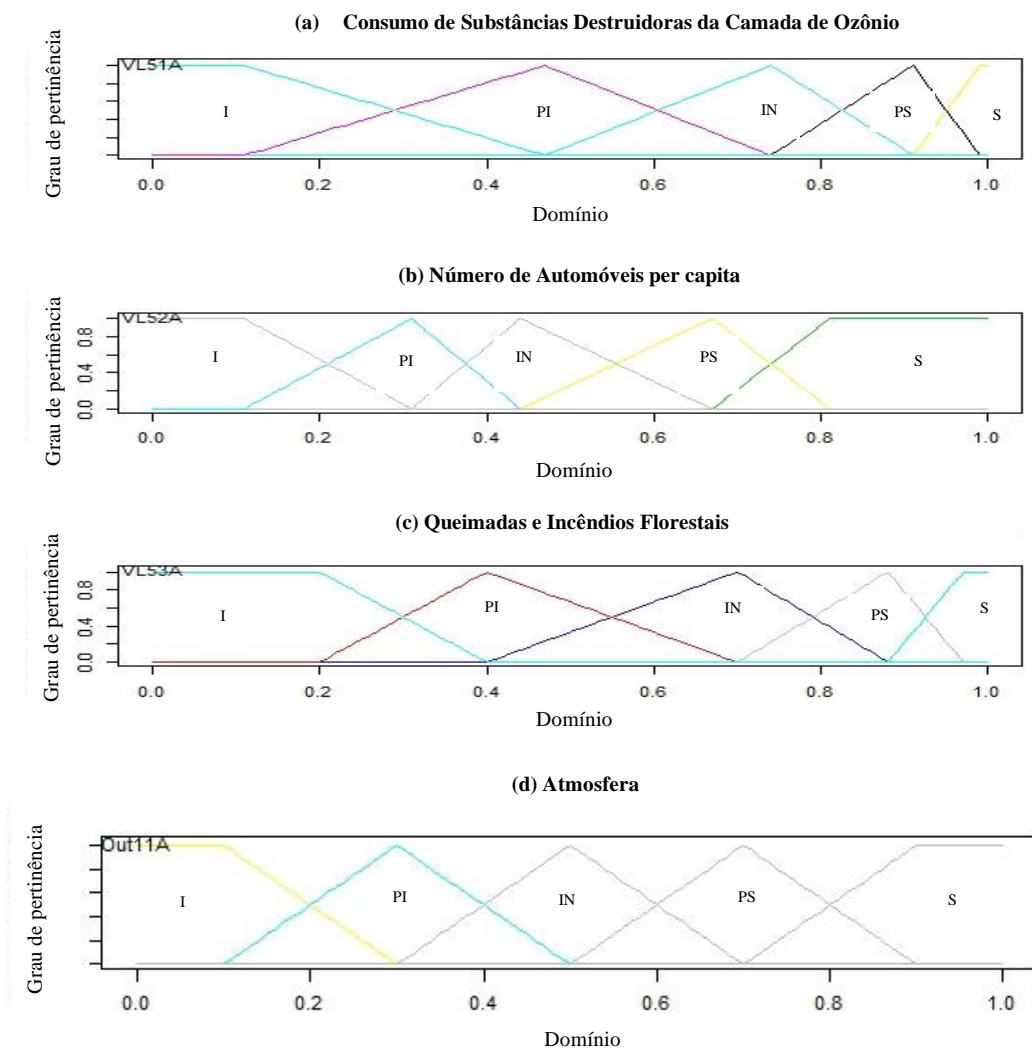


Fonte: Autoria própria.

Para o processo de fuzzificação das variáveis foram atribuídos cinco termos linguísticos: Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) aos conjuntos fuzzy das variáveis de entrada (indicadores) e da variável de saída. As funções de pertinência foram modeladas a partir das Escalas de Desempenho (ED) elaboradas por Kronemberger e Clevelário Junior (2016) para a dimensão ambiental. Associadas ao termos linguísticos extremos, Insustentável e Sustentável, foram utilizadas funções do tipo trapezoidal ao passo que, as funções associadas aos termos linguísticos intermediários, Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN) e Potencialmente Sustentável (PS) foram do tipo triangular. Esta escolha foi fundamentada pelo fato dos conjuntos extremos serem regiões onde a incerteza é menor, já nos conjuntos

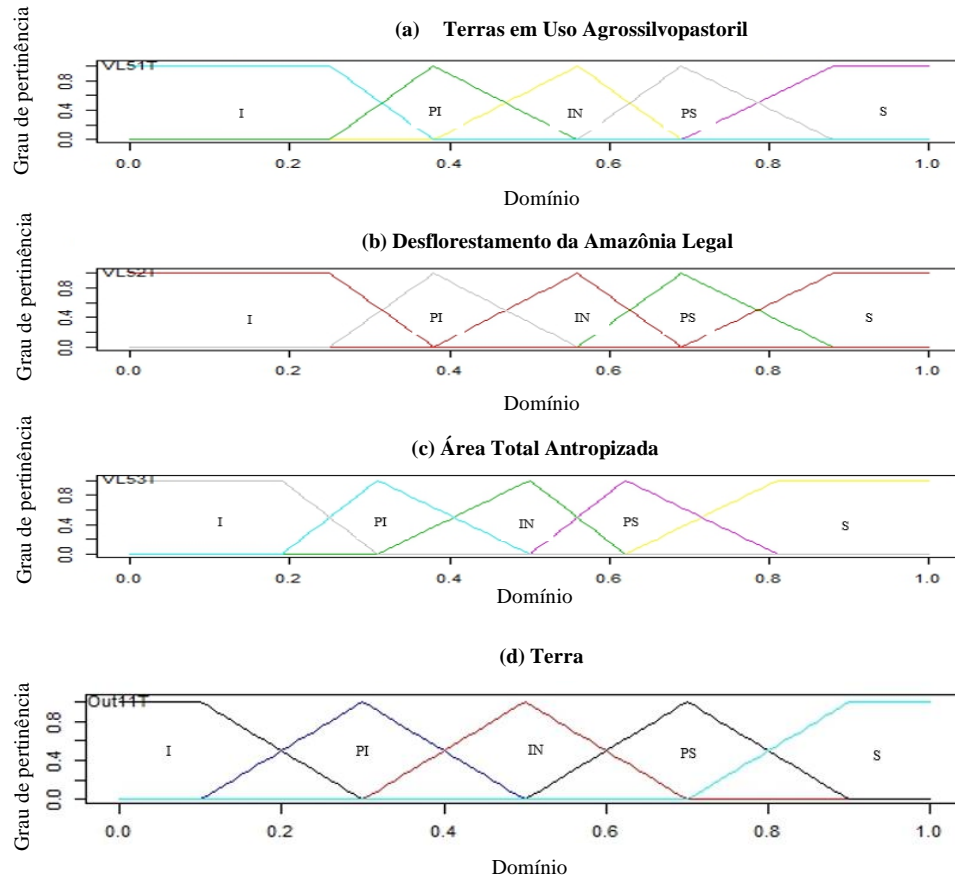
intermediários foram considerados regiões de maior incerteza. As Figuras 12, 13 e 14 ilustram as funções de pertinência utilizadas na fuzzificação dos sistemas primários da dimensão ambiental.

Figura 12 – Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c) e da variável de saída (d) do SIF primário Atmosfera.



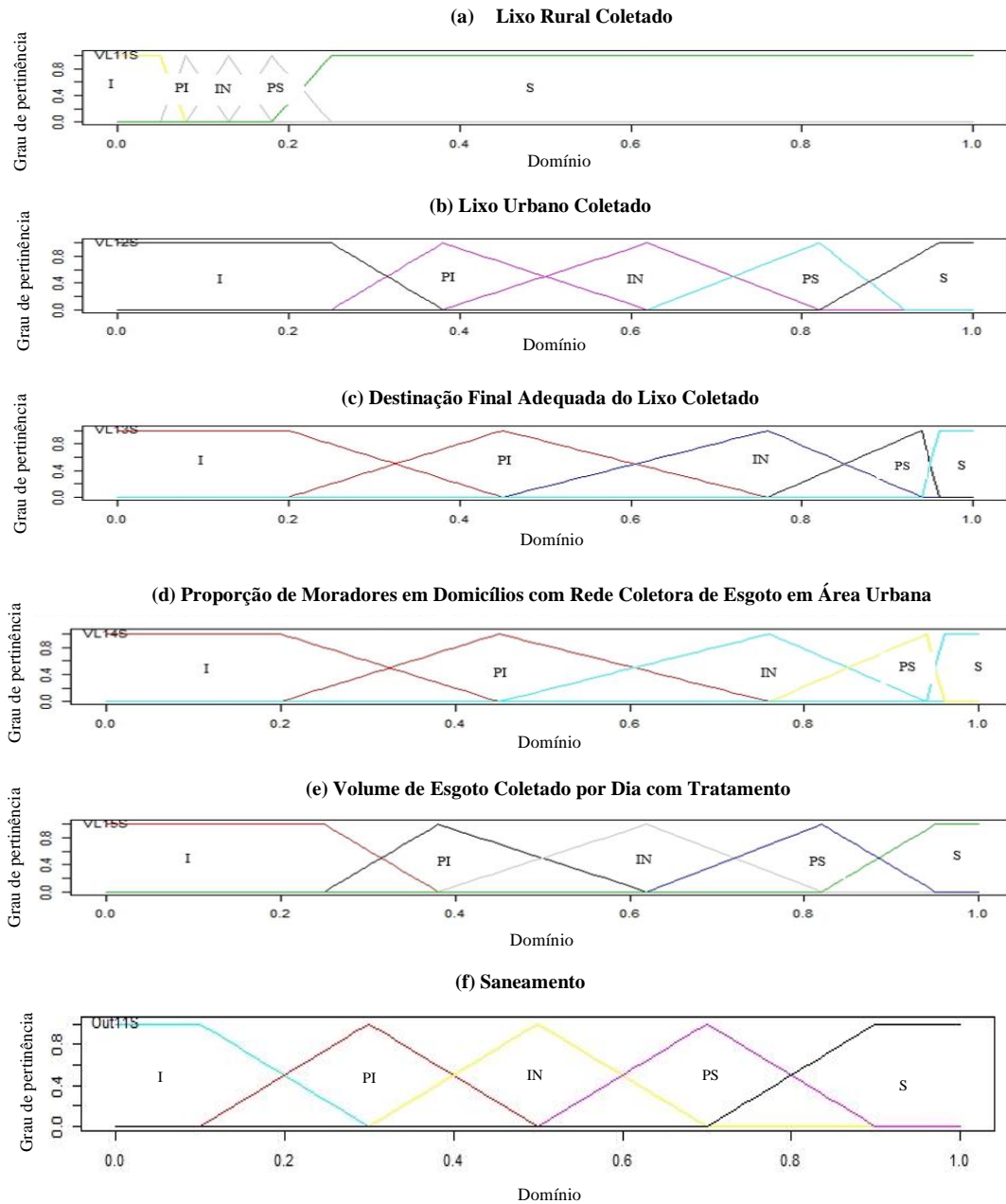
Fonte: Autoria Própria.

Figura 13 - Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c) e da variável de saída (d) do SIF primário Terra.



Fonte: Autoria própria.

