



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento de metodologia de análise de indicadores de sustentabilidade
como ferramenta para tomada de decisão utilizando lógica fuzzy**

Fernando Henrique Franchi Quinhoneiro

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Álvaro Luiz Guimarães Carneiro

São Paulo

2015

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento de metodologia de análise de indicadores de sustentabilidade
como ferramenta para tomada de decisão utilizando lógica fuzzy**

Fernando Henrique Franchi Quinhoneiro

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Álvaro Luiz Guimarães Carneiro

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2015

DEDICATÓRIA

A Deus acima de tudo, por toda provisão e cuidado. Por ter me sustentado e guiado por todo o caminho percorrido.

Dedico também a meus pais, Vânia Quinhoneiro e Amauri Pires, meus irmãos, Fabiana Quinhoneiro e Felipe Pires e a minha esposa Aline Quinhoneiro, por todo o apoio e suporte recebido.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Álvaro Luiz Guimarães Carneiro, por sua confiança e paciência, que me incentivou e instruiu nestes anos de trabalho e parceria.

Agradeço também a todos os professores e alunos com quem tive o prazer de conviver e que direta e indiretamente me auxiliaram na elaboração desta dissertação.

RESUMO

O maior desafio desse século tem como tema central a sustentabilidade, devido ao crescimento da população mundial e conseqüentemente ao aumento da demanda por recursos, como água, alimento e energia. A principal dificuldade quando se debate a questão do Desenvolvimento Sustentável está na metodologia de avaliação. Daí a necessidade de criar um instrumento de mensuração que aborde estes recursos de uma maneira holística e que seja capaz de traduzir dados em um resultado passível de interpretação. Existem ferramentas validadas para esse objetivo como “DashBoard of Sustainability” e outras em desenvolvimento como a Metodologia CLEW pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA. Este estudo tem como objetivo desenvolver um novo modelo de análise de correlação entre as variáveis, energia, água, uso do solo e clima, utilizando Inteligência Artificial, através da Lógica Fuzzy, tendo como base de dados, indicadores que representem um ou mais recursos, considerando uma distribuição temporal relativa e necessária para a investigação de resultados e comportamentos. O resultado será um índice final gerado através do mapeamento destes dados de entrada. Os resultados apresentados utilizando essa metodologia são de indicadores do Brasil, porém pode ser aplicada a qualquer outro país, permitindo uma análise de comparação do comportamento dos índices entre regiões. A contribuição desse projeto será a disponibilidade de uma ferramenta, com recurso computacional poderoso, destinada aos tomadores de decisão para auxiliar no desenvolvimento de estratégias e políticas de desenvolvimento.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Indicadores de Sustentabilidade, Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

The greatest challenge of this century is focused on sustainability, due to world population growth and consequently to the increased demand for resources such as water, food and energy. The main difficulty when discussing the issue of sustainable development is the evaluation methodology. Because of this, there is a need for a measurement tool that addresses these resources in a holistic manner and be able to translate data into results that can be interpreted. There are tools validated for this purpose like, "Dashboard of Sustainability" and other developing like the CLEW Nexus by the International Atomic Energy Agency - IAEA. This study aims to develop a new model to analyze the correlation between variables, energy, water, land use and climate, using Artificial Intelligence through Fuzzy Logic, having as a data source, indicators that represent one or more resource, considering the relative and temporal distribution required to research results and behaviors. The result is a final index generated by mapping these input data. The results presented using this methodology are indicators of Brazil, but can be applied to any other country, allowing a comparison analysis of the behavior of indices between regions. The contribution of this project will be the availability of a tool with powerful computational resource, aimed at decision makers to assist in developing strategies and development policies.

Keywords: Sustainability, Sustainability Indicators, Sustainable Development.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVO E ASPECTOS RELEVANTES | 16 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 17 |
| 3.1 | Histórico | 17 |
| 3.2 | A importância do desenvolvimento sustentável | 20 |
| 3.3 | Perspectivas do Desenvolvimento Sustentável | 20 |
| 3.4 | Dimensões da Sustentabilidade | 22 |
| 3.4.1 | Sustentabilidade ambiental | 22 |
| 3.4.2 | Sustentabilidade econômica..... | 22 |
| 3.4.3 | Sustentabilidade social..... | 23 |
| 3.4.4 | Sustentabilidade institucional | 23 |
| 3.5 | Principais indicadores de desenvolvimento sustentável | 23 |
| 3.5.1 | IDH – Índice de Desenvolvimento Humano | 24 |
| 3.5.2 | DNA Brasil | 24 |
| 3.5.3 | BS – Barômetro da Sustentabilidade (Barometer of Sustainability) | 25 |
| 3.5.4 | Pegada Ecológica | 26 |
| 3.5.5 | EPI – Índice de Desempenho Ambiental (Environmental Performance Index) .. | 26 |
| 3.5.6 | ESI – Índice de Sustentabilidade Ambiental (Environmental Sustainability Index) | 27 |
| 3.5.7 | EVI – Índice de Vulnerabilidade Ambiental (Environmental Vulnerability Index) .. | 27 |
| 3.5.8 | HPI – Índice Planeta Feliz (Happy Planet Index) | 27 |
| 3.5.9 | IDS – Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IBGE)..... | 28 |
| 3.5.10 | LPI – Índice Planeta Vivo (Living Planet Index) | 28 |
| 4 | ESTADO DA ARTE | 30 |
| 4.1 | MESSAGE | 30 |
| 4.2 | WEAP | 31 |
| 4.3 | LEAP..... | 32 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 4.4 | AEZ..... | 34 |
| 4.5 | Dashboard of Sustainability..... | 35 |
| 4.6 | CLEW | 36 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 5.1 | Metodologia | 38 |
| 5.1.1 | Indicadores | 38 |
| 5.1.2 | Lógica Fuzzy..... | 45 |
| 5.1.2.1 | Operações de conjuntos fuzzy | 46 |
| 5.1.2.2 | Conceitos de α -nível | 47 |
| 5.1.2.3 | Variáveis linguísticas..... | 47 |
| 5.1.2.4 | Funções de pertinência | 48 |
| 5.1.2.4.1 | Função de pertinência triangular | 49 |
| 5.1.2.4.2 | Função de pertinência trapezoidal..... | 50 |
| 5.1.2.4.3 | Função de pertinência gaussiana..... | 51 |
| 5.1.2.5 | Etapas da Arquitetura Fuzzy | 52 |
| 5.1.3 | Modelagem | 56 |
| 5.2 | Base de dados | 57 |
| 5.2.1 | Normalização de dados..... | 58 |
| 5.2.2 | Clima..... | 59 |
| 5.2.3 | Água | 61 |
| 5.2.4 | Solo..... | 63 |
| 5.2.5 | Energia | 64 |
| 5.3 | Plataforma Computacional | 67 |
| 6 | DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ANÁLISE | 68 |
| 6.1 | Etapas da arquitetura fuzzy para o índice “CASE” | 68 |
| 7 | RESULTADOS..... | 73 |
| 8 | CONCLUSÃO | 77 |
| 8.1 | Contribuição para pesquisa técnica e científica..... | 77 |
| 8.2 | Recomendações para trabalhos futuros..... | 78 |

| | |
|---|----|
| ANEXO I – BASE DE DADOS IN NATURA..... | 79 |
| ANEXO II – BASE DE DADOS NORMALIZADA PELO MÁXIMO - MÍNIMO | 80 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Vantagens e limitações dos indicadores e índices de desenvolvimento sustentável [34]. | 45 |
| Tabela 2: Relação de indicadores selecionados. | 58 |
| Tabela 3: Dados normalizados de emissões de gases de efeito estufa. | 59 |
| Tabela 4: Dados normalizados de consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio. | 60 |
| Tabela 5: Dados normalizado de focos de queimadas. | 60 |
| Tabela 6: Dados normalizados do número de domicílios com acesso a abastecimento de água. | 61 |
| Tabela 7: Dados normalizados da produção de pescado marítima e continental. | 62 |
| Tabela 8: Dados normalizados do volume útil dos principais reservatórios. | 62 |
| Tabela 9: Dados normalizados da área plantada com cana de açúcar. | 63 |
| Tabela 10: Dados normalizados do desflorestamento bruto anual da Amazônia legal. | 63 |
| Tabela 11: Dados normalizados da quantidade comercializada de fertilizantes. | 64 |
| Tabela 12: Dados normalizados da participação de fontes renováveis na oferta total de energia. | 65 |
| Tabela 13: Dados normalizados da intensidade energética. | 66 |
| Tabela 14: Dados normalizados do consumo de energia per capita. | 66 |
| Tabela 15: Resultados da modelagem fuzzy de primeira ordem. | 73 |
| Tabela 16: Resultados da modelagem fuzzy de segunda ordem. | 75 |
| Tabela 17: Indicadores de Clima, ano de 2003. | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Índice DNA Brasil, comparação Brasil x Espanha..... | 25 |
| Figura 2: Índice Planeta Vivo de 1970 a 2010 [22]. | 29 |
| Figura 3: Diagrama esquemático da estrutura do sistema do modelo MESSAGE [23]. | 31 |
| Figura 4: Interface gráfica do sistema WEAP [24]. | 32 |
| Figura 5: interface gráfica do sistema LEAP [25]. | 33 |
| Figura 6: Estrutura do modelo geral AEZ e de integração de dados [26]. | 34 |
| Figura 7: Interface gráfica do sistema Dashboard of Sustainability [27]. | 35 |
| Figura 8: Diagrama agregado do sistema de referência CLEW. | 36 |
| Figura 9: Pirâmide de Informação. | 39 |
| Figura 10: Modelo PSR OCDE-ONU [29]. | 40 |
| Figura 11: Modelo OCDE com relação entre os sistemas [29]. | 41 |
| Figura 12: Etapas na construção de um indicador sintético [32]. | 43 |
| Figura 13: Operações de um conjunto [36]. | 46 |
| Figura 14: α -níveis: $[A]_{\alpha}$ e $A_0 \neq U$ [37]. | 47 |
| Figura 15: Tipos de funções de pertinência [36]. | 48 |
| Figura 16: Conjunto fuzzy da altura de uma pessoa. | 49 |
| Figura 17: Função de pertinência triangular. | 50 |
| Figura 18: Função de pertinência trapezoidal. | 51 |
| Figura 19: Função de pertinência gaussiana. | 52 |
| Figura 20: Etapas do Raciocínio Fuzzy. | 52 |
| Figura 21: Exemplo de fuzzificação de uma variável de entrada. | 53 |
| Figura 22: Método centroide ou centro de gravidade. | 55 |
| Figura 23: Diagrama com as etapas da arquitetura fuzzy. | 55 |
| Figura 24: Arquitetura da modelagem fuzzy de 1ª ordem. | 56 |
| Figura 25: Arquitetura da modelagem fuzzy de 2ª ordem. | 57 |
| Figura 26: Comportamento dos indicadores do “recurso” Clima. | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 27: Comportamento dos indicadores do recurso Água. | 62 |
| Figura 28: Comportamento dos indicadores do recurso Solo. | 64 |
| Figura 29: Consumo de energia per capita X produto interno bruto..... | 66 |
| Figura 30: Comportamento dos indicadores do recurso Energia. | 67 |
| Figura 31: Funções de pertinência na fuzzificação dos dados..... | 69 |
| Figura 32: Modelagem fuzzy do recurso energia. | 70 |
| Figura 33: Regras da modelagem fuzzy do recurso água..... | 71 |
| Figura 34: Sistema de inferência da modelagem fuzzy..... | 72 |
| Figura 35: Comportamento dos indicadores no período de 2000 a 2010..... | 74 |
| Figura 36: Comportamento do índice CASE no período de 2000 a 2010. | 75 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| AEZ | Agro-ecological Zoning System |
| AIEA | Agência Internacional de Energia Atômica |
| BS | Barometer of Sustainability |
| CASE | Clima, Água, Solo e Energia |
| CDS | Commission on Sustainable Development |
| CEN | Centro de Engenharia Nuclear |
| CLEW | CLIMATE, LAND, ENERGY AND WATER |
| DATASUS | Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde |
| DS | Desenvolvimento Sustentável |
| EPI | Environmental Performance Index |
| ESI | Environmental Sustainability Index |
| EVI | Environmental Vulnerability Index |
| FAO | Food and Agriculture Organization |
| GEE | Gases de efeito estufa |
| HPI | Happy Planet Index |
| IA | Indicador da Água |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC | Indicador do Clima |
| IDH | Índice de Desenvolvimento Humano |
| IDS | Indicadores de Desenvolvimento Sustentável |
| IE | Indicador de Energia |
| IIASA | International Institute for Applied Systems Analysis |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IS | Indicador do Solo |

| | |
|---------|---|
| LEAP | Long range Energy Alternatives Planning system |
| LPI | Living Planet Index |
| MCTI | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação |
| MESSAGE | Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts |
| MPA | Ministério da Pesca e Agricultura |
| NEPP | Núcleo de Estudos de Políticas Públicas |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| SEI | Stockholm Environment Institute |
| SIAB | Sistema de Informação da Atenção Básica |
| SOPAC | Comissão de Geociência Aplicada do Pacífico Sul |
| ÚNICA | União da Indústria de Cana-de-Açúcar |
| UNICAMP | Universidade Estadual de Campinas |
| WEAP | Water Evaluation And Planning |
| WWF | World Wild Life |

1 INTRODUÇÃO

O maior desafio desse século tem como tema central a sustentabilidade. O desenvolvimento sustentável, assunto propalado desde primórdios dos anos 70, sendo reconhecido na esfera intergovernamental no final da década de 80, com a publicação do Relatório de Brundtland [1], que define, “Desenvolvimento Sustentável como sendo aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”, aborda o tema desenvolvimento em um contexto holístico, integrando as dimensões econômica, social, ambiental, incorporando posteriormente no início desse século a dimensão institucional.