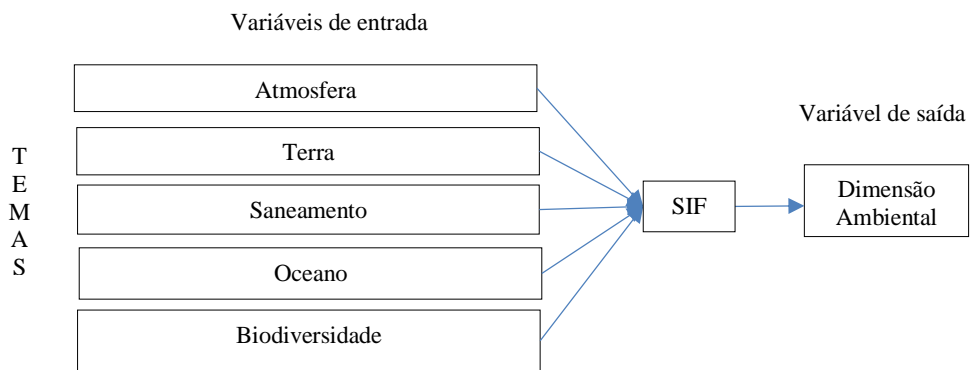
Figura 14 - Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c), (d) e (e) e a variável de saída (f) do SIF primário Saneamento.



Fonte: Autoria própria.

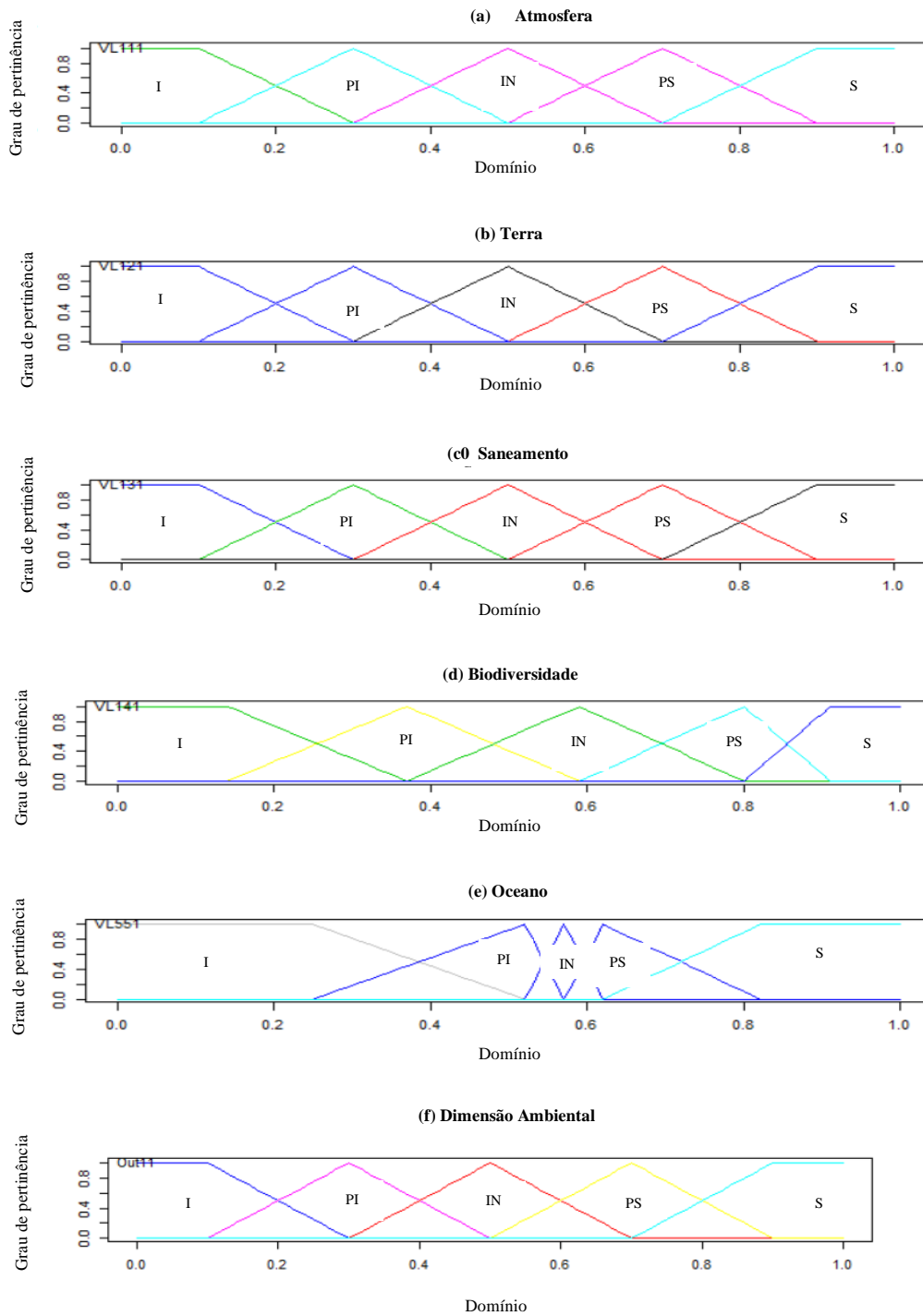
O processo de fuzzificação para os sistemas secundários é realizado de modo similar aos sistemas primários. A partir desta fase as variáveis de saída dos sistemas primários são idênticas às variáveis de entrada para os sistemas secundários como apresenta a Figura 15. As variáveis de saída de cada um dos quatros sistemas secundários representam as condições de sustentabilidade para as dimensões que constituem os pilares do desenvolvimento sustentável. As funções de pertinência para as variáveis de entrada e de saída, referentes à dimensão ambiental, estão apresentadas na Figura 15.

Figura 15- Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Ambiental a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.



Fonte: Autoria própria.

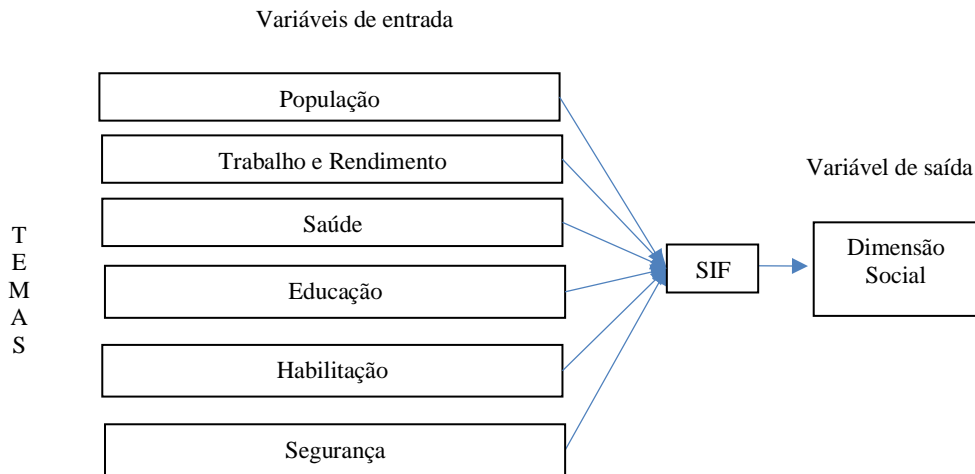
Figura 16- Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) das variáveis de entrada (a), (b), (c), (d) e (e) e da variável de saída do SIFsecundário dimensão ambiental.



Fonte: Autoria Própria

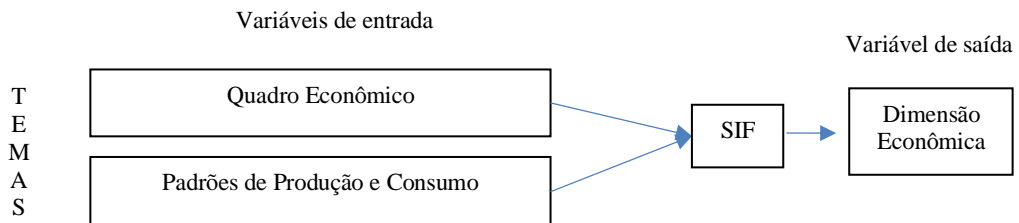
As demais dimensões, Social, Econômica e Institucional, passaram por processo similar de fuzzificação. As Figuras 17, 18 e 19 exibem a arquitetura dos sistemas.

Figura 17 – Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Social a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.



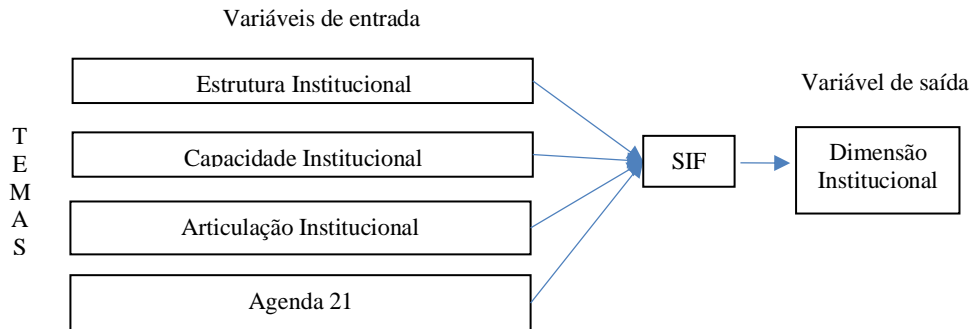
Fonte: Autoria Própria

Figura 18 – Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Econômica a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.



Fonte: Autoria Própria

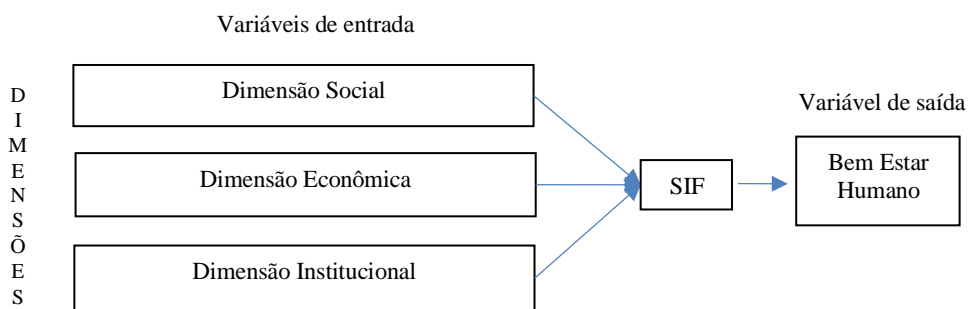
Figura 19 – Arquitetura do SIF secundário que determina as condições de sustentabilidade para a Dimensão Institucional a partir dos temas definidos pelos sistemas primários.



Fonte: Autoria Própria

Após a fuzzificação houve a agregação das dimensões Social, Econômica e Institucional por meio do SIF terciário. A variável de saída, Bem Estar Humano, representa as condições de sustentabilidade para este subsistema. A arquitetura deste sistema terciário é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Arquitetura do SIF terciário que determina as condições de sustentabilidade para o subsistema Bem-estar humano a partir das dimensões definidas pelos sistemas secundários.



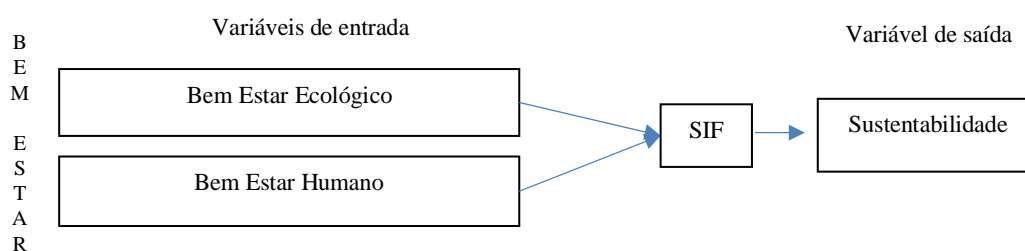
Fonte: Autoria Própria

O Bem-estar ecológico é representado apenas pela dimensão Ambiental, razão pela qual não foi necessário utilizar qualquer agregação.