A principal dificuldade quando se debate a questão do Desenvolvimento Sustentável está na metodologia de avaliação de tal desenvolvimento. Daí a necessidade de criar instrumentos de mensuração, ou indicadores do desenvolvimento, que são ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas através de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem.

O processo de desenvolvimento destes indicadores deve contribuir para uma melhor compreensão do que seja o desenvolvimento sustentável, sempre focando as mudanças nas tendências mundiais que hoje podem ser sintetizadas como sendo a necessidade de uma visão mais dinâmica que envolve riscos globais; problemas de crescimento populacional e de urbanização; aguçamento da dualidade socioeconômica; rupturas e descontinuidades tecnológicas e consciência Inter geracional.

Entre as várias ópticas de análise do desenvolvimento pode-se dizer que a questão energética é um dos pontos vitais não somente na avaliação do desenvolvimento mas sim no que diz respeito a sustentabilidade [2]. A publicação “Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies” [3] da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) em parceria com outros organismos internacionais, apresenta uma metodologia de análise de indicadores energéticos.

Como pronunciado pela Organização das Nações Unidas (ONU), “2012 Ano Internacional – Energia para Todos”, traça como meta até 2030 garantir acesso universal a energia moderna.

A Organização das Nações Unidas, coloca a necessidade de dobrar a taxa de melhoria da eficiência energética e o aumento da participação da energia renovável para tornar os sistemas de energia sustentáveis, caso contrário existe a probabilidade de ocorrência de um colapso [4].

A Agência Internacional de Energia Atômica, em uma publicação “Nuclear Technology Review-2009 Anexo VI” intitulado, “SEEKING SUSTAINABLE CLIMATE, LAND, ENERGY AND WATER (CLEW) STRATEGIES” [5], destaca o problema da crescente demanda global, com recursos escassos de elementos como terra, água e energia, sendo que a utilização de cada um desses recursos afeta a demanda dos outros e que por consequência, o uso de todos eles afeta o clima e o ambiente, mostrando a evidência da interdependência entre os recursos, e a importância dessas considerações quando se trata do desenvolvimento de estratégias e políticas, as quais não devem ser desenvolvidas de maneira segmentada e sim integrada [6, 7].

Sendo assim, se faz necessário o desenvolvimento de modelagens e metodologias de análise que torne possível o processamento de um universo de informações e dados com as respectivas correlações, traduzindo em resultados plausíveis de interpretação, proporcionando assim ferramentas de auxílios de extrema valia aos tomadores de decisão [8].

2 OBJETIVO E ASPECTOS RELEVANTES

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de análise de correlação entre as variáveis, energia, água, uso do solo e clima, que permita a avaliação e o entendimento do desenvolvimento sustentável no país, utilizando Inteligência Artificial, através da Lógica Fuzzy, fazendo uso da plataforma de linguagem MATLAB. A base de dados será composta por indicadores referentes aos recursos analisados, considerando uma distribuição temporal relativa e necessária para a investigação de resultados e comportamentos.

A relevância do trabalho consiste na utilidade da ferramenta destinada aos tomadores de decisão no desenvolvimento de estratégias e políticas de desenvolvimento, considerando uma análise de forma integrada de um conjunto de variáveis e recursos.

3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O Desenvolvimento sustentável implica em possibilitar que as pessoas, possam atingir um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, agora e no futuro, tendo a responsabilidade de fazer, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais. Resumindo, é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Para que tal desenvolvimento ocorra faz-se necessário o planejamento sobre a utilização destes recursos e o reconhecimento de que os mesmos são finitos. O Desenvolvimento Sustentável não pode ser confundido com o crescimento econômico, que basicamente depende do consumo crescente de energia e recursos naturais, que quando mal planejado se torna insustentável, pois leva ao esgotamento dos recursos naturais dos quais a humanidade depende [9].

3.1 Histórico

O desenvolvimento sustentável procura encontrar um equilíbrio entre os objetivos de desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e a conservação ambiental.

Em 1949, quatro anos após sua criação a Organização das Nações Unidas já demonstrava preocupação com relação à questão ambiental, quando foi realizada a Conferência Científica das Nações Unidas para Conservação e Utilização de Recursos Naturais, onde pela primeira vez, foram reunidos especialistas de todo mundo. Os tópicos principais deste encontro foram, a degradação de oceanos, rios e mares, a gestão de dejetos perigosos, a contaminação industrial, as mudanças climáticas e o desenvolvimento nuclear.

Alguns anos depois, em 1968, ocorreu outro importante evento promovido pela ONU, a Conferência Intergovernamental de Especialistas sobre as Bases Científicas para Uso e Conservação Racionais dos Recursos da Biosfera, onde os temas, seguindo os parâmetros da conferência de 1949, foram mais técnicos do que políticos [10].

Devido a intensidade das discussões sobre os limites do desenvolvimento do planeta e os riscos da degradação do meio ambiente, a ONU promoveu uma Conferência sobre o Meio Ambiente em Estocolmo (1972), que teve como objetivo conscientizar a sociedade a melhorar a relação com o meio ambiente, mostrando a importância do

consumo consciente de recursos atendendo as necessidades da população presente sem comprometer as gerações futuras.

Nesta mesma época em 1972, alguns dos membros do Clube de Roma, formado por cientistas, industriais e políticos de países desenvolvidos defendiam a ideia do “crescimento zero” ou da “economia de estado estacionário” como sendo o único meio para evitar a degradação ambiental.

No ano de 1983 foi constituída pela ONU, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento que foi presidida por Gro Harlem Brundtland, primeira ministra da Noruega. O Brasil era um dos pais que compunham esta comissão, que passou quatro anos estudando sistematicamente as relações entre os problemas ambientais e o modelo econômico vigente. Os resultados desta pesquisa foram publicados em 1987, durante a Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas, na Noruega, com o título Relatório Brundtland.

A elaboração do conceito de desenvolvimento sustentável com a publicação de Relatório Brundtland, contribuiu para deslegitimar os argumentos que defendiam o crescimento zero. O Relatório Brundtland (Nosso Futuro Comum), foi o grande responsável pela disseminação deste tema pelo mundo, ganhando importante destaque no cenário mundial.

De acordo com o relatório, foi definida a necessidade urgente de se encontrar formas de desenvolvimento econômico que se sustentassem, sem a redução drástica dos recursos naturais e sem provocar danos ao meio ambiente. O relatório também definiu três princípios essenciais a serem cumpridos, desenvolvimento econômico, proteção ambiental e equidade social, sendo que para cumprir tais condições seriam necessárias mudanças tecnológicas e sociais.

Em 1992 foi realizado no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, conhecida como Rio 92, onde o conceito de desenvolvimento sustentável foi efetivamente incorporado nas propostas conjuntas dos países membros.

Durante a conferência, foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas que tratava sobre as Mudanças Climáticas, onde foram discutidas questões importantes para o lançamento do Protocolo de Kyoto, que tem como objetivo estabelecer metas de emissão de gases que provocam o efeito estufa. Para que esta lei entrasse em vigor, era necessário que os países responsáveis por 55% das emissões mundiais se comprometessem com as metas do Protocolo, que somente entrou em vigor em 2005, ano em que a Rússia ratificou

sua adesão. Os Estados Unidos, responsáveis pela maior parcela de emissão de gases causadores de efeito estufa do planeta, cerca de 25%, não aderiram ao acordo.

Além do Protocolo de Kyoto outros quatro documentos foram elaborados nessa conferência:

- Declaração do Rio ou Carta da Terra: declaração de princípios através dos quais são definidos os direitos e responsabilidades dos governos e pessoas sobre o meio
- Agenda 21: plano de ação estabelecendo metas a serem atingidas no século XXI, que tem como objetivo transformar as relações sociais em busca da sustentabilidade. É um protocolo de intenções.
- Declaração das Florestas: definiu os princípios para a conservação de florestas e matas nativas do ponto de vista sustentável.
- Convenção sobre Biodiversidade: definiu a necessidade da conservação da biodiversidade, dispendo sobre os direitos dos países com alta biodiversidade.

Com o Objetivo de analisar se os princípios estabelecidos em 1992 foram seguidos e se o mundo estava caminhando para a sustentabilidade, em 2002, a ONU promoveu a Rio +10, na África do Sul. Esta conferência chamada de “Cúpula Mundial do Desenvolvimento Sustentável” elaborou dois documentos: Declaração Política e Plano de Implementação, reafirmando o compromisso entre crescimento econômico, justiça social e proteção ambiental. Além dos documentos, foram estabelecidos novamente princípios e metas, porém, não foram estabelecidos meios de implementação, sendo que as negociações foram difíceis, onde foram estabelecidos vários acordos bilaterais entre países.

Com o objetivo de renovar e reafirmar a participação dos líderes dos países com relação ao desenvolvimento sustentável no planeta, foi realizado no Rio de Janeiro em 2012 a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio +20) uma segunda etapa da Cúpula da Terra (Rio 92), contou com a participação de líderes dos 193 países integrantes da ONU.

Nesta conferência foram discutidos assuntos como, balanço do que foi feito nos últimos 20 anos em relação ao meio ambiente, a importância e os processos da economia verde, ações para garantir o desenvolvimento sustentável do planeta, maneiras de eliminar a pobreza e a governança internacional no campo do desenvolvimento sustentável. Os resultados não foram como esperados devido principalmente a conflitos de interesses entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

3.2 A importância do desenvolvimento sustentável

Durante toda a história da civilização humana, vemos relatos da busca dos povos por crescimento e desenvolvimento, satisfazendo suas necessidades não importando o custo que isso viria a causar ao meio ambiente e na disponibilidade futura de recursos.

O modelo de industrialização tardia ou de modernização, que foi tema de diversas teorias nos anos 60 e 70, é capaz de modernizar alguns setores da economia, mas incapaz de oferecer um desenvolvimento equilibrado para uma sociedade inteira.

De acordo com Brüseke [11], a modernização, não acompanhada da intervenção do estado racional e das correções partindo da sociedade civil, desestrutura a composição social, a economia territorial e seu contexto ecológico. Emerge daí a necessidade de uma perspectiva multidimensional, que envolva economia, ecologia e política ao mesmo tempo, como busca fazer a teoria do desenvolvimento sustentável.

“O desenvolvimento econômico necessário à redução da pobreza, aliado ao crescimento populacional, implicará num significativo aumento da demanda por energia nas próximas décadas. Os impactos ambientais resultantes gerarão um conjunto de dilemas e desafios cuja solução demandará um complexo arranjo de cooperação entre os países com medidas de longo prazo” [12]

As ações antrópicas motivaram boa parte dos problemas ambientais que a sociedade moderna vive, sejam eles os de escassez de recursos naturais, importantes para a satisfação do padrão de vida, ou os de poluição e seus efeitos.

3.3 Perspectivas do Desenvolvimento Sustentável

Quando se discute o desenvolvimento sustentável, não existe um consenso quanto a sua multidimensionalidade, com isso surgem diferentes pontos de vista, um dos mais aceitos atualmente é apresentado por Ignacy Sachs [13], que apresenta a sustentabilidade tendo como base oito perspectivas diferentes.

Social: que se refere ao alcance de um patamar razoável de homogeneidade social, com distribuição de renda justa, emprego pleno e/ou autônomo com qualidade de vida decente e igualdade no acesso aos recursos e serviços sociais.

Cultural: referente a mudanças no interior da continuidade (equilíbrio entre respeito à tradição e inovação), capacidade de autonomia para elaboração de um projeto nacional integrado e endógeno (em oposição às cópias servis dos modelos alienígenas) e autoconfiança, combinada com abertura para o mundo.

Ecológica: relacionada à preservação do potencial do capital natural na sua produção de recursos renováveis e à limitação do uso dos recursos não renováveis.

Ambiental: trata-se de respeitar e realçar a capacidade de autodepuração dos ecossistemas naturais.

Territorial: refere-se a configurações urbanas e rurais balanceadas (eliminação das inclinações urbanas nas alocações do investimento público), melhoria do ambiente urbano, superação das disparidades inter-regionais e estratégias de desenvolvimento ambientalmente seguras para áreas ecologicamente frágeis.

Econômica: desenvolvimento econômico Inter setorial equilibrado, com segurança alimentar, capacidade de modernização contínua dos instrumentos de produção, razoável nível de autonomia na pesquisa científica e tecnológica e inserção soberana na economia internacional.

Política (Nacional): democracia definida em termos de apropriação universal dos direitos humanos, desenvolvimento da capacidade do Estado para implementar o projeto nacional, em parceria com todos os empreendedores e um nível razoável de coesão social.

Política (Internacional): baseada na eficácia do sistema de prevenção de guerras da ONU, na garantia da paz e na promoção da cooperação internacional, Pacote Norte-Sul de co-desenvolvimento, baseado no princípio da igualdade (regras do jogo e compartilhamento da responsabilidade de favorecimento do parceiro mais fraco), controle institucional efetivo do sistema internacional financeiro e de negócios, controle institucional efetivo da aplicação.