O SIF principal recebeu as variáveis de entrada dos subsistemas Bem-estar humano e Bem-estar ecológico. A saída, denominada Índice de Sustentabilidade Fuzzy, representa o

nível geral de desenvolvimento sustentável atingido. A arquitetura deste sistema está apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Arquitetura do SIF principal que determina o Índice de Sustentabilidade Fuzzy a partir das condições de sustentabilidade dos subsistemas Bem-estar humano e Bem-estar ecológico.



Fonte: Autoria Própria

3.2.2 Base de Regras e Inferência

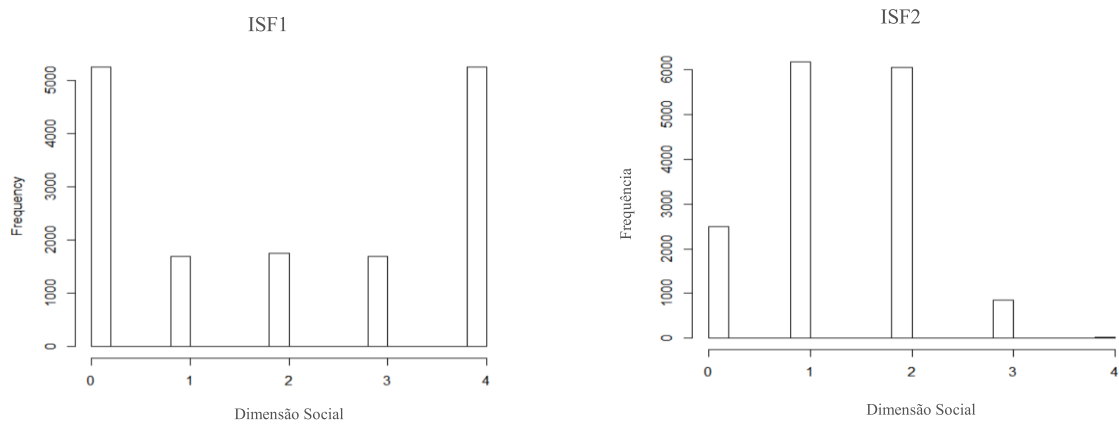
Nesta fase foram elaboradas as regras fuzzy, do tipo “se-então”, para expressar linguisticamente a relação entre as variáveis de entrada e de saída. Cada regra revela a partir da “condição” das variáveis de entrada a “ação” que será realizada pelo modelo. A combinação de todos os conjuntos fuzzy de cada variável de entrada define a base de regras para o sistema. Nos sistemas aqui propostos, as variáveis de entrada foram construídas com cinco conjuntos fuzzy, o que conseqüentemente produz uma base com 243 regras para os sistemas com 3 entradas e com 3125 regras para os sistemas com cinco entradas.

Devido ao alto número de regras a serem elaboradas buscou-se métodos alternativos para a geração das regras em contraponto ao clássico conhecimento especialista usualmente empregado. A representação compacta da base de regras conforme proposto por (PHILLIS, GRIGOROUDIS & KOUIKOGLU, 2011) foi escolhida com o intuito de viabilizar o desenvolvimento do modelo. Este método consiste em atribuir valores numéricos para os termos linguísticos e a formação da regra é realizada a partir da soma ponderada de valores. A elaboração das regras por essa abordagem foi realizada em três etapas:

- 1) Cada conjunto fuzzy recebeu um número de 0 a 4, tendo sido realizada as seguintes atribuições para os conjuntos fuzzy das variáveis de entrada: Insustentável(0), Potencialmente Insustentável (1), Intermediário (2), Potencialmente Sustentável (3) e Sustentável (4).

- 2) Para cada regra, uma soma dos valores anteriormente atribuídos às entradas é calculada e atribuída à variável de saída. Por exemplo, considere uma das regras do sistema primário Atmosfera: Se “ consumo de ozônio” for Insustentável e “número de automóveis” for , Potencialmente Sustentável e “ queimadas e incêndios florestais” for Intermediário então a Atmosfera será Potencialmente Insustentável; a soma $0+3+2= 5$ é o valor de entrada que será relacionado a algum conjunto de saída.
- 3) Os valores resultantes das somas das entradas são atribuídos a algum conjunto fuzzy da variável de saída. Nesta etapa, foram construídas duas escalas distintas para a associação dos valores de entrada e saída. Conseqüentemente, cada escala deverá produzir respostas diferentes para o modelo. A escala 1, cujas saídas serão denominadas ISF1, foi elaborada considerando o comportamento das frequências das somas obtidas. Concentrou cerca de 60% dos termos linguísticos para a variável de saída nos extremos, Insustentável e Sustentável, com cerca de 30% de regras cada. Os 40% restantes são distribuídos nos três conjuntos intermediários, Potencialmente Insustentável, Intermediário e Potencialmente Sustentável, onde cada termo recebeu cerca de 13% das regras. A escala 2, cujas saídas serão denominadas ISF2, usou o conhecimento de um especialista da área de Engenharia Ambiental para definir a relação com os conjuntos de saída neste processo automático de regras. A Figura 22 mostra a frequência de associação dos valores de entrada (obtidos pelas somas definidas na etapa (1)) aos conjuntos fuzzy de saída por meio das escalas 1 e 2.

Figura 22 – Frequência de associação dos valores de entrada aos conjuntos fuzzy de saída: Insustentável (0), Potencialmente Insustentável (1), Intermediário (2), Potencialmente Sustentável (3) e Sustentável (4) por meio das escalas 1 e 2, que produzem os índices ISF1 e ISF2.



Fonte: Autoria Própria

Por exemplo, a base de regras para o SIF primário Atmosfera, composto por três variáveis de entrada, compreende 243 regras. Considerando o pior cenário possível, no qual os estados das variáveis são classificados como Insustentável(0), o menor valor da soma seria igual a zero e para o melhor cenário- no qual todos os estados são Sustentáveis (4), o maior valor para a soma seria 12. Os valores de 0 a 12 foram distribuídos entre os cinco termos linguísticos da variável de saída.

O ISF1 foi gerado a partir da base de regras elaborada a partir da escala 1. Para este SIF a base de regras é definida compactamente da seguinte forma: quando a soma obtida for ≤ 4 , é atribuído o valor 0 para a variável de saída atmosfera, correspondendo ao termo linguístico Insustentável (I); se a soma for 5, então é atribuído o valor 1 para a variável de saída, correspondendo ao termo linguístico Potencialmente Insustentável (PI), se a soma for igual a 6, então a variável de saída recebe o valor 2, correspondendo ao termo linguístico Intermediário (IN), se a soma for 7, então a variável de saída recebe valor 3, correspondendo ao termo linguístico Potencialmente Sustentável (PS) e por fim, se a soma for ≥ 8 , a variável de saída recebe valor 4, correspondente ao termo linguístico Sustentável (S).

No ISF2 a escala para a variável de saída atmosfera foi estabelecida da seguinte forma: se a soma obtida for ≤ 3 , é atribuído o valor 0 para a variável de saída atmosfera, correspondendo ao termo linguístico Insustentável (I), se a soma for igual a 4 ou igual a 5, então

é atribuído o valor 1 para a variável de saída, correspondendo ao termo linguístico Potencialmente Insustentável (PI), se a soma for igual a 6 ou igual a 7, então a variável de saída recebe o valor 2, correspondendo ao termo linguístico Intermediário (IN), se a soma for 8 ou 9 ou 10, então a variável de saída recebe valor 3, correspondendo ao termo linguístico Potencialmente Sustentável (PS) e por fim, se a soma for ≥ 11 , a variável de saída recebe valor 4, correspondente ao termo linguístico Sustentável (S).

Na Tabela 1, estão apresentadas as escalas 1 e 2 que representam compactamente as bases de regras para todos os sistemas primários, secundários, terciários e principal desenvolvidos neste modelo. A quantidade geral de cada regras para cada sistema depende do número de variáveis de entrada.

Tabela 1 – Representação da base de regras dos modelos ISF1 e ISF2 para os sistemas primários, secundários, terciários e principal de acordo com o número de variáveis de entrada.

Nº de variáveis	ISF1	ISF2
2 variáveis de entrada	Saída = 0 (I), se soma ≤ 2 Saída = 1 (PI), se soma = 3 Saída = 2 (IN), se soma = 4 Saída = 3 (PS), se soma = 5 Saída = 4 (S), se soma ≥ 6	Saída = 0 (I), se soma ≤ 1 Saída = 1 (PI), se soma = 2, 3 Saída = 2 (IN), se soma = 4, 5 Saída = 3 (PS), se soma = 6, 7 Saída = 4 (S), se soma = 8
3 variáveis de entrada	Saída = 0 (I), se soma ≤ 4 Saída = 1 (PI), se soma = 5 Saída = 2 (IN), se soma = 6 Saída = 3 (PS), se soma = 7 Saída = 4 (S), se soma ≥ 8	Saída = 0 (I), se soma ≤ 3 Saída = 1 (PI), se soma = 4, 5 Saída = 2 (IN), se soma = 6, 7 Saída = 3 (PS), se soma = 8, 9, 10 Saída = 4 (S), se soma ≥ 11
4 variáveis de entrada	Saída = 0 (I), se soma ≤ 6 Saída = 1 (PI), se soma = 7 Saída = 2 (IN), se soma = 8 Saída = 3 (PS), se soma = 9 Saída = 4 (S), se soma ≥ 10	Saída = 0 (I), se soma ≤ 4 Saída = 1 (PI), se soma = 5, 6, 7 Saída = 2 (IN), se soma = 8, 9, 10 Saída = 3 (PS), se soma = 11, 12, 13, 14 Saída = 4 (S), se soma ≥ 15
5 variáveis de entrada	Saída = 0 (I), se soma ≤ 8 Saída = 1 (PI), se soma = 9 Saída = 2 (IN), se soma = 10 Saída = 3 (PS), se soma = 11 Saída = 4 (S), se soma ≥ 12	Saída = 0 (I), se soma ≤ 4 Saída = 1 (PI), se soma = 5, 6, 7, 8, 9 Saída = 2 (IN), se soma = 10, 11, 12, 13 Saída = 3 (PS), se soma = 14, 15, 16, 17 Saída = 4 (S), se soma ≥ 18
6 variáveis de entrada	Saída = 0 (I), se soma ≤ 10 Saída = 1 (PI), se soma = 11 Saída = 2 (IN), se soma = 12 Saída = 3 (PS), se soma = 13 Saída = 4 (S), se soma ≥ 14	Saída = 0 (I), se soma ≤ 8 Saída = 1 (PI), se soma = 9, 10, 11, 12 Saída = 2 (IN), se soma = 13, 14, 15, 16, 17 Saída = 3 (PS), se soma = 18, 19, 20, 21 Saída = 4 (S), se soma ≥ 22

Fonte: Autoria Própria

O mecanismo de inferência é a relação fuzzy que modela matematicamente a base de regras. Para todos os sistemas desenvolvidos foi utilizada a inferência de Mamdani que utiliza os operadores Max-Min para as agregações.