3.4 Dimensões da Sustentabilidade

3.4.1 Sustentabilidade ambiental

A dimensão ambiental da sustentabilidade é a mais amplamente defendida e discutida pela maioria dos autores e foi amplamente difundida com as conferências dos anos 70. Diz respeito ao uso dos recursos naturais e à degradação ambiental, e está relacionada aos objetivos de preservação e conservação do meio ambiente, considerados fundamentais ao benefício das gerações futuras. Desta forma, seus defensores acreditam na necessidade de melhorar e controlar o uso dos recursos naturais, respeitando sua capacidade de renovação.

Com isso existe a necessidade de uma grande mudança na maneira de se analisar o fluxo de bens e serviços em um sistema capitalista, considerando também os benefícios dos ativos ambientais. Fazendo com que a sociedade tenha como foco a busca por melhoria da qualidade do meio ambiente e da preservação das fontes de recursos energéticos e naturais.

3.4.2 Sustentabilidade econômica

A dimensão econômica dos indicadores de desenvolvimento sustentável trata do desempenho macroeconômico e financeiro e dos impactos no consumo de recursos materiais e uso de energia primária. É uma dimensão que ocupa-se com os objetivos de eficiência dos processos produtivos e com as alterações nas estruturas de consumo orientadas a uma reprodução econômica sustentável a longo prazo.

Não se pode abandonar abruptamente a estrutura econômica na qual a sociedade atual está baseada e em vários momentos da história isto foi tentado e as consequências sempre foram desastrosas. Assim, entender a estrutura na qual se está baseado o desenvolvimento econômico atual e propor mudanças gradativas em busca da sustentabilidade já em si é um objetivo ousado.

Assim, a dimensão econômica deve levar em conta que existem aspectos importantes a serem considerados, não apenas da manutenção do capital e as transações econômicas. Desta forma, a economia deve possibilitar uma alocação e uma gestão mais eficiente dos recursos e um fluxo regular de investimentos públicos e privados [12].

3.4.3 Sustentabilidade social

A dimensão social dos indicadores de desenvolvimento sustentável corresponde, especialmente, aos objetivos ligados à satisfação das necessidades humanas, melhoria da qualidade de vida e justiça social.

Sachs propõe que se defina um processo de desenvolvimento que leve a um crescimento estável com igualdade de renda, promovendo assim das diferenças sociais e a melhoria na qualidade de vida de todos.

Pode-se dizer que o cerne da sustentabilidade social segundo Sachs [13] é a redução das desigualdades. Para tanto os principais componentes a serem analisados são a criação de postos de trabalho que permitam a obtenção de renda individual adequada e a produção de bens dirigida propriamente às necessidades básicas sociais.

3.4.4 Sustentabilidade institucional

A Dimensão Institucional diz respeito à orientação política, capacidade e esforço despendido para as mudanças requeridas para uma efetiva implementação do Desenvolvimento Sustentável. Ressalta-se que nesta dimensão figuram-se os indicadores que sintetizam o investimento em ciência e novas tecnologias de processos e produtos e também a atuação do poder público na proteção do ambiente, componentes importantes para a busca das alternativas para o Desenvolvimento Sustentável.

Assim o conjunto de indicadores desta dimensão deve ser capaz de captar tanto a Estrutura Institucional quanto a Capacidade Institucional. O primeiro está relacionado a estratégias de implementação do desenvolvimento sustentável e da cooperação internacional, enquanto o segundo está relacionado com o acesso à informação, à infraestrutura de comunicação, a ciência e tecnologia e a preparação e reposta para desastres naturais.

3.5 Principais indicadores de desenvolvimento sustentável

Uma das maiores complexidades, quando o assunto em pauta é o desenvolvimento sustentável, diz respeito ao entendimento deste fenômeno como um todo,

sendo este um grande desafio para pesquisadores, que tem como objetivo criar meios para facilitar o entendimento, auxiliando os agentes responsáveis pelo desenvolvimento de políticas públicas e privadas na tomada de decisão.

Para isso se faz necessário a utilização de indicadores que ajudem a mensurar a sustentabilidade. Existem muitos indicadores que buscam retratar esta realidade, os principais são:

3.5.1 IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

O IDH é um indicador que mede o nível de desenvolvimento humano de um país. Este indicador é medido anualmente, é amplamente utilizado em todo o mundo como por exemplo, para medir o cumprimento das metas estabelecidas para 2015 pelo Objetivos de Desenvolvimento do Milênio da Organização das Nações Unidas.

A ideia central do Indicador de Desenvolvimento Humano (IDH) é de que é necessário incluir aspectos culturais, políticos e sociais para medir o desenvolvimento de uma população. A proposta deste indicador veio em contrapartida ao Produto Interno Bruto (PIB), que se baseia somente na dimensão econômica do desenvolvimento.

O IDH é composto pelo PIB per capita, longevidade (expectativa de vida ao nascer) e educação (analfabetismo e da taxa de matrícula nos três níveis de ensino).

3.5.2 DNA Brasil

O DNA Brasil é um índice criado por um grupo de pesquisadores do Núcleo de Estudos de Políticas Públicas (NEPP), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), que tem como objetivo avaliar o bem-estar econômico, competitividade, proteção e coesão social no país, além de questões relacionadas à educação e saúde e ao desenvolvimento socioambiental.

A figura 1 apresenta a utilização do Índice DNA Brasil em um exemplo da comparação de dados nacionais com dados da Espanha.



Figura 1: Índice DNA Brasil, comparação Brasil x Espanha.

3.5.3 BS – Barômetro da Sustentabilidade (Barometer of Sustainability)

O Barômetro da Sustentabilidade, é uma metodologia que avalia e relata o progresso em direção a sociedades sustentáveis que combina, de modo coerente, diversos indicadores sociais e ambientais, fornecendo uma avaliação do estado das pessoas e do meio ambiente por meio de uma escala de índices. Oferece imagens claras, rapidamente comunicadas, da condição do ambiente, da condição das pessoas e, quando analisadas em conjunto, do progresso geral em direção à sustentabilidade. Também compara o bem-estar humano e o do ecossistema dentro das sociedades, a velocidade e o sentido da mudança e os principais pontos fortes e fracos.

3.5.4 Pegada Ecológica

Foi desenvolvido com base na obra de Wackernagel e Rees (1996) [14] que apresenta uma ferramenta para auxiliar na definição de ações públicas rumo a sustentabilidade, baseado na capacidade de suporte do ecossistema.

O método proposto mede o fluxo de energia e matéria necessária para suprir o consumo de determinada população e converte este gasto de matéria e energia em área de solo e água requerida da natureza para suportar esse fluxo [15], em outras palavras o sistema consiste em medir a quantidade de área ecológica produtiva necessária para prover no tempo os recursos necessários às atividades humanas. Os dados de consumo são obtidos das estatísticas nacionais ou locais já existentes, o que diminui o custo com pesquisa de campo.

Tomando-se como base de análise um país, o índice resultante, se positivo, indica que aquela população consome acima da capacidade de suporte do território que ocupa. Se negativo, aquele espaço ainda apresenta condições de atender um aumento de consumo. Portanto, quanto maior a área apropriada menor o grau de sustentabilidade (15).

3.5.5 EPI – Índice de Desempenho Ambiental (Environmental Performance Index)

O Environmental Performance Index (EPI), é um método para quantificar e classificar numericamente o desempenho ambiental das políticas de um país, foi desenvolvido pelo Centro de Política e Lei Ambiental da Universidade de Yale, em conjunto com a Rede de Informação do Centro Internacional de Ciências da Terra da Universidade de Columbia [16]. O objetivo do EPI é oferecer métricas quantitativas baseadas na ciência para auxiliar os países no desenvolvimento de metas sustentáveis de longo prazo.

As variáveis consideradas para a obtenção deste índice dividem-se em dois grandes objetivos, saúde ambiental e vitalidade dos ecossistemas. A vitalidade ambiental por sua vez se divide em três categorias de políticas: o impacto do ambiente na saúde, água potável e saneamento básico, e os efeitos da qualidade do ar na saúde. A vitalidade dos ecossistemas divide-se em cinco categorias de políticas: efeitos da poluição do ar nos ecossistemas, recursos hídricos, biodiversidade e habitat, recursos naturais produtivos e mudança do clima [16].

3.5.6 ESI – Índice de Sustentabilidade Ambiental (Environmental Sustainability Index)

O Índice de Sustentabilidade Ambiental, publicado entre 1999 e 2005. Este índice também foi desenvolvido pelo Centro de Política e Lei Ambiental da Universidade de Yale, em parceria com a Rede de Informação do Centro Internacional de Ciências da Terra da Universidade de Columbia com o objetivo de avaliar a sustentabilidade relativa entre países. É uma métrica que procura quantificar indicadores socioeconômicos, ambientais e institucionais que caracterizam e influenciam a sustentabilidade ambiental na escala nacional. Este índice foi substituído pelo EPI devido a uma mudança de foco pelas equipes de desenvolvimento [16].

3.5.7 EVI – Índice de Vulnerabilidade Ambiental (Environmental Vulnerability Index)

O Índice de Vulnerabilidade Ambiental é uma metodologia de mensuração desenvolvida pela Comissão de Geociência Aplicada do Pacífico Sul (SOPAC), do Programa Ambiental das Nações Unidas e outros parceiros para caracterizar a gravidade relativa de vários tipos de questões ambientais sofridas por 243 países e regiões (Antártica). Os resultados do EVI são usados com foco no planejamento de soluções para pressões negativas no meio ambiente.

O EVI é composto por 50 indicadores, sendo eles, 32 indicadores de risco, 8 de resistência e 10 que medem o dano, todos com igual ponderação e são agregados através de média aritmética. A escala para a normalização do EVI varia entre o valor 1 (alta resiliência/baixa vulnerabilidade) e 7 (baixa resiliência/elevada vulnerabilidade) [17].

3.5.8 HPI – Índice Planeta Feliz (Happy Planet Index)

O Happy Planet Index (HPI) mede a capacidade que cada país tem para proporcionar um bem-estar sustentável aos seus cidadãos. Foi introduzido em Julho de 2006 pela New Economics Foundation, uma organização não governamental ecológica britânica. O HPI não é uma forma de quantificar quais os países mais felizes do mundo. É antes uma forma de medir a eficiência com que uma nação converte os seus recursos naturais em vidas longas e felizes para os seus cidadãos.

O índice é alcançado através da aplicação da equação abaixo, que é composta pelo bem estar da população (obtido através de questionário), expectativa de vida e pegada ecológica.

$$\text{Índice Planeta Feliz} = \frac{\text{Bem estar} \times \text{Expectativa de vida}}{\text{Pegada Ecológica}} \quad (1)$$

3.5.9 IDS – Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IBGE)

O IDS é uma serie de publicações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que teve início em 2002 e traz indicadores de desenvolvimento sustentável dividido por dimensões ambiental, social, econômica e institucional.

Esta publicação tem como orientação as recomendações da Comissão para o Desenvolvimento Sustentável - CDS (Commission on Sustainable Development - CSD) da Organização das Nações Unidas - ONU.

Os indicadores são apresentados sob a forma de tabelas, gráficos e mapas, precedidos de uma ficha contendo a descrição do indicador, a indicação das variáveis e fontes utilizadas em sua construção, a relevância para o desenvolvimento sustentável e uma breve análise, e, em casos específicos, comentários metodológicos, incluindo, ao final da publicação, um glossário com os termos e conceitos considerados relevantes [18, 19].

3.5.10 LPI – Índice Planeta Vivo (Living Planet Index)

A World Wild Life (WWF) criou o “Living Planet Report”, um relatório que fornece uma perspectiva quantitativa do estado do ambiente natural. O Living Planet Index (LPI) constitui a principal métrica deste relatório, tendo sido concebido em 1998 pela WWF, em parceria com a Zoological Society of London. Esta métrica tem por objetivo medir o estado dos ecossistemas, sendo que, atualmente, representa a perda contínua da biodiversidade. O LPI enfatiza apenas aspectos ambientais do desenvolvimento sustentável, não incluindo aspectos econômicos, nem sociais [20, 21]. Dados mais recentes mostram que o índice global que monitora 9.000 populações de mais de 2.600 espécies sofreu um declínio de 52% entre 1970 e 2010, como mostra a figura 2.

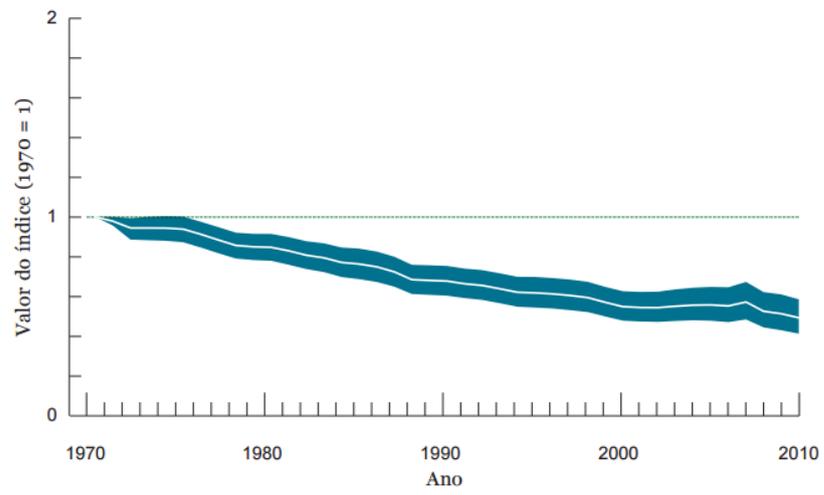


Figura 2: Índice Planeta Vivo de 1970 a 2010 [22].

4 ESTADO DA ARTE

Existem vários modelos desenvolvidos e disponíveis para análise e monitoração de comportamento de cada um dos recursos aqui debatidos: Energia, Clima, Uso do Solo e Água. Evidentemente o nível de aprofundamento de análise de cada um deles e o tratamento matemático e estrutural do modelo é de extrema relevância e complexidade. Porém a análise destes recursos é feita separadamente, não permitindo analisar a relação e interdependência destes recursos.

Os principais modelos que são reconhecidos pelos organismos governamentais são: MESSAGE, LEAP, WEAP, AEZ, Dashboard of Sustainability e CLEW.

4.1 MESSAGE

MESSAGE - Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts [23], é uma ferramenta utilizada para o planejamento de sistemas energéticos. É capaz de operar em diversas dimensões, desde pequenas ilhas, até grandes países. Foi desenvolvida pela AIEA, Agência Internacional de Energia Atômica em parceria com a IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis).

É um modelo de otimização de engenharia de sistemas usados para o planejamento de médio a longo prazo de sistemas de energia, analisando as políticas de mudanças climáticas e desenvolvendo cenário, para as regiões nacionais ou globais. O modelo utiliza dados de 5 a 10 anos para simular um máximo de 120 anos.

As variáveis que são utilizadas por este sistema são bastante flexíveis e podem ser adequadas a cada situação. Alguns exemplos são, estrutura do sistema energético (incluindo futuras instalações e equipamentos), preço e fluxo de energia no ano, projeção de demanda energética, opções de tecnologia e de recursos e seu perfil de desempenho técnico-econômico.

Os resultados alcançados através das análises destes dados são; mix de energia primária e final, emissão e fluxo de resíduos, saúde e impactos ambientais, uso de recursos, uso do solo, dependência de importações, necessidade de investimento.

A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático da estrutura básica de exemplo de sistema de energia do modelo apresentado pelo MESSAGE.

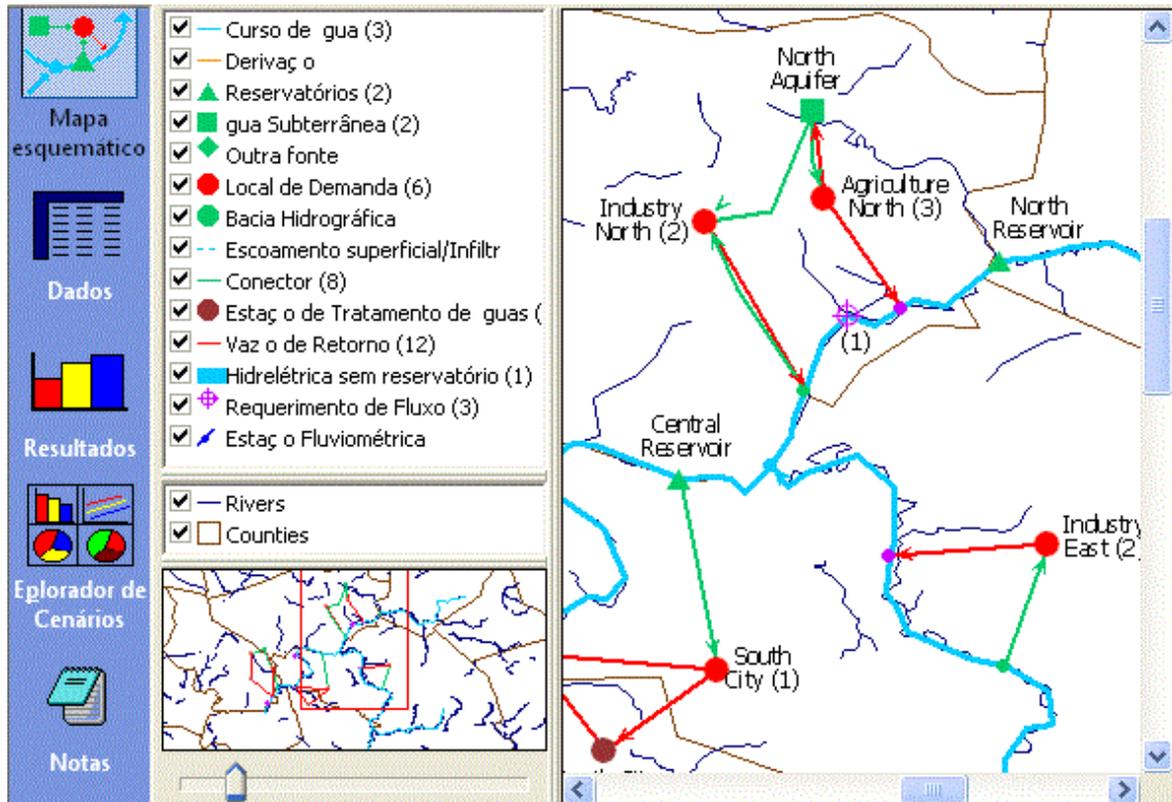


Figura 4: Interface gráfica do sistema WEAP [24].

A última versão do software de planejamento hídrico WEAP, possui uma nova função que permite integrar e analisar dados conjuntos com o sistema LEAP de gestão energética, desenvolvido pelo mesmo instituto, mostrando a realidade deste novo cenário em que estamos inseridos, onde há a necessidade de se avaliar estes recursos considerando a interdependência entre eles.

“Com esta nova ligação dinâmica para LEAP, os usuários do WEAP agora podem criar modelos muito mais poderosos e integrados para explorar tanto o impacto do sistema de energia no sistema de água quanto o impacto do sistema de água no sistema de energia” Jack Sieber, criador do WEAP.

4.3 LEAP

LEAP - Long range Energy Alternatives Planning system [25], outra ferramenta utilizada para planejamento energético, foi desenvolvida pela SEI (Stockholm Environment Institute).

Este sistema funciona usando dados anuais, e o espaçamento de tempo pode se estender de várias maneiras (normalmente entre 20 e 50 anos). O LEAP também inclui um gerenciador de cenário que pode ser utilizado para descrever medidas de política individuais. Estes podem então ser combinados de diferentes formas para criar cenários integrados alternativos.

As bases de dados de entrada e saída são semelhantes à ferramenta anterior (MESSAGE) apresentando grande flexibilidade considerando a necessidade de análise abordada. Como exemplo temos, demanda energética (atual, futura e a curva do período analisado), usinas (existentes e em planejamento), importação, exportação e disponibilidade de recursos e fator de emissão de gases de efeito estufa.

Como alguns resultados das interações o modelo apresenta, energia futura ideal sobre diferentes condições, emissão futura de gases de efeito estufa e os custos associados.



Figura 5: interface gráfica do sistema LEAP [25].

4.4 AEZ

AEZ - Agro-ecological Zoning System [26], modelo desenvolvido pela IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) em parceria com a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). É uma ferramenta de avaliação de recursos da terra para uma melhor gestão, planejamento e monitoramento desses recursos.

A ferramenta tem sido usada desde 1978 para determinar os potenciais de produção agrícola e capacidade de suporte da área terrestre do mundo. O sistema AEZ se tornou global em 2000, com a disponibilidade das bases de dados globais dos parâmetros climáticos, topografia, solo e relevo, cobertura do solo e distribuição da população.

Ele fornece um quadro padronizado para a caracterização do clima, solo e condições do terreno para a análise de sinergias e troca de usos alternativos dos recursos (terra, água e tecnologia) para a produção de alimento, preservando a qualidade ambiental.

Pode ser aplicado em várias avaliações como, inventário dos recursos da terra, avaliação da produtividade da terra, incluindo silvicultura e pecuária, estimativa de áreas cultiváveis, avaliação de degradação da terra e avaliação do impacto das alterações climáticas.

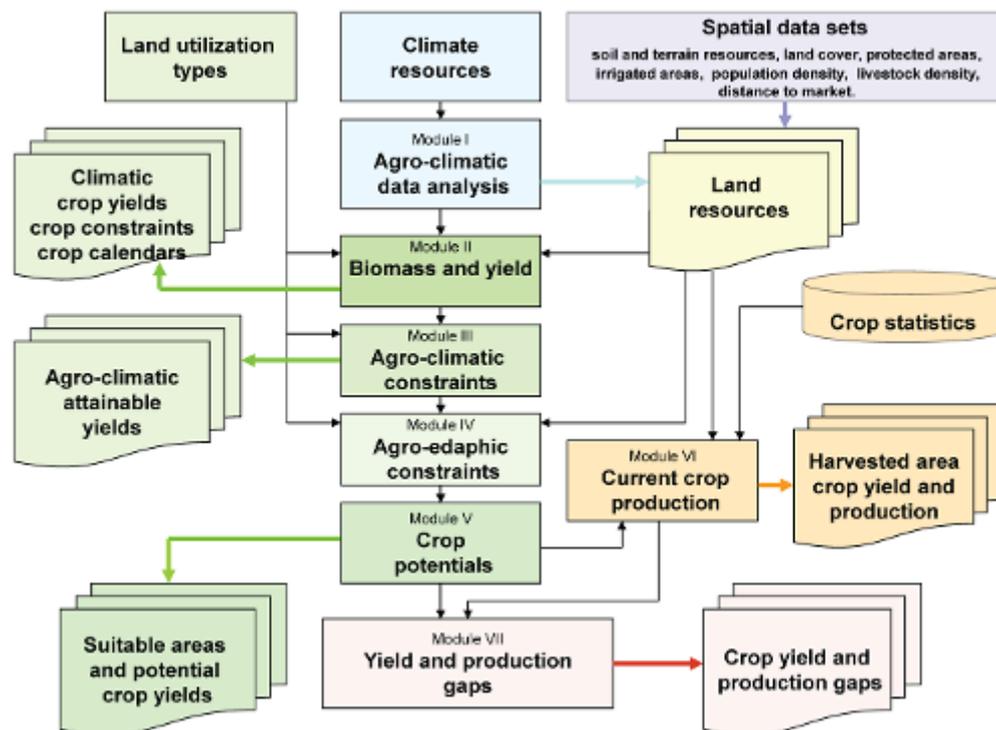


Figura 6: Estrutura do modelo geral AEZ e de integração de dados [26].

4.5 Dashboard of Sustainability

O Dashboard of Sustainability ou Painel de Sustentabilidade, é um software livre, não comercializado, que mais se aproxima do modelo apresentado, uma vez que analisa a sustentabilidade de uma maneira integrada, considerando as dimensões, econômica, social, ambiental e Institucional [27].

Entre as principais funções desta ferramenta estão, análise de performance com indicadores individuais e índices agregados, comparações entre países com curvas de distribuição e mapas, comparação entre grupos de países, entre outras [15].

Os resultados são apresentados através de gráficos ou mapas, ou como um “painel” com quatro displays representando cada uma das dimensões analisadas (Ambiental, Social, Econômica e Institucional), como representado na figura 7.

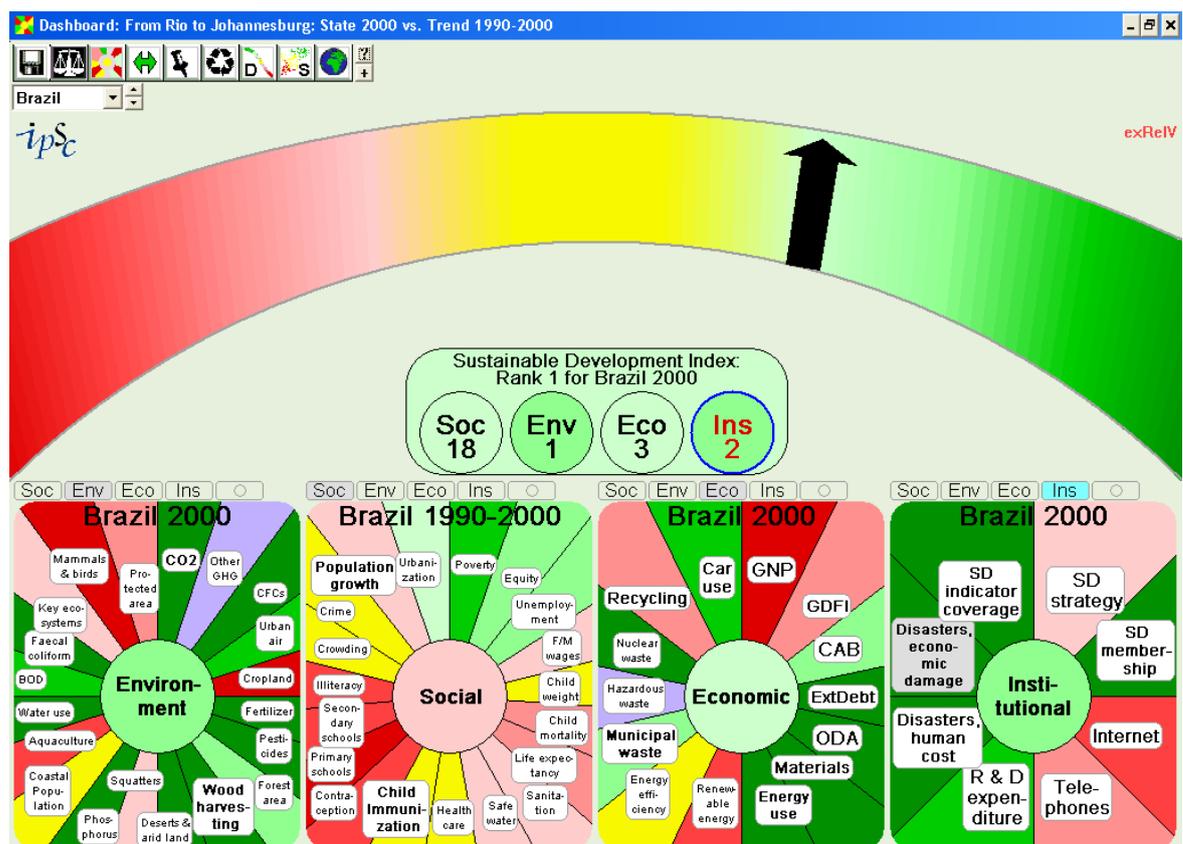


Figura 7: Interface gráfica do sistema Dashboard of Sustainability [27].