3.2.3 Defuzzificação

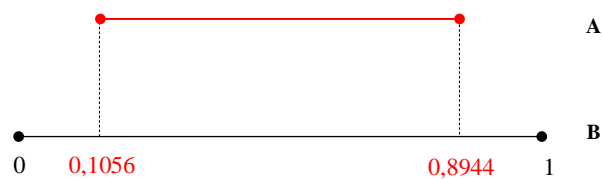
Para a defuzzificação foi utilizado o método do centróide, onde a contribuição de cada regra acionada é considerada na composição da variável de saída.

Os valores das variáveis Atmosfera, Terra e Saneamento passaram por uma transformação algébrica, conforme equação 2. Isso foi necessário devido a adequação dos valores finais dos sistemas, pois o software não retorna os valores 0 e 1, mas os valores mínimo 0,1056 e máximo 0,8944, ou seja, foi feito um ajuste de extrapolação do intervalo de saída passando a variar entre [0, 1] o que antes variava entre [0,1056; 08944].

$$y(x) = 1,2677 x - 0,1338 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde x é o valor da saída no intervalo emitido pelo software (A) e $y(x)$ é o valor ajustado para o novo intervalo (B), como apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Intervalos antes (A) e depois da transformação (B)



Fonte: Autoria Própria.

3.3 Coleta de dados

Os sistemas foram alimentados com os mesmos dados usados por Kronemberger & Clevelário Júnior (2016), onde foram utilizados os valores dos IDS como mostra as Tabelas de 2 a 5, de acordo com a disponibilidade dos dados para os anos base de 2002 e 2011.

Tabela 2 - Dados da dimensão ambiental

Tema	Indicador	Valor
Atmosfera	Consumo industrial de substâncias destruidoras da camada de Ozônio (em t PDO – Potencial de Destruição de Ozônio)	3975 (2002) 1046 (2011)
	Número de veículos per capita (por 1 000 hab.)	132 (2002) 207 (2011)
	Queimadas e incêndios florestais (n.º de focos de calor por 1 000 km² ao ano)	27,2 (2002) 7,2 (2011)
Terra	Terras em uso agrossilvipastoril (%)	29,2 (1996) 26,5 (2006)
	Desflorestamento na Amazônia Legal (%)	12,1 (2002) 15,1 (2011)
	Área total antropizada (%)	36,6 (2004)
Oceanos, mares e áreas costeiras	Produção do pescado marítima (extrativista) (1000 t)	509,9 (2001) 585,7 (2009)
Biodiversidade	Áreas protegidas (%)	6,5 (2003) 8,8 (2012)
	Lixo coletado rural (%)	17,4 (2002) 28,2 (2011)
Saneamento	Lixo coletado urbano (%)	95,3 (2002) 98,1 (2011)
	Destinação final adequada do lixo coletado (%)	40,5 (2000) 66,4 (2008)
	Volume de esgoto coletado (%)	52 (2002) 61,3 (2008)
	Tratamento do esgoto coletado (%)	35,3 (2000) 68,8 (2008)

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Júnior (2016)

Tabela 3 - Dados da dimensão social

Tema	Indicador	Valor
População	Taxa de crescimento populacional	1,64 (1991-2000) 1,17 (2000-2010)
Trabalho e Rendimento	Taxa de desocupação (%)	11,5 (2002) 5,9 (2011)
	Índice de Gini (adimensional)	0,57 (2002) 0,51 (2011)

(continua)

Tabela 3 - Dados da dimensão social

(continua)		
Tema	Indicador	Valor
Trabalho e Rendimento	Rendimento médio mensal (R\$)	635 (2002) 1279 (2011)
	Salário mínimo	200 (2002) 545 (2011)
	Razão de rendimento por sexo (mulher/homem) (adimensional)	0,66 (2002) 0,68 (2011)
	Razão de rendimento por cor ou raça (negros + pardos/brancos) (adimensional)	0,50 (2002) 0,60 (2011)
Saúde	Esperança de vida ao nascer	71,0 (2002) 74,1 (2011)
	Taxa de mortalidade infantil (‰)	27,8 (2002) 16,1(2011)
	Imunização contra doenças infecciosas infantis (%)	97 (2002) 98 (2010)
	Número de leitos hospitalares/ mil habitantes	2,7 (2002) 2,3 (2009)
Educação	Escolaridade (nº)	6 (2002) 7 (2009)
	Taxa de escolarização (7-14 anos) (%)	97 (2002) 99 (2011)
	Taxa de alfabetização (%)	88 (2002) 91,4 (2011)
	Razão de alfabetização por sexo (adimensional)	1 (2002) 1 (2011)
	Razão de alfabetização por cor ou raça (adimensional)	0,89 (2002) 0,93 (2011)
Habitação	Domicílios com acesso a rede geral de água (%)	82 (2002) 84,6 (2011)
	Domicílios com acesso a rede geral de esgoto ou fossa séptica (%)	68,1 (2002) 93,8 (2011)

Tabela 3 - Dados da dimensão social

(conclusão)		
Tema	Indicador	Valor
Segurança	Domicílios com coleta de lixo (direta e indireta) (%)	84,8 (2002) 88,8 (2011)
	Domicílios com iluminação elétrica (%)	97 (2002) 99 (2011)
	Densidade média de moradores por dormitório (n.º pessoas/dormitório)	1,9 (2002) 1,7 (2011)
	Coefficiente de mortalidade por homicídios (nº/ 100 mil habitantes)	28,2 (2002) 27,8 (2011)
	Coefficiente de mortalidade por acidentes de transporte (nº/ 100 mil habitantes)	18,9 (2002) 23 (2011)

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Júnior (2016)

Tabela 4 – Dados da dimensão econômica

Tema	Indicador	Valor
Quadro Econômico	PIB – Produto Interno Bruto per capita (R\$)	8692 (2002) 11076 (2011)
	Taxa de Investimento (%)	18,32 (2002) 21,55 (2011)
	Balança Comercial - Saldo/PIB (%)	2,85 (2002) 1,35 (2011)
	Grau de Endividamento (Dívida Externa/PIB - %)	35,9 (2002) 0 (2011)
Padrões de produção e consumo	Consumo de Energia per capita (TEP/pessoa.ano)	0,945 (2002) 1,282 (2011)
	Intensidade Energética (PIB em US\$/Consumo de Energia em KWh)	1,29 (2002) 1,29 (2011)
	Participação de Fontes Renováveis na Oferta de Energia (%)	41 (2002) 44 (2011)
	Reciclagem (%)	49,26 (2002) 55,68 (2011)
	Coleta Seletiva (%)	8,2 (2002) 19,5 (2011)

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Júnior (2016)

Tabela 5 – Dados da dimensão institucional

Tema	Indicador	Valor
Estrutura Institucional	Ratificação de Acordos Globais Ambientais (%)	72 (2004) 73 (2013)
	Existência de Conselhos de Meio Ambiente Municipais (%)	22,3 (2001) 39,9 (2009)
Capacidade Institucional	Gastos com Pesquisa e Desenvolvimento (%)	1 (2000) 1,2 (2010)
	Acesso a Serviços de Telefonia (nº telefones/1 000 habitantes)	287 (2002) 332 (2011)
	Acesso à Internet (%)	10,3 (2002) 36,5 (2011)
Articulação Institucional	Representação da Sociedade Civil no Conselho de Meio Ambiente (%)	26,2 (2002) 44,2 (2011)
	Implementação de Parceria na Área Ambiental (%)	44,6 (2002) 29,1 (2011)
Agenda 21	Implementação da Agenda 21 Local (%)	51 (2002) 41,2 (2011)
	Agenda 21 Local com Fórum (%)	23 (2002) 30,1 (2011)

Fonte: Adaptado de Kronemberger & Clevelário Júnior (2016)

Os valores de saída dos modelos, que variaram no intervalo [0,1], referente ao nível de sustentabilidade obtido pelo ISF1 ou pelo ISF2, é classificado de acordo com a Tabela 6. Estes valores foram fundamentados na escala de saída do Barômetro da sustentabilidade (KRONEMBERGER & CLEVELÁRIO JUNIOR, 2016), porém esta utiliza um intervalo de 0 a 100.

Tabela 6 - Escala final ISF1e ISF2

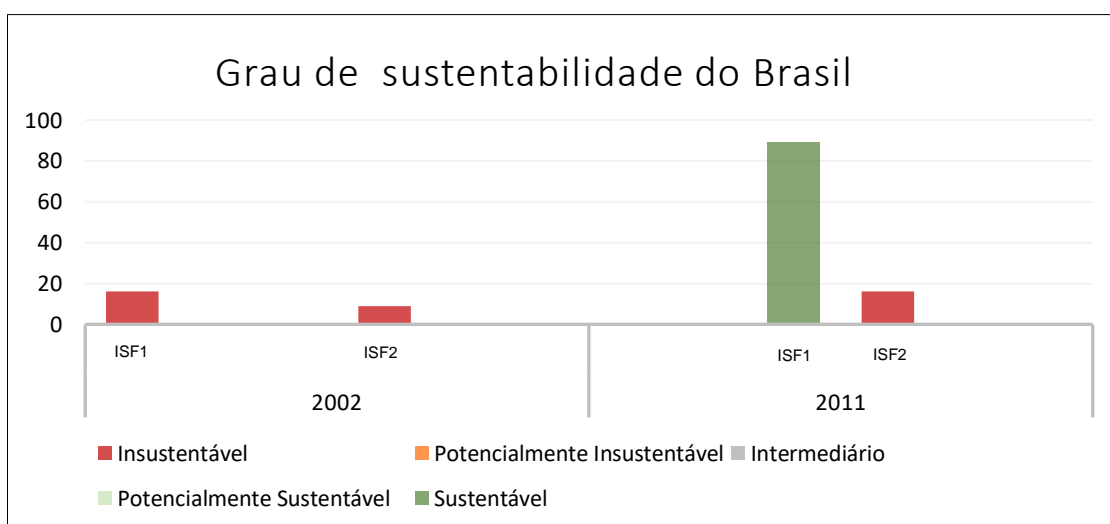
Termo Linguístico	Valor
Insustentável (I)	(0,0, 0,2]
Potencialmente Insustentável (PI)	(0,2, 0,4]
Intermediário (IN)	(0,4, 0,6]
Potencialmente Sustentável (PS)	(0,6, 0,8]
Sustentável (S)	(0,8, 1]

Fonte: Autoria Própria.

4 Resultados e Discussão

A classificação da sustentabilidade do Brasil é apresentada na Figura 24. O modelo ISF1 apresenta para os dados de 2002 o grau de sustentabilidade 16 e para os dados de 2011 o grau 89 o que classifica a situação geral de sustentabilidade no país como sendo Insustentável no período de 2002 e Sustentável no período seguinte. No entanto, o modelo ISF2 apresenta o grau 9 para os dados de 2002 e 16 para os dados relativos a 2011 classificando a situação geral da sustentabilidade no Brasil como Insustentável para ambos os períodos.

Figura 24 - Classificação de sustentabilidade do Brasil segundo ISF1 e ISF2 para os anos de 2002 e 2011.



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 7 apresenta a situação do Brasil relativa ao desenvolvimento sustentável segundo os subsistemas de Bem-estar ecológico e Bem-estar humano para os modelos fuzzy

aqui propostos e também, os resultados obtidos por Kronemberger & Clevelário Junior (2016). Os cenários para o Bem-estar ecológico estabelecidos pelos modelos fuzzy revelam diferentes condições para os períodos.