4.6 CLEW

A pesquisa CLEW é focada no desenvolvimento de um quadro de planejamento integrado dos recursos Clima, Solo, Energia e Água, e de ferramentas que pode ser flexivelmente aplicado em várias situações. Este foi o principal motivador deste trabalho, uma vez que trata de uma mesma ideia baseada na gestão de recursos e suas interdependências.

O CLEW desenvolve uma abordagem de sistemas integrados. Ele investiga interligações entre estes diferentes recursos para determinar como os efeitos das mudanças em um pode afetar os outros, e identificar feedbacks contra intuitivo nestes sistemas integrados [28].

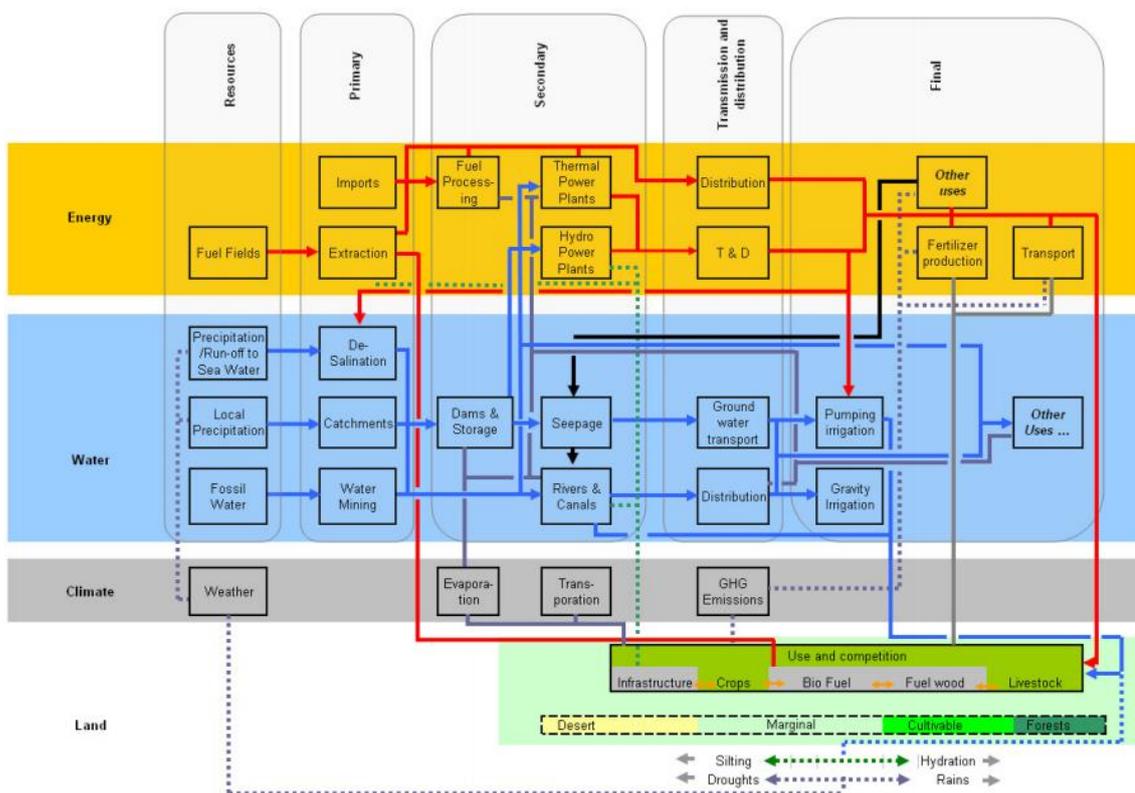


Figura 8: Diagrama agregado do sistema de referência CLEW.

O diagrama representado na figura 8 mostra o sistema de referência do diagrama CLEW, que de acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), é uma ferramenta útil para visualizar relações que precisam ser representadas por

expressões matemáticas simplificadas. As linhas representam fluxos e as caixas, representam as atividades ou grupos de atividades, que modificam vários fluxos [5].

A pesquisa CLEW é realizada em colaboração com várias instituições internacionais, como: FAO, IAEA, IIASA, SEI, UNDESA e UNECE.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Metodologia

A metodologia da ferramenta proposta é baseada em modelagem de dados com recursos de inteligência artificial, através da lógica fuzzy. Esta modelagem será dividida em duas fases, a modelagem de primeira ordem, onde os indicadores selecionados, que serão três para cada recurso, serão mapeados em uma saída para cada um destes recursos. Posteriormente uma modelagem de segunda ordem, agregando os resultados de saída da modelagem de primeira ordem, gerando um Índice, como resultado da análise integrada dos recursos em questão dentro de uma serie temporal.

5.1.1 Indicadores

A etimologia da palavra indicador tem origem no latim *indicare* que significa revelar ou tornar-se de conhecimento público.

Os indicadores, quando colocados de forma numérica, são valores medidos ou derivados de mensurações quantitativas e/ou qualitativas, passíveis de serem padronizados e assim comparados com essas mesmas informações de outras áreas, regiões ou países. Possibilitam a seleção das informações significativas, a simplificação de fenômenos complexos, a quantificação da informação e a comunicação da informação entre coletores e usuários.

Assim, os principais usos dos indicadores são: avaliação de condições e tendências em relação aos objetivos e metas; capacidade de comparação de resultados considerando similaridade de metodologias; fornecimento de informações de advertência antecipando condições futuras.

A figura 9 apresenta uma pirâmide representando a relação da quantidade de informação e sua condensação. A questão a se destacar é a necessidade exploratória de metodologias a serem desenvolvidas no sentido de investigar comportamentos e metas no processamento de um universo de dados e informações com o objetivo de guiar a uma determinada ação.



Figura 9: Pirâmide de Informação.

É importante considerar alguns dos principais conceitos associados à utilização de indicadores e índices, sendo que os principais são:

- Parâmetro - corresponde a uma grandeza que pode ser medida com precisão ou avaliada qualitativamente / quantitativamente, e que se considera relevante para a avaliação dos sistemas ambientais, econômicos, sociais e institucionais;

- Indicador - parâmetros selecionados e considerados isoladamente ou combinados entre si, sendo de especial pertinência para refletir determinadas condições dos sistemas em análise (normalmente são utilizados com pré tratamento, isto é, são efetuados tratamentos aos dados originais, tais como médias aritméticas simples, medianas, etc.;

- Índice - corresponde a um nível superior de agregação, onde depois de aplicado um método de agregação aos indicadores é obtido um valor final. Os métodos de agregação podem ser aritméticos (linear, geométrico, mínimo, máximo, aditivo) ou heurísticos (regras de decisão).

Para a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) da Organização das Nações Unidas – ONU, os indicadores são parâmetros que fornecem informações sobre o estado de um fenômeno, com uma extensão significativa. Ainda de acordo com a classificação da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento (OCDE), os indicadores ambientais podem ser sistematizados pelo modelo Pressão-Estado-Resposta, que se baseia em três grupos de indicadores, conforme indicado na figura 10.

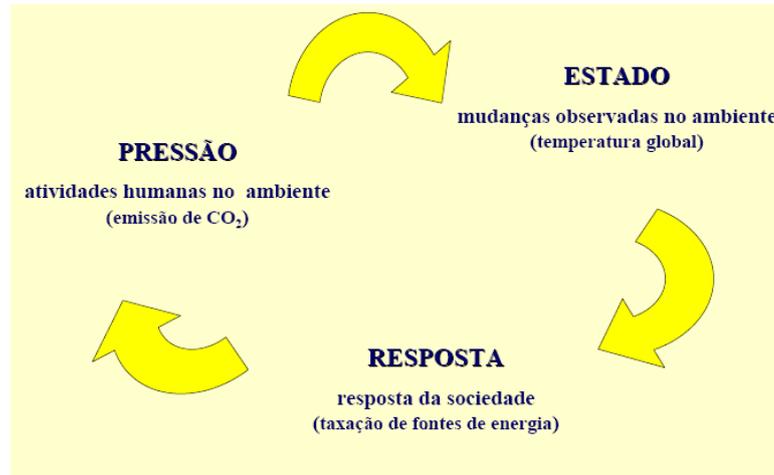


Figura 10: Modelo PSR OCDE-ONU [29].

Pressão - caracterizam as pressões sobre os sistemas ambientais e podem ser traduzidos por indicadores de emissão de poluentes, eficiência tecnológica, intervenção no território e de impacto ambiental.

Estado - refletem a qualidade do ambiente num dado horizonte de espaço/tempo, são por exemplo os indicadores de sensibilidade, risco e qualidade ambiental.

Resposta - avaliam as respostas da sociedade às alterações e preocupações ambientais, bem como à adesão a programas e/ou à implementação de medidas em prol do ambiente; podem ser incluídos neste grupo os indicadores de adesão social, de sensibilização e de atividades de grupos sociais importantes.

A figura 11 apresenta o modelo da OCDE com exemplos de relações entre os sistemas.

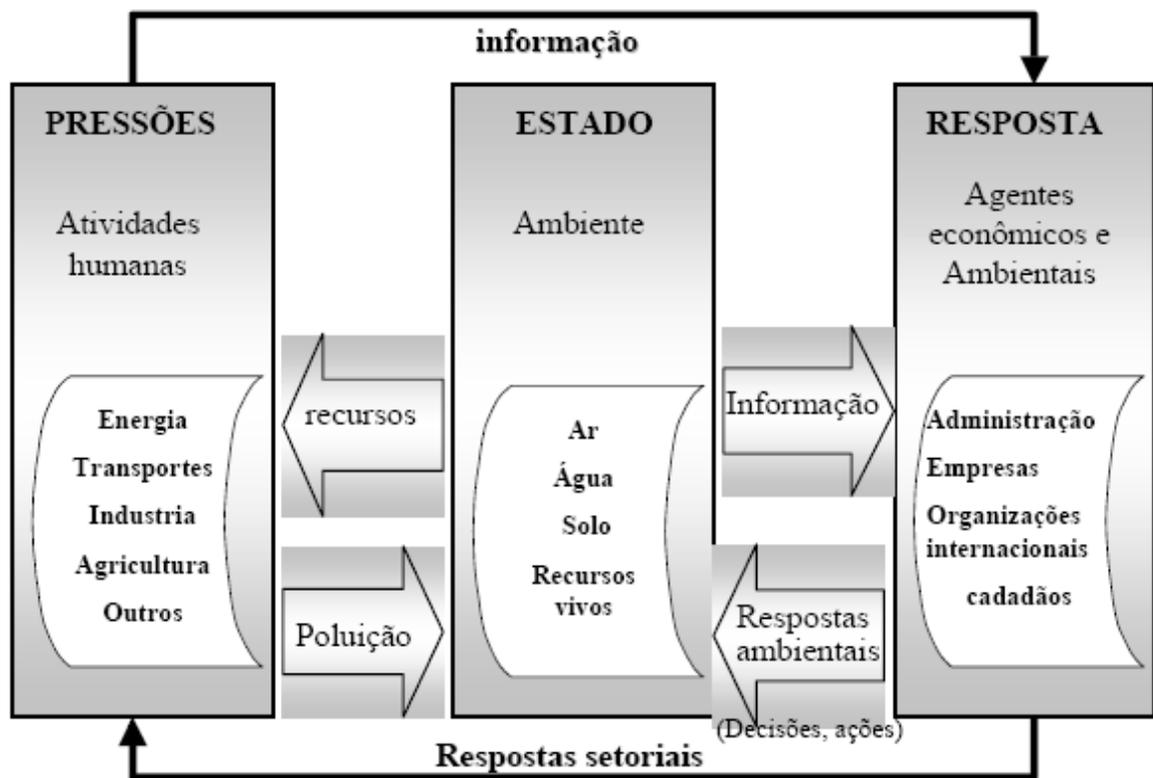


Figura 11: Modelo OCDE com relação entre os sistemas [29].

Em 1995, considerando a grande importância em se utilizar indicadores para tomada de decisões a CSD (Comissão on Sustainable Development) organizou um workshop com o título “Indicators for Sustainable Development for Decision Making” [29] que procurou chegar a um consenso entre o tema desenvolvimento sustentável e indicadores. O relatório final do workshop afirma que:

“A utilidade dos indicadores de sustentabilidade, como mencionado na Agenda 21, foi confirmada pelo Workshop. Os usos potenciais destes sistemas incluem o alerta aos tomadores de decisão para as questões prioritárias, orientação na formulação de políticas, simplificação e melhora na comunicação e promoção do entendimento sobre tendências-chave fornecendo a visão necessária para as iniciativas de ação nacional.”

Segundo Meadows [30] e Benneti [31], um indicador deve conter as seguintes características.

1. Ser significativo em relação à sustentabilidade do sistema;
2. Ser relevante politicamente;
3. Revelar tradução fiel e sintética da preocupação;

4. Permitir repetir as mensurações no tempo;
5. Prever a interação no tempo e no espaço de diferentes elementos da população, considerando aspectos históricos e condições atuais de diferentes comunidades;
6. Permitir um enfoque integrado, relacionando indicadores, e permitindo analisar essas relações;
7. Ter mensurabilidade (tempo e custo necessário, e viabilidade de efetuar a medida);
8. Ser replicáveis e verificáveis;
9. Ter claros princípios de base, assim como clara visão dos objetivos a serem alcançados;
10. Ser de fácil interpretação pelo seu usuário;
11. Ter uma metodologia de medida bem determinada e transparente;
12. Devem ser suplementares, ou seja, devem incluir elementos que as pessoas não possam medir por si próprias;
13. Devem ser condutores, ou seja, devem fornecer informações que conduzam à ação;
14. Devem ser hierárquicos, para que os usuários possam descer na pirâmide de informações se desejarem, mas ao mesmo tempo, transmitir a mensagem principal rapidamente;
15. Devem ser físicos, uma vez que a sustentabilidade está ligada em grande parte a problemas físicos, como água, poluentes, florestas, alimentos. É desejável, na medida do possível, que meça a sustentabilidade através de unidades físicas (toneladas de petróleo e não seu preço, expectativa de vida e não gastos com saúde);
16. Devem ser provocativos, levando à discussão, ao aprendizado e à mudança.

Quando se trata do conceito de indicadores, existem duas importantes correntes de pensamento sobre a formulação teórica dos indicadores.

A primeira corrente defende a ideia que para avaliar uma situação rumo ao desenvolvimento sustentável se faz necessária uma quantidade muito grande de indicadores, organizados dentro de uma estrutura lógica, mas partindo do princípio de que não é possível a redução em um número ou poucos grupos de números. Esta corrente se baseia em sistemas de indicadores para que os tomadores de decisão possam se apoiar para ter uma visão mais ampla do fenômeno estudado, mas que devem ser analisadas todas ao mesmo tempo.

A segunda vertente acredita que é possível condensar uma gama muito ampla de indicadores integrando-os em um ou poucos índices sintéticos, mediante o entendimento dos fenômenos associados às diversas dimensões da sustentabilidade. As etapas que compõem a construção de um indicador ou índice sintético podem ser observadas na figura 12 [32].



Figura 12: Etapas na construção de um indicador sintético [32].

Cada uma das etapas citadas acima, é composta por uma série de processos, onde podem ser aplicadas diferentes técnicas. Para a elaboração da metodologia proposta nesta dissertação, foram adotados processos de construção de um índice que serve como indicador de desenvolvimento sustentável. Para isso foram selecionados um conjunto de indicadores que representassem um dado critério, que no caso são grupos de indicadores que representem um recurso. Ao final de todo este processo, alcançando um índice final representando o Desenvolvimento Sustentável baseado no comportamento destes recursos.

Segundo Saltelli et. al. [33], existem argumentos favoráveis e contrários ao emprego de indicadores ou índices sintéticos:

- Indicadores sintéticos podem emitir mensagens políticas na direção equivocada ou não robusta, se são pobremente construídos ou mal interpretados. Análises de sensibilidade podem ser usadas para testar a robustez de indicadores sintéticos.
- A ‘grande representação’ mostrada como resultado de um indicador sintético pode convidar políticos a tomar decisões simplistas. Indicadores sintéticos poderiam ser usados em combinação com os sub indicadores para propiciar conclusões políticas mais sofisticadas.
- A construção de indicadores sintéticos envolve estágios nos quais julgamentos devem ser feitos: a seleção dos sub indicadores, escolha do modelo, ponderações dos indicadores e tratamento de

valores faltantes. Estes julgamentos devem ser transparentes e baseados em princípios estatísticos claros.

- Pode existir maior discordância entre 'Estados Membros' [referindo-se aos membros da União Europeia] com relação a indicadores sintéticos do que a indicadores individuais. A escolha dos indicadores individuais e de seus pesos pode se tornar alvo de disputa política.

- Indicadores sintéticos fazem crescer a quantidade necessária de dados porque são requeridos dados para cada um dos sub indicadores e para uma análise estatística significativa.

- Indicadores sintéticos podem ser usados para sumarizar questões complexas ou multidimensionais, com o intento de apoiar tomadores de decisão.

- Indicadores sintéticos fornecem uma grande representação. Podem ser mais fáceis de interpretar do que tentar encontrar uma tendência em muitos indicadores separados. Eles facilitam a tarefa de ordenar países segundo questões complexas.

- Indicadores sintéticos podem ajudar a atrair a atenção do público, fornecendo um número sumarizado com o qual se pode comparar o desempenho entre países e seus progressos do decorrer do tempo.

- Indicadores sintéticos podem ajudar a reduzir o tamanho de uma lista de indicadores ou incluir mais informação acerca de uma lista com um dado tamanho.

Com isso, para que este indicador seja capaz de mensurar algo como a sustentabilidade, os tomadores de decisão devem ter acesso a indicadores de qualidade, sejam eles um conjunto de indicadores ou um indicador sintético. Estes indicadores devem ser capazes de transmitir informações de fácil interpretação, capaz de antecipar aos problemas, mostrando caminhos para solucioná-los ou até evitar que estes problemas ocorram.

Um indicador é apenas uma medida, não um instrumento de previsão ou uma medida estatística definitiva, tampouco uma evidência de causalidade; ele apenas constata uma dada situação. As possíveis causas, consequências ou previsões que podem ser feitas são um exercício de abstração do observador, de acordo com o seu nível de conhecimento e seu entendimento do mundo que o cerca [34]. Sendo assim existem vantagens e desvantagens da utilização de indicadores para mensuração do

desenvolvimento sustentável, a tabela 1 mostra resumidamente as principais vantagens e limitações.

Tabela 1: Vantagens e limitações dos indicadores e índices de desenvolvimento sustentável [34].

| Vantagens | Limitações |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Avaliação dos níveis de DS; ➤ Capacidade de sintetizar a informação de caráter técnico / científico; ➤ Facilidade de transmitir a informação; ➤ Bom instrumento de apoio à decisão à aos processos de gestão ambiental; ➤ Sublinhar a existência de tendências; ➤ Possibilitar comparar padrões e/ou metas pré-definidas. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Inexistência de informações de base; ➤ Dificuldades na definição de expressões matemáticas que melhor traduzam os parâmetros selecionados; ➤ Perda de informação nos processos de agregação de dados; ➤ Diferentes critérios na definição dos limites de variação do índice em relação às imposições estabelecidas; ➤ Ausência de critérios robustos para a seleção de alguns indicadores; ➤ Dificuldades na aplicação em determinadas áreas como o ordenamento do território e paisagem. |

5.1.2 Lógica Fuzzy

Em meados da década de 60, o Prof. Zadeh, criador da lógica fuzzy, observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana [35].

A diferença básica entre a lógica clássica e a lógica nebulosa é que a lógica convencional trata conceitos como categorias discretas e a lógica nebulosa simultaneamente pode atribuir a um mesmo conceito diversos valores linguísticos com graus de certeza associados.

De forma mais objetiva e preliminar, podemos definir Lógica Nebulosa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma

linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação na linguagem computacional.

Nos sistemas Fuzzy o protocolo de raciocínio é um paradigma de processamento paralelo, onde todas as regras estabelecidas são disparadas.

5.1.2.1 Operações de conjuntos fuzzy

A lógica fuzzy é baseada nos conjuntos fuzzy, uma extensão da teoria dos conjuntos clássicos. Através das técnicas de lógica fuzzy um computador é capaz de processar palavras de linguagem natural traduzindo em saídas numéricas [36, 37].

Um conjunto fuzzy "A" pode ser escrito em pares ordenados como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2)$$

Existem muitas generalizações possíveis da teoria dos conjuntos clássicos. As mais utilizadas são as operações de conjunto fuzzy padrão. São três operações, Complemento Fuzzy, Intersecção Fuzzy e União Fuzzy.

$$\text{União: } \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (3)$$

$$\text{Intersecção: } \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (4)$$

$$\text{Complemento: } \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5)$$

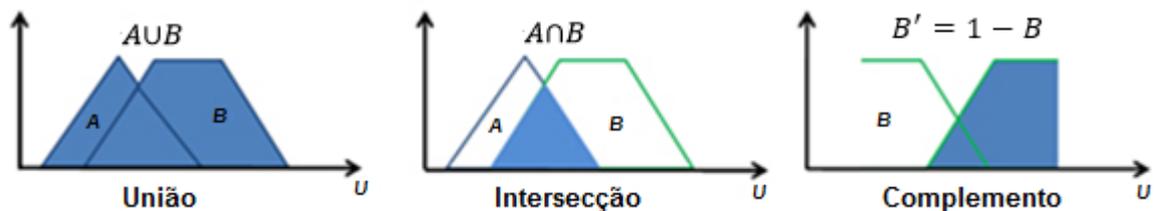


Figura 13: Operações de um conjunto [36].

Os conjuntos fuzzy são uma "ponte" no caminho de aproximar a lógica realizada por uma máquina do raciocínio humano.

5.1.2.2 Conceitos de α -nível

Um subconjunto fuzzy A de U é “formado” por elementos de U com uma certa hierarquia (ordem) que é traduzida através da classificação por graus. Um elemento x de U está em uma classe se seu grau de pertinência é maior que um determinado valor limiar ou nível $\alpha \in [0, 1]$ que define aquela classe [38].

Exemplo. Seja $U = \mathbb{R}$ o conjunto dos números reais, e A um subconjunto fuzzy de \mathbb{R} com a seguinte função de pertinência:

$$\varphi_A(x) \begin{cases} x - 1 & \text{se } 1 \leq x \leq 2 \\ 3 - x & \text{se } 2 < x < 3 \\ 0 & \text{se } x \notin [1,3] \end{cases} \quad (6)$$

Assim temos:

$$[A]^\alpha = [\alpha + 1, 3 - \alpha] \quad \text{para } 0 < \alpha \leq 1 \quad \text{e} \quad [A]^0 = \overline{]1,3[} = [1,3]. \quad (7)$$

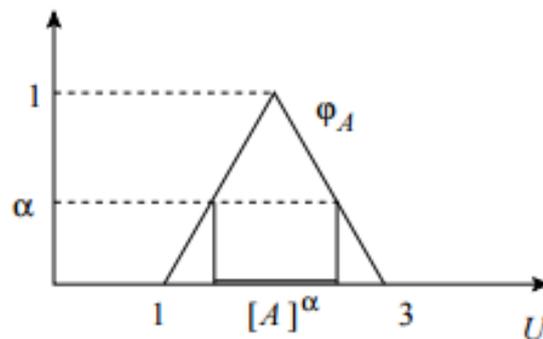


Figura 14: α -níveis: $[A]^\alpha$ e $[A]^0 \neq U$ [37].

5.1.2.3 Variáveis linguísticas

Variável linguística é um nome dado a um conjunto fuzzy. Por exemplo, a altura de uma pessoa pode assumir valores como: baixo, médio e alto.

5.1.2.4 Funções de pertinência

Função de pertinência é a curva que define como cada ponto em um universo de discurso é mapeado para um valor que represente o grau de pertinência desta entrada em um conjunto fuzzy, que pode assumir valores entre 0 e 1.

Cada elemento do conjunto difuso tem um grau de pertinência no intervalo [0, 1], dessa forma permitindo uma transição gradual, da pertinência nula para a pertinência máxima dentro de um conjunto fuzzy.

Sendo assim, o grau de pertinência de “x” em um conjunto fuzzy “A” pode ser expresso como:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1] \quad (8)$$

Onde μ_A é o grau de pertinência.

Existem diferentes tipos de funções de pertinência, as mais utilizadas são:

- a) Triangular
- b) Trapezoidal
- c) Gaussiana

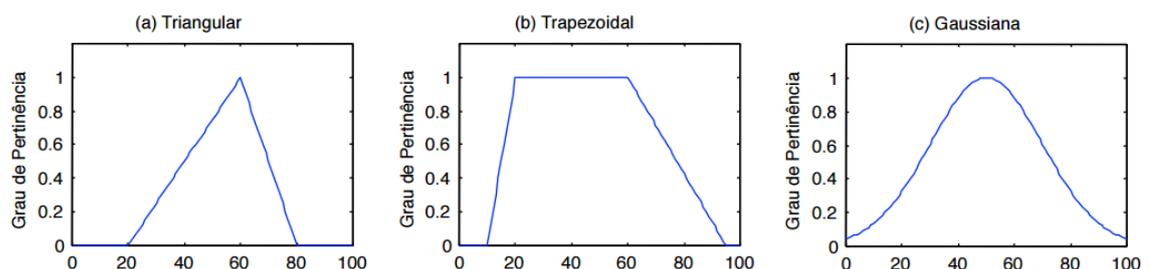


Figura 15: Tipos de funções de pertinência [36].