Tabela 7 - Resultados para os subsistemas dos modelos ISF1, ISF2 e do modelo do Barômetro da Sustentabilidade (BS).

Subsistemas	Ano	ISF1	ISF2	BS
Bem Estar Ecológico	2002	61 Potencialmente Sustentável	36 Potencialmente Insustentável	40,3 Intermediário
	2011	65 Potencialmente Sustentável	41 Intermediário	44,4 Intermediário
Bem Estar Humano	2002	4 Insustentável	2 Insustentável	44,0 Intermediário
	2011	82 Sustentável	11 Insustentável	51,9 Intermediário

Fonte: Resultados do ISF1 E ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016)

Pode-se afirmar também que o ISF2, no geral, tende a ser mais pessimista do que o ISF1 e o BS. Através da análise dos resultados do temas, das dimensões, do bem estar e da sustentabilidade no Brasil, é possível observar que o BS tende a concentrar mais suas classificações no conjunto Intermediário, o que dificulta no auxílio à tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento sustentável. O fato de o BS utilizar média aritmética nos cálculos, pode ser um dos motivos que leva a essa tendência de classificação.

O ISF1, devido a forma de construção da base de regras, tende a concentrar as classificações nos conjuntos extremos, pois concentra a maior parte de suas regras nesses conjuntos. O ISF1 mostra uma condição ora muito insustentável, ora o oposto disso, uma condição muito sustentável, o que limita muito a aproximação dos resultados com a realidade estudada. Também é o modelo mais influenciado pela mudança brusca nos dados de um único indicador, pois foram utilizados 53 indicadores e apenas um deles apresentou dados muitos discrepantes entre os dois anos (2002 e 2011).

O ISF2 não sofre tanta influência quando um indicador apresenta dados muito distintos e tende a fazer uma classificação mais rigorosa do que o ISF1 e o BS. A forma de construção da base de regras do ISF2, que considera a opinião do especialista, se mostrou mais robusta do que a distribuição de regras feita por frequência, como proposto por Phillis (2011). Também é válido

lembrar que o ISF1 em alguns momentos mostra um comportamento contrário ao comportamento do ISF2 e do BS, pois onde o ISF2 e o BS apresentam simultaneamente um aumento no valor do índice enquanto o ISF1 mostra um decréscimo.

Os resultados dos temas da dimensão ambiental estão apresentados na Tabela 8. Na tabela estão os valores do ISF1, ISF2 e do Barômetro da Sustentabilidade (BS), este último calculado por Kronemberger & Clevelário Junior (2016). Como é possível observar, os resultados do ISF1 para o tema atmosfera correspondem à condição sustentável, tanto para o ano de 2002 quanto para 2011. Para o ISF2 a classificação deste tema foi Potencialmente Sustentável e Sustentável em 2002 e 2011, respectivamente, sendo que o valor do índice foi maior em 2011, o que mostra uma melhora. Os resultados do BS foram Potencialmente Sustentável nos dois anos, porém em 2011 o valor é maior quando comparado ao de 2002, o que mostra uma evolução.

Tabela 8 - Resultados dos temas da dimensão ambiental

(continua)				
Tema	Ano	ISF1	ISF2	BS
Atmosfera	2002	0,98 Sustentável	0,75 Potencialmente Sustentável	69,6 Potencialmente Sustentável
	2011	0,98 Sustentável	0,89 Sustentável	80,3 Potencialmente Sustentável
Terra	2002	0,92 Sustentável	0,69 Potencialmente Sustentável	69,7 Potencialmente Sustentável
	2011	0,93 Sustentável	0,70 Potencialmente Sustentável	70,3 Potencialmente Sustentável
Saneamento	2002	0,42 Intermediário	0,41 Intermediário	29,5 Potencialmente Insustentável
	2011	0,42 Intermediário	0,41 Intermediário	36,6 Potencialmente Insustentável
Biodiversidade	2002	0,19 Insustentável	0,19 Insustentável	12,9 Insustentável

Tabela 8 - Resultados dos temas da dimensão ambiental

Tema	Ano	(conclusão)		
		ISF1	ISF2	BS
Biodiversidade	2011	0,25	0,25	18,0
		Potencialmente Insustentável	Potencialmente Insustentável	Insustentável
Oceano	2002	0,49	0,49	19,6
		Intermediário	Intermediário	Insustentável
	2011	0,41	0,41	17,0
		Intermediário	Intermediário	Insustentável

Fonte: Resultados do ISF1 e ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016)

O tema Terra para o ISF1 apresentou classificação Sustentável para os dois anos, em 2011, sendo que o índice teve um discreto aumento em relação ao ano de 2002 enquanto que para ISF2 a classificação foi Potencialmente Sustentável nos dois momentos, porém em 2011 o valor do índice foi um pouco maior. No BS, o tema recebeu a classificação Potencialmente Sustentável nos dois anos, contudo o para o ano de 2011 houve aumento do valor, o que caracteriza uma melhoria. Para o tema saneamento, os resultados do ISF1 foram Intermediário nos dois anos, sem alteração de valor. Pelo ISF2 o tema saneamento teve classificação Intermediário, com o valor do índice matendo-se o mesmo. Já pela classificação do BS, o tema foi considerado Potencialmente Insustentável nos dois momentos, porém com um valor um pouco maior em 2011 do que em 2002. O modelo do BS teve uma pequena melhora, apesar de continuar classificado como Potencialmente Insustentável. O tema biodiversidade em 2002 e 2011, recebeu classificação Insustentável pelos 3 modelos, ISF1, ISF3 e BS, mas no ano de 2011 o índice apresentou um valor um pouco mais alto em relação a 2002, o que representa uma certa melhora. Para o tema oceano, os modelos ISF1 e ISF2, apresentaram classificação Intermediária nos dois anos, contudo, em 2011, o índice apresentou um valor um pouco mais baixo do que em 2002, apresentando um leve declínio em sua avaliação. Pelo BS o tema recebeu a classificação Insustentável nos dois anos, e em 2011 o valor foi também um pouco mais baixo do que em 2002, o que mostra uma piora do tema. Para os temas da dimensão ambiental os três métodos apresentaram classificações distintas, no entanto o ISF2 e o barômetro possuem mais classificações em comum. Este tema apresentou os piores resultados nos três modelos. De uma maneira geral, para os temas da dimensão ambiental, os modelos ISF1 e ISF2 apresentaram maior número de classificações comuns entre si, observando que o ISF1 tende a ser menos pessimista do o ISF2. Quando se trata da comparação entre o ISF1 e o BS, quando o ISF1 não

apresenta a mesma classificação do BS, este tende a ser menos otimista do que aquele. Este comportamento também é notado na comparação entre o ISF2 e o BS, porém o ISF2 e o BS possuem mais classificações em comum do que quando se trata do ISF1 e BS. Analisando as diferenças das classificações entre os anos 2002 e de 2011, com exceção do tema atmosfera para o ISF2, os temas não sofreram alterações, mesmo havendo uma pequena variação do valor do índice. No caso do tema atmosfera para o ISF2, o aumento no valor do índice fez com que em 2011 a classificação que antes era Potencialmente Sustentável passasse a ser Sustentável.

Tabela 9 - Resultados dos temas da dimensão social

(continua)				
Tema	Ano	ISF1	ISF2	BS
População	2002	0,67 Potencialmente Sustentável	0,67 Potencialmente Sustentável	69,0 Potencialmente Sustentável
	2011	0,77 Sustentável	0,77 Sustentável	79,0 Potencialmente Sustentável
Trabalho e Rendimento	2002	0,02 Insustentável	0,11 Insustentável	41,0 Intermediário
	2011	0,42 Intermediário	0,33 Potencialmente Insustentável	47,8 Intermediário
Saúde	2002	0,90 Sustentável	0,63 Potencialmente Sustentável	68,0 Potencialmente Sustentável
	2011	0,96 Sustentável	0,71 Potencialmente Sustentável	70,3 Potencialmente Sustentável
Educação	2002	0,82 Potencialmente Sustentável	0,5 Intermediário	71,0 Potencialmente Sustentável
	2011	0,98 Sustentável	0,5 Intermediário	77,2 Potencialmente Sustentável
Habitação	2002	0,70 Potencialmente Sustentável	0,43 Intermediário	53,0 Intermediário
	2011	0,98 Sustentável	0,65 Potencialmente Sustentável	70,4 Potencialmente Sustentável
	2002	0,0 Insustentável	0,0 Insustentável	25,0 Potencialmente Insustentável
	2011	0,0 Insustentável	0,0 Insustentável	19,5 Insustentável

Tabela 9 - Resultados dos temas da dimensão social

(conclusão)				
Tema	Ano	ISF1	ISF2	BS
Segurança	2011	0,98 Sustentável	0,65 Potencialmente Sustentável	70,4 Potencialmente Sustentável
	2002	0,0 Insustentável	0,0 Insustentável	25,0 Potencialmente Insustentável

Fonte: Resultados do ISF1 e ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016).

Os resultados dos temas da dimensão social estão apresentados na Tabela 9. Nota-se que o tema população foi classificado como Potencialmente Sustentável para o ano de 2002 e Sustentável para o ano de 2011 pelos modelos ISF1 e ISF2. Este tema teve uma melhora significativa no valor do índice, fazendo com que melhorasse sua classificação. Pelo BS o tema foi considerado Potencialmente Sustentável nos dois anos, mas em 2011 o valor obtido foi maior do que em 2002, o que demonstra uma condição um pouco melhor. A classificação do tema trabalho e rendimento pelo ISF1 foi Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011, Este tema teve uma grande mudança na classificação em razão do valor do índice ter apresentado um valor muito maior em 2011 do que em 2002. Pelo ISF2 as classificações foram Insustentável e Potencialmente Insustentável para 2002 e 2011 respectivamente, devido a um aumento no valor do índice. Pelo método BS o tema foi considerado Intermediário nos dois momentos, porém em 2011 o valor foi maior do que em 2002, o que significa uma condição um pouco melhor. O tema saúde recebeu, pelo ISF1, a classificação Sustentável nos dois anos, tendo um índice um pouco maior em 2011 do que em 2012, o que mostra uma condição ligeiramente melhor. Pelos modelos ISF2 e BS, a classificação foi Potencialmente Sustentável nos dois anos, porém de em 2011 o valor ser maior do que em 2002, mostrando uma condição um pouco melhor.

Para o tema educação, o ISF1 indicou a classificação Potencialmente Sustentável e Sustentável para 2002 e 2011 respectivamente, a mudança na classificação é justificada pelo aumento significativo no valor do índice. Pelo ISF2, a classificação foi Intermediário nos dois momentos, sem alteração no valor do índice. O BS classificou este tema como Potencialmente Sustentável nos dois momentos, porém em 2011 o valor do índice foi maior do que em 2002, o que mostra uma condição um pouco melhorada. Para o tema habitação o ISF1 classificou como Potencialmente Sustentável e Sustentável em 2002 e 2011 respectivamente, pois o aumento no valor do índice foi significativo. As classificações dadas pelo ISF2 e pelo BS foram as mesmas,

Intermediário em 2002 e Potencialmente Sustentável para 2011, onde houve aumento significativo no valor do índice.

Para o tema segurança, os modelos ISF1 e ISF2 emitiram classificação Insustentável nos dois anos, porém o ISF2 apresentou um índice menos pior em 2011. Pelo BS as classificações foram Potencialmente Insustentável e Insustentável para 2002 e 2011 respectivamente. A queda no valor do índice mostra uma condição significativamente pior em 2011 do que em 2002, este tema teve o pior desempenho da dimensão social segundo os três modelos.

No geral para os temas da dimensão social, quando não apresentam as mesma classificação, o ISF1 é mais otimista do que o ISF2. Entre o ISF1 e o BS, com exceção do tema trabalho e rendimento no ano de 2002, o ISF1 tende a ser mais otimista do que o BS. Comparando o ISF2 e o BS, os dois modelos possuem mais classificações em comum do que quando comparados ISF1 e BS. Com exceção do tema população em 2011, no qual recebeu classificação melhor pelo ISF2 do que pelo BS, o ISF2 tende a ser mais rigoroso ou mais pessimista do que o BS.

Tabela 10 - Resultados dos temas da dimensão econômica

Tema	Ano	ISF1	ISF2	BS
Quadro Econômico	2002	0,22	0,31	41,0
		Potencialmente Insustentável	Potencialmente Insustentável	Intermediário
	2011	0,74	0,5	59,5
		Potencialmente Sustentável	Intermediário	Intermediário
Padrões de Produção e Consumo	2002	0,36	0,32	34,0
		Potencialmente Insustentável	Potencialmente Insustentável	Potencialmente Insustentável
	2011	0,54	0,40	40,4
		Intermediário	Potencialmente Insustentável	Potencialmente Insustentável

Fonte: Resultados do ISF1 e ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016).

A Tabela 10 mostra os resultados dos temas para a dimensão econômica. O tema quadro econômico recebeu as classificações Potencialmente Insustentável em 2002 e Potencialmente Sustentável em 2011, pelo ISF1. A diferença no valor do índice foi significativa ao ponto de

fazer a classificação mudar radicalmente. Já pelo ISF2, a mudança na classificação foi de Potencialmente Insustentável em 2001 para Intermediário em 2011, pois houve significativa mudança no valor do índice. O BS classificou este tema como Intermediário nos dois anos, porém em 2011 o valor do índice foi ligeiramente maior do que em 2002, o que mostra uma condição um pouco melhor.

Para o tema padrões de produção e consumo, a classificação do ISF1 foi Potencialmente Insustentável e Intermediário para os anos de 2002 e 2011 respectivamente, onde a piora na classificação é justificada pela diminuição no valor do índice. O ISF2 e BS classificaram o tema como Potencialmente Insustentável nos dois momentos, porém o valor do índice em 2011 foi um pouco maior do que em 2002, o que mostra uma melhora.

No geral para os temas da dimensão econômica o ISF1, quando não apresenta as mesmas classificações, tende a ser mais otimista do que o ISF2. No tema quadro econômico o indicador grau de endividamento apresenta valores muito discrepantes em 2002 e em 2011. O ISF1 emitiu uma resposta mais instensa a essa mudança do que o ISF2 e o BS. Comparando o ISF2 com o BS pode-se observar que estes dois modelos apresentam mais classificações em comum, em comparação ao ISF1 eo BS, e o ISF2 foi mais pessimista do que o BS.

Tabela 11 – Resultados dos temas da dimensão institucional

(continua)

	Ano	ISF1	ISF2	BS
Ambiental	2002	0,65	0,32	40,3 Intermediário
		Potencialmente Sustentável	Potencialmente Insustentável	
	2011	0,61	0,37	44,4 Intermediário
		Potencialmente Sustentável	Potencialmente Insustentável	
Social	2002	0,74	0,17	55,0 Intermediário
		Potencialmente Sustentável	Insustentável	
	2011	0,98	0,30	60,7 Intermediário
		Sustentável	Potencialmente Insustentável	
Econômica	2002	0,11	0,26	38,0 Potencialmente Insustentável
		Insustentável	Potencialmente Insustentável	

Tabela 11 – Resultados dos temas da dimensão institucional

				(conclusão)
Institucional	2011	0,79	0,37	50,0
		Potencialmente Sustentável	Potencialmente Insustentável	Intermediário
	2002	0,01	0,11	39,0
		Insustentável	Insustentável	Potencialmente Insustentável
	2011	0,14	0,21	45,1
		Insustentável	Potencialmente Insustentável	Intermediário

Fonte: Resultados do ISF1 e ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016).

Os resultados dos temas da dimensão institucional estão mostrados na Tabela 11. O ISF1 classificou o tema estrutura institucional como Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011. O aumento no valor do índice foi significativo a ponto de elevar bastante a classificação. Pelo ISF2, a classificação foi Potencialmente Insustentável nos os dois anos, sendo que em 2011 o valor do índice foi ligeiramente maior do que em 2002. Pelo BS, a classificação foi Intermediário nos dois momentos, porém em 2011 o valor obtido foi um pouco maior do que em 2002, o que mostra uma condição um pouco melhor.

Para o tema capacidade institucional, o ISF1 classificou como Insustentável em 2002 e Potencialmente Sustentável em 2011, o valor do índice teve um aumento significativo o que fez ter mudança grande na classificação. Pelo ISF2 as classificações foram Insustentável e Intermediário para os anos de 2002 e 2011 respectivamente. A grande mudança na classificação é justificada pelo aumento relevante no valor do índice. Pelo BS as classificações foram Potencialmente Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011, a classificação melhorou devido ao aumento no valor do índice.

Os modelos ISF1 e ISF2 classificaram o tema articulação institucional classificação Potencialmente Insustentável nos dois anos, porém o valor do índice no ISF1 aumentou e o no ISF2 diminuiu. Isso mostra que pelo o ISF1 o tema teve uma melhora e pelo ISF2 teve uma piora. O BS classificou o tema como Intermediário nos dois momentos, mas em 2011 o valor do índice foi um pouco menor do que em 2002, o que demonstra uma condição um pouco pior, semelhante ao que aconteceu no ISF2. O tema agenda 21, obteve classificação Insustentável pelo ISF1 nos dois momentos, sendo que em 2011 o valor do índice foi um pouco mais baixo do que em 2002, demonstrando uma condição um pouco pior. Pelos modelos ISF2 e BS a classificação foi Potencialmente Insustentável nos dois momentos, porém em 2011 o valor do

índice foi um pouco menor do que em 2002, o caracteriza uma piora. Este tema teve o pior desempenho nos três modelos.

Em geral para os temas da dimensão institucional, o ISF1 tende a fazer uma classificação mais pessimista do que o ISF2. O ISF1 também apresenta mudanças maiores nas classificações do que no ISF2 e no BS, onde o tema passa de uma condição muito ruim para uma condição muito boa. Observa-se também que o ISF1, nos casos em que a classificação é diferente, tende a ser mais pessimista do que o BS. O ISF2 é em geral mais pessimista do que o BS e o número de classificação em comum entre ISF2 e BS é maior do que quando comparado ISF1 e BS.

Tabela 12 - Resultados das Dimensões

Dimensão	Ano	ISF1	ISF2	BS
Ambiental	2002	0,61 Potencialmente Sustentável	0,36 Potencialmente Insustentável	40,3 Intermediário
	2011	0,65 Potencialmente Sustentável	0,41 Intermediário	44,4 Intermediário
Social	2002	0,78 Potencialmente Sustentável	0,20 Insustentável	55,0 Intermediário
	2011	0,98 Sustentável	0,37 Potencialmente Insustentável	60,7 Intermediário
Econômica	2002	0,11 Insustentável	0,26 Potencialmente Insustentável	38,0 Potencialmente Insustentável
	2011	0,78 Potencialmente Sustentável	0,37 Potencialmente Insustentável	50,0 Intermediário
Institucional	2002	0,02 Insustentável	0,11 Insustentável	39,0 Potencialmente Insustentável
	2011	0,17 Insustentável	0,23 Potencialmente Insustentável	45,1 Intermediário

Fonte: Resultados do ISF1 e ISF2 autoria própria e resultados do BS adaptados de Kronemberger & Clevelário Junior (2016).

A tabela 12 apresenta os resultados dos SIF's das dimensões. Para a dimensão ambiental houve um ligeiro aumento no valor do índice nos 3 modelos. Isso caracteriza uma condição melhor em 2011 do que em 2002, porém as classificações foram diferentes. O ISF1 classificou como Potencialmente Sustentável nos dois anos, o ISF2 classificou como Potencialmente Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011, já o BS classificou como Intermediário nos dois momentos. Observa-se que o ISF2 tende a ser mais pessimista do que os outros dois modelos. As classificações do ISF2 e BS são mais próximas para esta dimensão e apresentam mais classificações em comum.

Para a dimensão social os valores dos índices também tiveram um ligeiro aumento, mostrando uma condição melhor em 2011 do que em 2002. O ISF1 classificou como Potencialmente Sustentável em 2002 e Sustentável em 2011. O ISF2 classificou como Insustentável em 2002 e Potencialmente Insustentável em 2011. A classificação pelo BS foi Intermediário nos dois momentos. Nenhuma dos modelos apresentaram classificações em comum e as classificações do ISF2 e do BS estão mais próximas.

A dimensão econômica apresenta um aumento nos valores dos índices perante os 3 modelos, o que caracteriza uma melhor condição em 2011. As classificações de acordo com o ISF1 foi Insustentável em 2002 e Potencialmente Sustentável em 2011. O ISF2 classificou com Potencialmente Insustentável nos dois anos e o BS classificou como Potencialmente Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011. Para o ano de 2002 a classificação do ISF1 é mais pessimista do que os outros modelos, nesse caso o ISF2 e o BS são iguais. Para o ano de 2011 o ISF2 é o modelo mais otimista e a classificação segundo este modelo sofreu um salto, saindo de uma condição muito ruim em 2002 para uma condição muito boa em 2011. Isso pode ser explicado pela discrepância dos dados do indicador grau de endividamento, como já citado. Com isso pode-se dizer que o ISF1 sofre mais influência quando há diferença significativa nos dados.

A dimensão institucional, nos 3 modelos, apresentou aumento valor do índice, indicando uma melhoria na condição. A classificação segundo o ISF1 foi Insustentável nos dois anos. O ISF2 classificou como Insustentável em 2002 e Potencialmente Insustentável em 2011. O BS classificou como Potencialmente Insustentável em 2002 e Intermediário em 2011. Nos caso em que a classificação não é igual, o ISF1 é mais pessimista do que o ISF2 e do que o BS e o ISF2 tende a ser mais pessimista do que o BS.

5 Considerações Finais

Esta dissertação teve o intuito central de construir índices fuzzy (IFS1 e ISF2) para avaliação do desenvolvimento sustentável. Sendo aplicados para a realidade brasileira, tais índices forneceram distintas classificações para a sustentabilidade do Brasil em dois momentos diferentes. Considerando os aspectos trabalhados nesta pesquisa, o objetivo foi atingido, uma vez que o desenvolvimento dos modelos fuzzy foi bem sucedido.

O ISF2 tende a fazer uma classificação mais rigorosa do que o ISF1 e o BS, o que, em termos de avaliação da sustentabilidade, permite apoiar que o ISF2 possui um maior potencial de robustez do que os outros dois modelos analisados. O BS tende a concentrar suas classificações nos conjuntos intermediários, isso pode ser explicado pelo fato de ser usada média aritmética em sua composição deste modelo. Outra limitação do BS é em relação a descontinuidade do domínio das variáveis, o que não configura um problema no caso dos índices fuzzy.

Para a elaboração da escala final para a variável de saída, a aplicação do conhecimento do especialista, como usada no ISF2, mostrou-se mais eficaz na composição da sustentabilidade global do que a distribuição feita por frequência empregada por Phillis, Grigoroudis e Kouikoglou (2011), usada no ISF1.