Como exemplo citado acima podemos criar um conjunto que represente a altura de uma pessoa, onde as variáveis de entrada, podem ser pertinentes aos conjuntos, baixo, médio ou alto, como representado na figura 16:

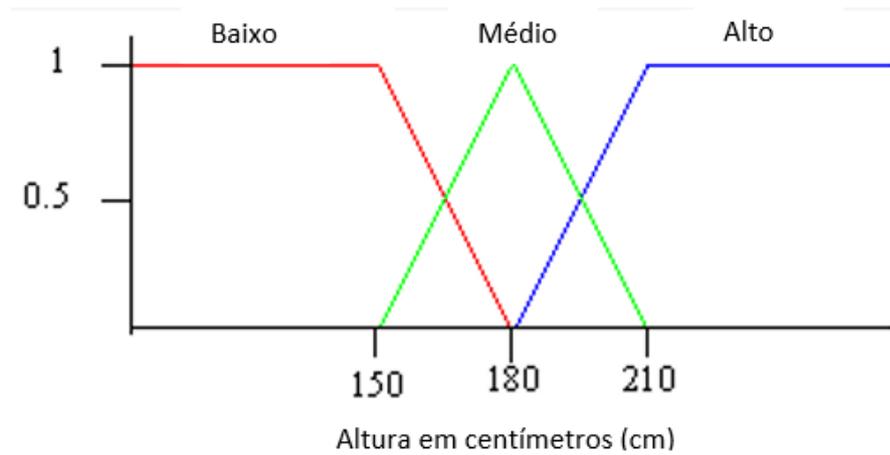


Figura 16: Conjunto fuzzy da altura de uma pessoa.

Para a construção deste conjunto fuzzy, foram utilizadas diferentes funções de pertinência, trapezoidal para os subconjuntos “Baixo” e “Alto” e triangular para “Médio”. Com isso uma pessoa com altura de exatamente 180 cm, como grau de pertinência para cada subconjunto, os seguintes valores: baixo (0), médio (1) e alto (0).

5.1.2.4.1 Função de pertinência triangular

Estas funções são caracterizadas pelo conjunto de valores (a, u, b) , onde a e b representam os pontos mínimos e máximos de pertinência a um conjunto.

Neste caso a função triangular é descrita da seguinte forma:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{u-a} & \text{se } a < x \leq u \\ \frac{x-b}{u-b} & \text{se } u < x < b \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (9)$$

A Figura 17 representa de maneira gráfica uma função de pertinência triangular apresentada pelo MATLAB.

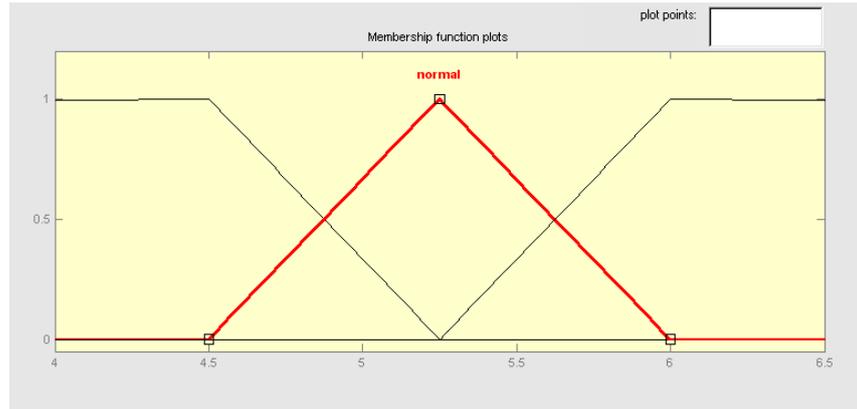


Figura 17: Função de pertinência triangular.

Os α -níveis desses números fuzzy tem a seguinte forma simplificada:

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = [(u - a)\alpha + a, (u - b)\alpha + b] \text{ para todo } \alpha \in [0, 1] \quad (10)$$

Lembrando que um número fuzzy triangular não tem que ser obrigatoriamente simétrico, já que $b - u$ pode ser diferente de $u - a$, porém, $\varphi_A(u) = 1$.

5.1.2.4.2 Função de pertinência trapezoidal

As funções trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores (a, b, c, d) onde a e d representam o intervalo onde a função de pertinência assume valor diferente de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função é máxima e igual a 1. Como expresso na equação 11.

$$\mu_a(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x < b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (11)$$

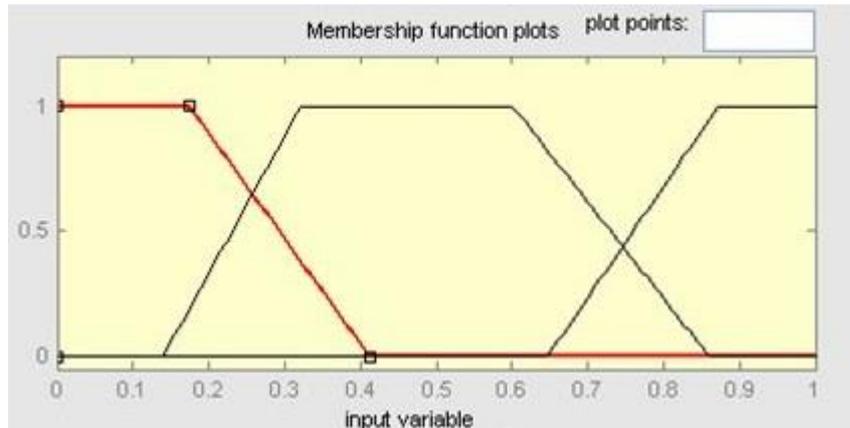


Figura 18: Função de pertinência trapezoidal.

Os α -níveis desses números fuzzy trapezoidal tem a seguinte forma simplificada:

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = [(b - a)\alpha + a, (d - c)\alpha + d] \text{ para todo } \alpha \in [0,1] \quad (12)$$

5.1.2.4.3 Função de pertinência gaussiana

Esta função é caracterizada pela média (μ) e desvio padrão (σ). Permite uma queda da pertinência mais suave e assume valores diferente de zero para todo o domínio da variável de entrada, com isso cada função deverá apresentar sua média e desvio padrão próprios. Esta função é determinada como:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ está fora do domínio} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} & \end{cases} \quad (13)$$

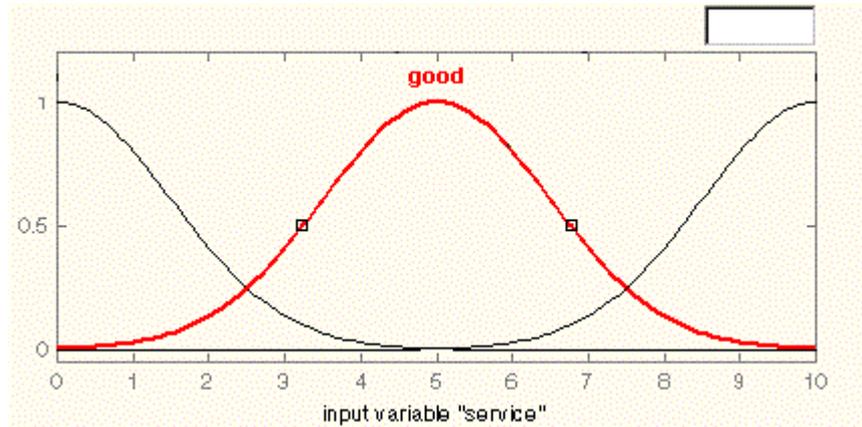


Figura 19: Função de pertinência gaussiana.

Os α -níveis desses números fuzzy tem a seguinte forma simplificada.

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = \left[u - \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha^\alpha}\right)}, u + \sqrt{\ln\frac{1}{\alpha^\alpha}} \right] \quad (14)$$

5.1.2.5 Etapas da Arquitetura Fuzzy

A Figura 20 apresenta as etapas que compreendem o processo de raciocínio Fuzzy ou arquitetura fuzzy.

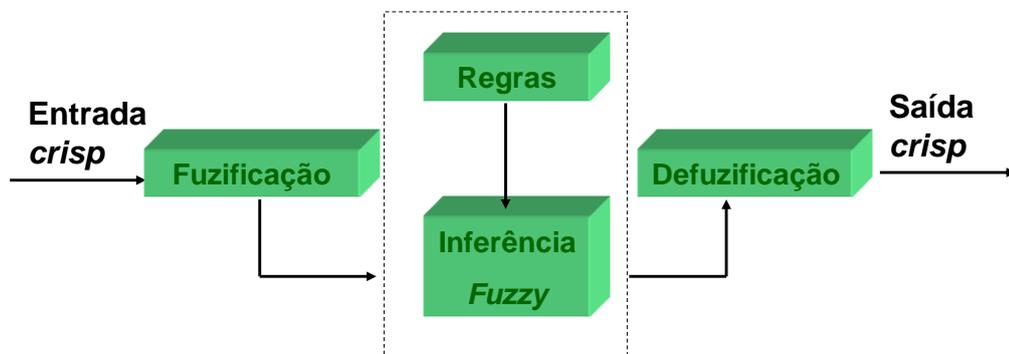


Figura 20: Etapas do Raciocínio Fuzzy.

Fuzzificação: compreende a etapa na qual as variáveis linguísticas (variáveis de entrada) são definidas de forma subjetiva, bem como as funções membro (funções de pertinência). Esta fase do processo engloba:

- i) Análise do problema;
- ii) Definição das variáveis;
- iii) Definição das funções de pertinência (triangular, trapezoidal, etc);
- iv) Criação das regiões.

A figura 21 representa um exemplo de fuzzificação de uma variável de entrada usando uma função de pertinência triangular.

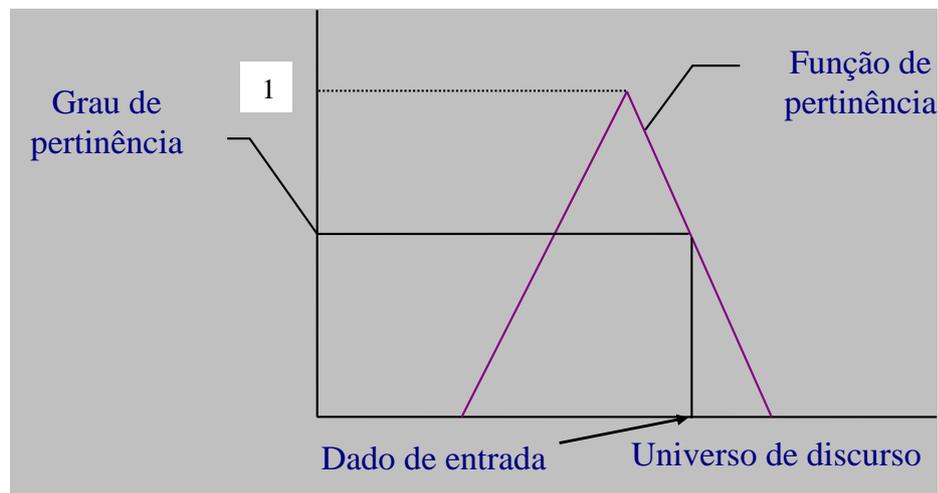


Figura 21: Exemplo de fuzzificação de uma variável de entrada.

Inferência: é a etapa na qual as proposições (regras) são definidas e depois são examinadas paralelamente. O dispositivo de inferência é um algoritmo que consiste no tratamento computacional de um conjunto de “regras” que representam o conhecimento de um especialista.

Esta fase engloba:

- i) Definição das proposições;
- ii) Análise das regras: a base de regras constitui um conjunto de regras linguísticas com a função de obter um objetivo atrelado a um determinado fato;
- iii) Criação da região resultante.

Base de Regras: Dentro do processo de inferência o mecanismo chave do modelo fuzzy é a proposição, que é o relacionamento entre as variáveis do modelo e as regiões fuzzy. Na definição das proposições, deve-se trabalhar com:

- a) Proposições condicionais: Se W é Z então X é Y;
- b) Proposições não condicionais: X é Y.

A agregação calcula a importância de uma determinada regra para a situação corrente e a composição calcula a influência de cada regra nas variáveis de saída.

As descrições linguísticas informais utilizadas pelo ser humano (especialista) no dia a dia é o ponto de partida para o desenvolvimento das regras de inferência. Cada regra é uma proposição condicional nebulosa com uma ou mais cláusulas.

Defuzzificação: a terceira etapa do processo, onde as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema. Esta etapa corresponde à ligação funcional entre as regiões fuzzy e o valor esperado.

Os métodos de defuzzificação mais utilizados são:

- Método da média dos máximos, o qual gera uma ação de controle que representa o valor médio de todas as ações de controle individuais cujas funções de pertinência assumem o valor máximo.
- Método do centro de gravidade, apresentado na Figura 22, a ação de controle numérica é calculada obtendo-se o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da ação de controle global.

$$U = \frac{\int_{Min}^{Max} u\mu(u)du}{\int_{Min}^{Max} \mu(u)du} \quad (15)$$

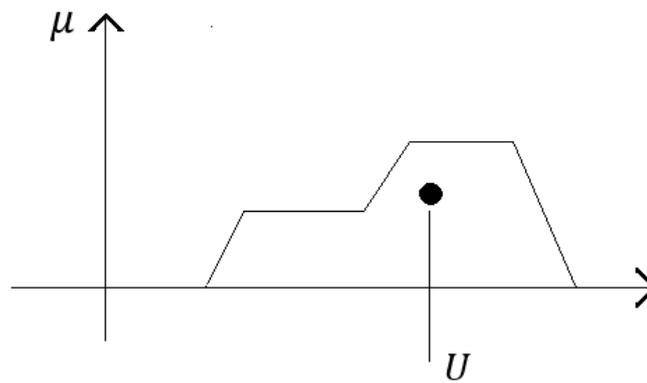


Figura 22: Método centroide ou centro de gravidade.