Os índices desenvolvidos permitem a incorporação e/ou remanejamento de IDS, facilitando assim, o monitoramento do desenvolvimento sustentável em cenários mais atualizados. Cabem a trabalhos futuros a expansão da utilização da lógica fuzzy e também o refinamento dos índices já desenvolvidos. Uma sequência desta pesquisa poderia ser o uso de redes neurais no estabelecimento de uma escala final para a variável de saída a partir de escalas geradas por meio do conhecimento de mais de um especialista.

A avaliação do desenvolvimento sustentável será sempre um tema atual, haja vista que o país passará por momentos de desenvolvimento econômico e o desafio de aliar este crescimento à justiça social, ao desenvolvimento institucional e ao equilíbrio ecológico é algo impossível sem tal mensuração.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, R. R.; SANTOS, M. C. G.; ARAGÃO, I. S. **Utilização do Modelo Pressão-Estado-Resposta no Rio Brumado Situado em Rio de Contas- BA**. IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade, Belo Horizonte, 2017.
- AMORIM, A. S.; ARAÚJO, M. F. F.; CÂNDIDO, G. A. **Uso do Barômetro da Sustentabilidade para Avaliação de um Município Localizado em Região Semiárida do Nordeste Brasileiro**. *Desenvolvimento em Questão*, v. 12, n. 25, p. 189-217, 2014.
- BARROS, L.; BASSANEZI, R.; LODWICK, W. **A First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics**. SPRINGER, 2017.
- CARVALHO, C. W. **Avaliação do Índice de Desenvolvimento Sustentável (IDS) no município de Goiânia/GO através do Método Painel de Sustentabilidade (Dashboard of Sustainability)**. PUC Goiânia. Goiânia, 2012.
- CASSINI, M.; BASTIANONI, S.; GAGLIARDI, F.; GIGLIOTTI, M.; A. RICCABONI; G. BETT. **Sustainable Development Goals Indicators: A Methodological Proposal for a Multidimensional Fuzzy Index in the Mediterranean Area**. *Sustainability*, p. 1-25, 2019.
- CNUMA - **Report of the United Nations Conference on the Human Environment**. Stockholm, 5-16 June 1972. United Nations Publication. 1972.
- DALCHIAVON, E. C.; BAÇO, F. M. B.; MELLO, G. R. **Barômetro de Sustentabilidade Estadual: Uma Aplicação na Região Sul do Brasil**. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, v. 14, p. 54-69, 2017.
- DANG T. N.; THUY, C. T. ; VAN, T. Y.; THANH, T. N. **Sets of Sustainable Development Indicators in Vietnam: Status and Solutions**. *Economies*, v 6, p. 1-15, 2018.
- FBMC - **Proposta Inicial de Implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil (NDC)**. Fundo Brasileiro de Mudança do Clima, 2018.
- FLOUR, P. O.; MAKOONDLALL-CHADEE, T.; BOKHOREE, C.; MOHEE, R. **Structured Fuzzy Based Methodological Approach towards Sustainability Performance Assessment**. *International Journal of Environmental Science and Development*, v. 5, p. 223-227, 2014.
- FROEHLICH, C. **Sustentabilidade: Dimensões e Métodos de Mensuração de Resultados**. *Desenvolve: Revista de Gestão do Unilasalle*, v. 3, n. 2, 2014.
- GONZALEZ, M. H. G.; ANDRADE, D. C. **A sustentabilidade ecológica do consumo em Minas Gerais: uma aplicação do método da pegada ecológica**. *Nova Economia*, Belo Horizonte, v. 25, n. 2, p. 421-446, 2015.
- GRIGOROUDIS, E.; KOUIKOGLU, V.S.; PHILLIS, Y. A. **SAFE 2013: Sustainability of countries updated. Ecological Indicators**, p. 61-66, 2014.

HAIDER, H. et al. **Sustainability assessment framework for small-sized urban neighbourhoods: An application of fuzzy synthetic evaluation**. *Sustainable Cities and Society*, p. 21-32, 2018.

JADERI, F. et. al. **Methodology for modeling of city sustainable development based on fuzzy logic: a practical case**. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, v. 11, 2014.

KERMERICH, P. D. C.; RITTER, L. G.; BORBA, W. F. **Indicadores de sustentabilidade ambiental: métodos e aplicações**. *Revista Monografias Ambientais - REMOA*, v. 13, n. 5, p. 3723-3736, 2014.

KNOTT, C.; HOVELL, L.; KARIMIAN, N.; GARIBALDI, J. **Package: FuzzyToolkitUoN**. A custom framework for working with Type 1 Fuzzy Logic, produced by the University of Nottingham IMA Group, 2013.

KRONEMBERGER, D. M. P.; CLEVELÁRIO JUNIOR, J. **Aplicação do “Barômetro da Sustentabilidade” na análise comparativa do desenvolvimento brasileiro**. IBGE - População, Espaço e Sustentabilidade: Contribuições para o Desenvolvimento do Brasil, p. 117-150, 2016.

LOPES, A. L. A.; GUERRA, M. E. A. **Uma análise dos Instrumentos Metodológicos que utilizam Indicadores e Índices para avaliar a Sustentabilidade em Ambientes Urbanos**. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 04, n. 28, p. 01-14, 2016.

LUCENA, A. D.; CAVALCANTE, J. N.; CANDIDO, G. A. **Sustentabilidade do município de João Pessoa: uma aplicação do barômetro da sustentabilidade**. *G&RD*, Taubaté/SP, v. 07, n. 01, p. 19-49, 2011.

MALHEIROS, T. F.; JUNIOR, A. P.; COUTINHO, S. M. V. **Agenda 21 Nacional e Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: contexto brasileiro**. *Saúde Soc. São Paulo*, v.17, n.1, p.7-20, 2008.

MONTANARELLA, L.; ALVA, I. L. **Putting soils on the agenda: the three Rio Conventions and the post-2015 development agenda**. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, p. 41-48, 2015.

MUNDA, G.; NIJKAMP, P.; RIETVELD, P. **Qualitative multicriteria evaluation for environmental management**. *Ecological Economics*, v.10, p.97–112, 1994.

NALASHI M.; RUPANI P. F.; RUPANI M. M.; KAMYAB H.; SHAO W.; AHMDI H.; TARIK A. R.; ALJOJO N. **Measuring sustainability through ecological sustainability and human sustainability: A machine learning approach**. *Journal of Cleaner Production*, v.240, p.118-162, 2019.

OECD - ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Organization for economic cooperation and development: coreset of indicators for environmental performance reviews; a synthesis report by the group on the state of the environment**. Paris, 1993.

ONU – **International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/10/1689962>, acesso novembro de 2019.

ONU- Commission on Sustainable Development. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/csd.html>, acesso em março, 2019.

ONU. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**, 3th edition, Nova Iorque, 2007.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>, acesso em março, 2019.

ONU. **World Populations Prospects – Key findings & advance tables**. Nova Iorque, 2017.

PHILLIS, Y. A.; ANDRIANTIATSAHOLINIAINA, L. A. **Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic**. *Ecological Economics*, p. 435-456, 2001.

PHILLIS, Y. A.; GRIGOROUDIS, E.; KOUIKOGLU, V. S. **Sustainability ranking and improvement of countries**. *Ecological Economics*, p. 542-553, 2011.

PHILLIS, Y. A.; KOUIKOGLU, V. S.; VERDUGO, C. **Urban sustainability assessment and ranking of cities**. *Computers, Environment and Urban Systems*, n. 64, p. 254-265, 2017.

POTSCHIN, M.; HAINES-YOUNG, R. “Rio+10”, **Sustainability Science and Landscape Ecology**. *Landscape and urban planning*, v 75, p. 162-174, 2006.

PRESCOTT-ALLEN, R. **Barometer of Sustainability: Measuring and communicating wellbeing and sustainable development**. IUCN, Switzerland, 1997.

PUPPHACHAI, U; ZUIDEMA, C. **Ecological Indicators. A tool to generate learning and adaptation in sustainability urban development**, v.72, p. 784-793, 2017.

QUINHONEIRO, F. H. F. **Desenvolvimento de metodologia de análise de indicadores de sustentabilidade como ferramenta para tomada de decisão utilizando lógica Fuzzy**. IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2015.

QUINTELA, P. D. A.; TOLEDO, P. M.; VIEIRA, I. M. G. **Desenvolvimento sustentável do Marajó, Pará: uma visão a partir do Barômetro da Sustentabilidade**. *Novos Cadernos NAEA*, v. 21, p. 199-213, 2018.

R CORE TEAM (2019). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2019.

RIBEIRO, A. I.; VILARES, G. N.; MEDEIROS, G. A.; JUNIOR, V. M., LOURENÇO, R. W.; **Utilização do Modelo Pressão, Estado e Resposta (PER) no Parque Municipal da Água Vermelha “João Cândio Pereira” – Sorocaba-SP**. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2012.

ROSSI R.; GASTALDI M.; GECHELE G.; **Comparison of fuzzy-based and AHP methods in sustainability evaluation: a case of traffic pollution-reducing policies.** European Transport Research Review, v. 5, p. 11-26, 2013.

SANTOS, A. S. M.; LEONARDOS, O. H.; MOTA, J. A.; **Alimentação Urbana e a Pegada Ecológica do Consumo de Carne Bovina na Cidade de Parintins.** ACTA Geográfica, Boa Vista, v.7, p.45-53, 2013.

SANTOS, J. S.; BENICASA, A. X. **Lógica Fuzzy Aplicada ao Processo de Decisão Sobre Áreas de Pesquisa em Trabalhos de Conclusão de Curso.** II Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy – Livro de Resumos, Natal – RN, 2012.

SCIPIONI, A. et al. **The Dashboard of Sustainability to Measure the Local Urban Sustainable Development: the case study of Padua Municipality.** Ecological Indicators, Padua, Itália, p. 365, 2009.

SIDRA, IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável- Edição 2017.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabelas>, acesso em março, 2019.

SINGH, R. K. et al. **An overview of sustainability assessment methodologies.** Ecological Indicators, p. 281-299, 2012.

SOARES, L. F. S.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M. **Modeling of Indicators by Fuzzy Logic to Develop a Sustainability Index for Brazilian Municipalities.** I Simpósio em Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade Ambiental. Sorocaba, p. 129. Anais, 2014.

SOUZA, J. L.; SILVA, I. R. **Utilização do Modelo Pressão-Estado-Resposta na Avaliação da Qualidade das Praias da Ilha de Itaparica, Bahia.** Cadernos de Geociências, Itaparica/BA, v. 11, n. 1-2, p. 103-113, 2014.

VIEIRA, I. C. G.; TOLEDO, P. M.; HIGUCHI, H. **A amazônia no antropoceno.** Ciência e Cultura, v. 70, p. , 2018.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth.** 1996.

WCED - World Commission on Environment and Development. **Our Common Future.** Oxford: Oxford University Press, 1987.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets. Information and Control.** v. 8, p. 338-353, 1965.

APÊNDICE A

Tabela A - Valores referência para a elaboração das funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) para indicador que compoe a Dimensão Ambiental

	I (a,b,c,d)	PI (a,b,c)	IN (a,b,c)	PS (a,b,c)	S (a,b,c,d)
A1	(0;0;250;1750)	(250;1750;5000)	(1750;5000;10000)	(5000;10000;17000)	(10000;17000;19000;19000)
A2	(0;0;170;300)	(170;300;500)	(300;500;625)	(500;625;800)	(625;800;900;900)
A3	(0;0;5;30)	(5;30;75)	(30;75;150)	(75;150;450)	(150;450;700;700)
T1	(0;0;10;25)	(10;25;35)	(25;35;50)	(35;50;60)	(50;60;80;80)
T2	(0;0;10;25)	(10;25;35)	(25;35;50)	(35;50;60)	(50;60;80;80)
T3	(0;0;15;30)	(15;30;40)	(30;40;55)	(40;55;65)	(55;65;80;80)
B	(0;0;175;375)	(175;375;425)	(375;425;475)	(425;475;750)	(475;750;1000;1000)
O	(0;0;5;13)	(5;13;20,5)	(13;20,5;28)	(20,5;28;32)	(28;32;35;35)
S1	(0;0;2,5;8)	(2,5;8;13)	(8;13;18)	(13;18;50)	(18;50;100;100)
S2	(0;0;35;75)	(35;75;85)	(75;85;93)	(85;93;97)	(93;97;100;100)
S3	(0;0;35;78,5)	(35;78,5;90,5)	(78,5;90,5;97,5)	(90,5;97,5;98,5)	(97,5;98,5;100;100)
S4	(0;0;35;78,5)	(35;78,5;90,5)	(78,5;90,5;97,5)	(90,5;97,5;98,5)	(97,5;98,5;100;100)
S5	(0;0;35;75)	(35;75;85)	(75;85;93)	(85;93;98)	(93;98;100;100)

Fonte: Autoria Própria

A1 Consumo industrial de substâncias destruidoras da camada de Ozônio (em t PDO – Potencial de Destruição de Ozônio); A2 Número de veículos per capita (por 1 000 hab.); A3 Queimadas e incêndios florestais (n.º de focos de calor por 1 000 km² ao ano); T1 Terras em uso agrossilvipastoril (%); T2 Desflorestamento da Amazônia Legal ; T3 Area Total Antropizada; B Biodiversidade; O Oceano; S1 Lixo Rural coletado; S2 Lixo urbano coletado; S3 Destinação Final Adequada do Lixo Coletado; S4 Proporção de moradores em domicílios com rede coletora de esgoto em área urbana; S5 Volume de Esgoto Coletado por Dia.

APÊNDICE B

Tabela B - Valores referência para a elaboração das funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) para indicador que compoe a Dimensão Social

	(continua)				
	I (a,b,c,d)	PI (a,b,c)	IN (a,b,c)	PS (a,b,c)	S (a,b,c,d)
P	(0;0;0,5;1,5)	(0,5;1,5;2,5)	(1,5;2,5;3,75)	(2,5;3,75;5)	(3,75;5;6;6)
T1	(0;0;2,5;8)	(2,5;8;13)	(8;13;18)	(13;18;22)	(18;22;25;25)
T2	(0;0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,45)	(0,3;0,45;0,65)	(0,45;0,65;0,9)	(0,65;0,9;1;1)
T3	(0;0;205;614)	(205;614;971)	(614;971;1686)	(971;1686;2248)	(1686;2248;2500;2500)
T4	(0;0;409,5;1024)	(409,5;1024;1513,5)	(1024;1513,5;2013)	(1513,5;2013;2248)	(2013;2248;2500;2500)
T5	(0;0;0,19;0,49)	(0,19;0,49;0,69)	(0,49;0,69;0,87)	(0,69;0,87;0,97)	(0,87;0,97;1;1)
T6	(0;0;0,19;0,49)	(0,19;0,49;0,69)	(0,49;0,69;0,87)	(0,69;0,87;0,97)	(0,87;0,97;1;1)
S1	(0;0;25;55,5)	(25;55,5;65,5)	(55,5;65,5;75)	(65,5;75;90)	(75;90;100;100)
S2	(0;0;4,5;14,5)	(4,5;14,5;34,5)	(14,5;34,5;79,5)	(34,5;79,5;120)	(79,5;120;150;150)
S3	(0;0;34,5;75,5)	(34,5;75,5;85,5)	(75,5;85,5;93,5)	(85,5;93,5;99)	(93,5;99;100;100)
S4	(0;0;0,25;0,95)	(0,25;0,95;2,2)	(0,95;2,2; 2,75)	(2,2;2,75;3,5)	(2,75;3,5;4;4)
E1	(0;0;3;6)	(3;6;9)	(6;9;12)	(9;12;14)	(12;14;18;18)
E2	(0;0;35;77)	(35;77;89)	(77;89;96)	(89;96;99)	(96;99;100;100)
E3	(0;0;25;55)	(25;55;70)	(55;70;87)	(70;87;97)	(87;97;100;100)
E4	(0;0;0,15;0,46)	(0,15;0,46;0,66)	(0,46;0,66;0,89)	(0,66;0,89;0,97)	(0,89;0,97;1;1)
H1	(0;0;34,5;74,5)	(34,5;74,5;84,5)	(74,5;84,5;92)	(84,5;92;97,5)	(92;97,5;100;100)
H2	(0;0;34,5;74,5)	(34,5;74,5;84,5)	(74,5;84,5;92)	(84,5;92;97,5)	(92;97,5;100;100)
H3	(0;0;34,5;74,5)	(34,5;74,5;84,5)	(74,5;84,5;92)	(84,5;92;97,5)	(92;97,5;100;100)
H4	(0;0;19;44,5)	(19;44,5;69,5)	(44,5;69,5;87)	(69,5;87;87,5)	(87;97,5;100;100)
H5	(0;0;0,5;1,5)	(0,5;1,5;2,5)	(1,5;2,5;4)	(2,5;4;7,5)	(4;7,5;10;10)

Tabela B - Valores referência para a elaboração das funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) para indicador que compoe a Dimensão Social

					(continuação)
S1	(0;0;0,5;2,5)	(0,5;2,5;7,5)	(2,5;7,5;20,5)	(7,5;20,5;28)	(20,5;28;35;35)
S2	(0;0;3;8,5)	(3;8,5;13)	(8,5;13;18)	(13;18;25)	(18;25;30;30)

Fonte: Autoria Própria

P População; T1 Taxa de Desocupação ; T2 Índice de Gini; T3 Rendimento Médio Mensal; T4 Salário Mínimo; T5 Razão de Rendimento por Sexo; T6 Razão de Rendimento por Sexo; T7 Razão de Rendimento por Cor. S1 Esperança de Vida ao Nascer; S2 Taxa de Mortalidade Infantil; S3 Imunização Contra Doenças Infecciosas Infantis; S4 Imunização Contra Doenças Infecciosas Infantis. E1 Escolaridade (média de anos de estudo) ; E2 Taxa de Escolirização (7-14 anos); E3 Taxa de Alfabetização; E4 Razão de Alfabetização por sexo (mulher/homem); E5 Razão de Alfabetização por cor (negros+pardos/brancos). H1 Domicílios com Acesso a rede Geral de Água; H2 Domicílios com Acesso a rede Geral de Esgoto ou Fossa Séptica; H3 Domicílios com coleta de lixo; H4 Domicílios com Iluminação Elétrica; H5 Densidade Média de Moradores por Dormitório (nº/dormitório). S1 Coeficiente de Mortalidade por homicídios (nº de mortes/100 mil habitantes); S2 Taxa de Mortalidade por Acidentes de Transporte (nº de acidentes/100 mil habitantes).

APÊNDICE C

Tabela C - Valores referência para a elaboração das funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) para indicador que compoe a Dimensão Economica

	I (a,b,c,d)	PI (a,b,c)	IN (a,b,c)	PS (a,b,c)	S (a,b,c,d)
Q1	(0;0;1000;1000)	(1000;4000;9000)	(4000;9000;26000)	(9000;26000;40000)	(26000;40000;45000;45000)
Q2	(0;0;7,5;17,5)	(7,5;17,5;22,5)	(17,5;22,5;27,5)	(22,5;27,5;35)	(27,5;35;45;45)
Q3	(0;0;0;1)	(0;1;2,5)	(1;2,5;7,5)	(2,5;7,5;13)	(7,5;13;17;17)
Q4	(0;0;5;15)	(5;15;30)	(15;30;40)	(30;40;75)	(40;75;100;100)
P1	(0;0;0,25;0,75)	(0,25;0,75;1,5)	(0,75;1,5;2,5)	(1,5;2,5;3,25)	(2,5;3,25;4;4)
P2	(0;0;0,5;1,5)	(0,5;1,5;2,5)	(1,5;2,5;3,5)	(2,5;3,5;4,5)	(3,5;4,5;5,5;5,5)
P3	(0;0;2,5;12)	(2,5;12;35)	(12;35;60)	(35;60;85)	(60;85;100;100)
P4	(0;0;10;30)	(10;30;55)	(30;55;80)	(55;80;95)	(80;95;100;100)
P5	(0;0;10;30)	(10;30;50)	(30;50;70)	(50;70;90)	(70;90;100;100)

Fonte: Autoria Própria

Q1 PIB per capita; Q2 Taxa de Investimento; Q3 Balança Comercial- Saldo/PIB; Q4 Grau de Endividamento (Dívida Externa/PIB). P1 Consumo de Energia per capita; P2 Intensidade Energética; P3 Participação de Fontes Renováveis na Oferta de Energia ; P4 Reciclagem; P5 Proporção de Municípios com Coleta Seletiva.

APÊNDICE D

Tabela D - Valores referência para a elaboração das funções de pertinência para os conjuntos fuzzy Insustentável (I), Potencialmente Insustentável (PI), Intermediário (IN), Potencialmente Sustentável (PS) e Sustentável (S) para indicador que compoe a Dimensão Institucional

	I (a,b,c,d)	PI (a,b,c)	IN (a,b,c)	PS (a,b,c)	S (a,b,c,d)
E1	(0;0;35;50)	(35;50;68)	(50;68;83)	(68;83;95)	(83;95;100;100)
E2	(0;0;20;33)	(20;33;50,5)	(33;50,5;70,5)	(50,5;70,5;90,5)	(70,5;90,5;100;100)
E3	(0;0;0,5;1,5)	(0,5;1,5;2,5)	(1,5;2,5;3,5)	(2,5;3,5;4,5)	(3,5;4,5;5;5)
C1	(0;0;50;150)	(50;150;275)	(150;275;425)	(275;425;550)	(425;550;600;600)
C2	(0;0;3;7,5)	(3;7,5;15)	(7,5;15;25)	(15;25;40)	(25;40;50;100)
C3	(0;0;3;7,5)	(3;7,5;15)	(7,5;15;25)	(15;25;40)	(25;40;50;100)
A1	(0;0;7,5;20)	(7,5;20;33)	(20;33;50)	(33;50;85)	(50;85;100;100)
A2	(0;0;15;35)	(15;35;47,5)	(35;47,5;62,5)	(47,5;62,5;85)	(62,5;85;100;100)
A3	(0;0;15;30)	(15;30;50)	(30;50;70)	(50;70;90)	(70;90;100;100)
A4	(0;0;15;30)	(15;30;50)	(30;50;70)	(50;70;90)	(70;90;100;100)

Fonte: Autoria Própria

E1 Ratificação de Acordos Globais Ambientais; E2 Existência de Conselhos Municipais de Meio Ambiente. C1 Gastos com Pesquisa e Desenvolvimento; C2 Acesso a Serviços de Telefonia; C3 Acesso a Internet. A1 Representação da Sociedade Civil no Conselho de Meio Ambiente; A2 Implementação de Parceria na Área Ambiental. A3 Implantação da Agenda 21 Local; A4 Agenda 21 Local com Fórum.