A Figura 23 apresenta de forma sintetizada as etapas da arquitetura fuzzy, considerando duas entradas, duas regras e uma saída, com defuzzificação por método centróide.

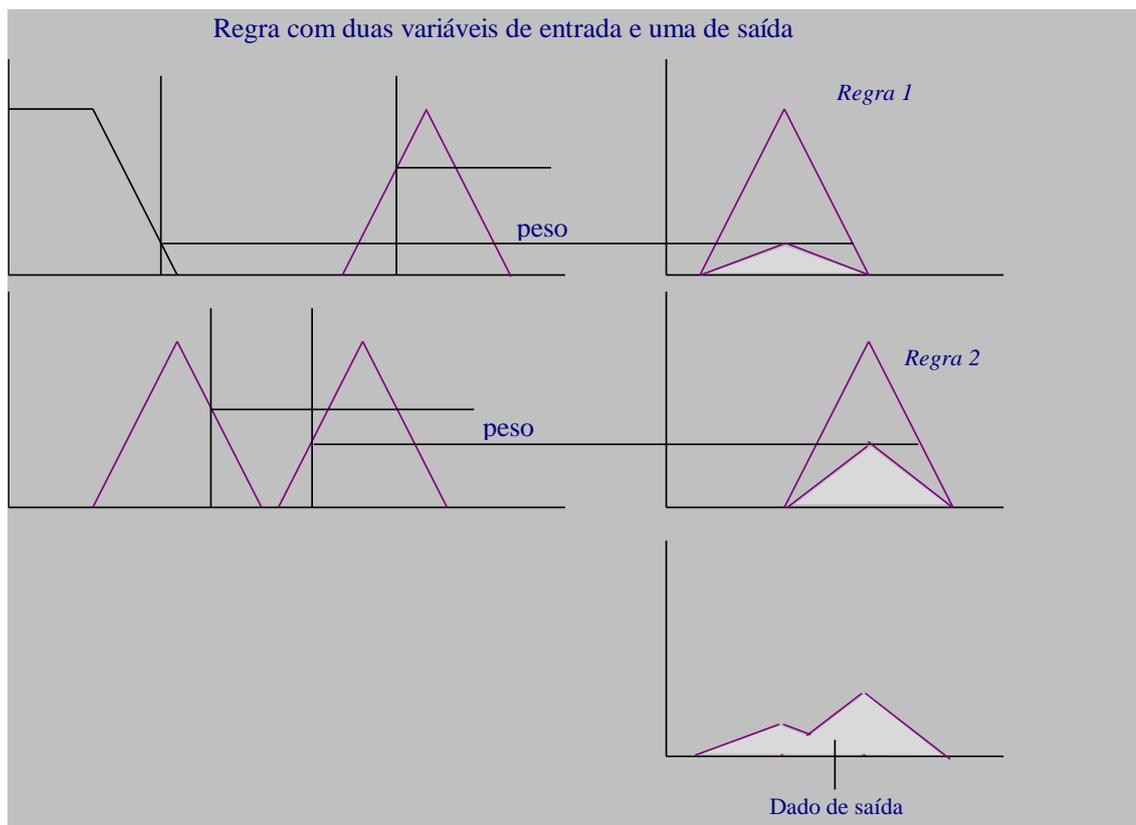


Figura 23: Diagrama com as etapas da arquitetura fuzzy.

5.1.3 Modelagem

Para a elaboração desta ferramenta foram selecionados indicadores relacionados aos recursos que representam as variáveis de entrada do sistema especialista sendo apresentados genericamente como três variáveis para cada recurso, ou seja, CLIMA, indicadores IC1, IC2 e IC3; ÁGUA, indicadores IA1, IA2 e IA3; SOLO, indicadores IS1, IS2 e IS3 e por último ENERGIA, indicadores IE1, IE2 e IE3.

A modelagem fuzzy de 1ª ordem irá gerar na saída indicadores correspondentes a cada grupo de variáveis, ou seja IC, IA, IS e IE. A Figura 24 apresenta a arquitetura proposta para a modelagem.

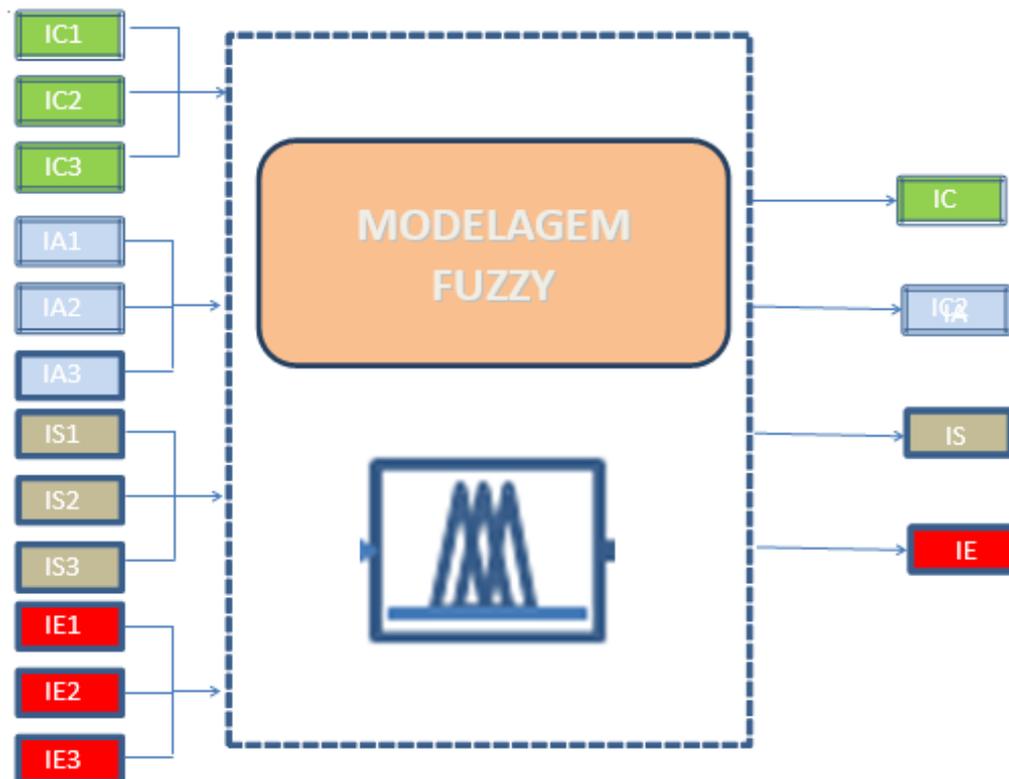


Figura 24: Arquitetura da modelagem fuzzy de 1ª ordem.

A última etapa, modelagem fuzzy de segunda ordem, constitui o resultado de todo processamento e correlação das variáveis IC, IA, IS e IE, traduzido em um índice hipotético, denominado Icase.



Figura 25: Arquitetura da modelagem fuzzy de 2ª ordem.

5.2 Base de dados

A base de dados utilizada no desenvolvimento do projeto é composta por indicadores que representam um ou mais recursos, considerando uma distribuição temporal relativa e necessária para a investigação de resultados e comportamentos.

Esses dados fornecem informações sobre uso dos recursos naturais, qualidade ambiental, satisfação das necessidades humanas, qualidade de vida e justiça social, desempenho macroeconômico e financeiro, uso de energia, bem como sobre a capacidade e os esforços institucionais realizados com vistas às mudanças necessárias para a implementação do desenvolvimento sustentável.

Essas informações são valiosas para a compreensão dos temas relevantes para o desenvolvimento do País, permitindo estabelecer comparações, conhecer a orientação e o ritmo de seus vários elementos, bem como fazer uma apreciação integrada de diferentes enfoques e dimensões, fundamental à adequada formulação e avaliação de políticas na perspectiva do desenvolvimento sustentável.

Os indicadores que compõem as variáveis de entrada (modelagem fuzzy 1ª ordem) dos grupos que serão analisados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Relação de indicadores selecionados.

| RECURSOS | INDICADORES – VARIÁVEIS DE ENTRADA |
|----------------|---|
| CLIMA | IC1: Emissões de gases de efeito estufa IC2: Consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio IC3: Focos de queimadas |
| ÁGUA | IA1: Número de domicílios com acesso a abastecimento de água IA2: Produção de pescado marítima e continental IA3: Volume útil dos principais reservatórios |
| SOLO | IS1: Área plantada com cana de açúcar IS2: Desflorestamento bruto anual na Amazônia Legal IS3: Quantidade comercializada de fertilizantes |
| ENERGIA | IE1: Participação de fontes renováveis na oferta total de energia IE2: Intensidade energética IE3: Consumo de energia per capita |

5.2.1 Normalização de dados

Para que todos os dados de entrada fossem mapeados com a mesma grandeza, foi aplicada a técnica de normalização de dados max-min equalizado, que utiliza os valores máximo e mínimo para normalizar linearmente os dados entre 0 e 1, como mostra a equação 16.

$$x' \text{ (normalizado)} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (16)$$

Onde, $\min(x)$ é o menor valor registrado na base de dados, $\max(x)$ o maior e x' o valor de saída normalizado.

5.2.2 Clima

A questão ambiental e climática é a somatória de todos esses processos aglutinando a interdependência desses recursos, apresentando como resultado o desequilíbrio com previsão de aumento da temperatura global da ordem de 4° C até 2080, devido emissões antropogênicas resultante da produção e uso da energia, impactos da produção agrícola com o uso do solo e demanda pelo uso da água.

Os indicadores que foram selecionados para compor a análise do recurso clima são:

a. Emissões de gases de efeito estufa (IC1)

Este indicador representa a quantidade estimada anual de emissões de gases de efeito estufa. Os dados foram coletados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e estão disponíveis no site: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/347281.html> [39]. Os valores de emissões por gases (CO₂, N₂O e CH₄) estão apresentados por setor.

A Tabela 3 nos mostra os dados coletados e normalizados que foram utilizados como entrada no sistema.

Tabela 3: Dados normalizados de emissões de gases de efeito estufa.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,658 | 0,670 | 0,838 | 0,868 | 1,000 | 0,618 | 0,415 | 0,309 | 0,388 | 0,000 | 0,018 |

b. Consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio (IC2)

O segundo indicador selecionado para representar o recurso Clima foi, consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio. Os dados foram medidos em toneladas PDO, que é igual a uma tonelada de Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (1t de CFC-11 ou CFC-12) [40].

Tabela 4: Dados normalizados de consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 1,000 | 0,627 | 0,280 | 0,334 | 0,203 | 0,087 | 0,020 | 0,030 | 0,009 | 0,026 | 0,000 |

c. Focos de queimadas (IC3)

As informações sobre focos de queimadas, trazem o número total de focos ativos detectados em cada mês, no período de 1998 até 2015 [41]. Os dados são atualizados diariamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e são disponibilizados no Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios: <http://www.inpe.br/queimadas>.

Tabela 5: Dados normalizado de focos de queimadas.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,000 | 0,298 | 0,899 | 0,740 | 0,887 | 0,840 | 0,107 | 0,865 | 0,147 | 0,147 | 1,000 |

A figura 26 mostra o comportamento de cada um dos três indicadores que compõe o “recurso” do Clima.

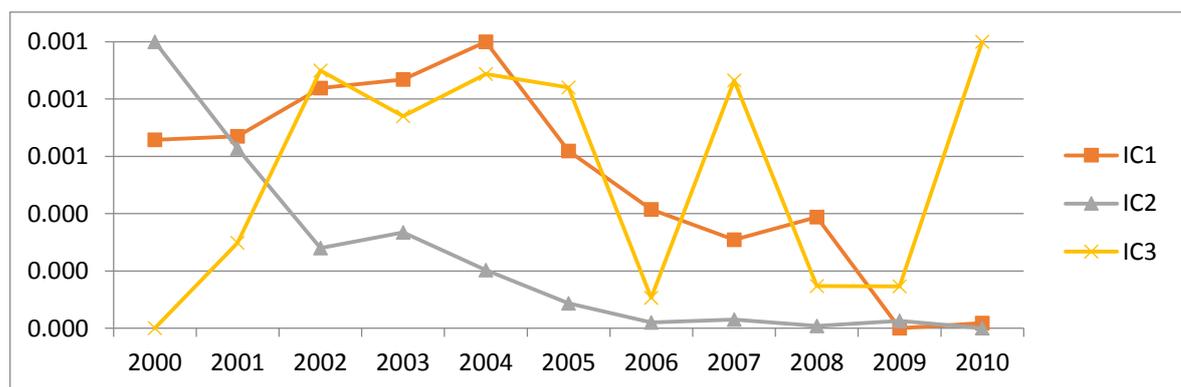


Figura 26: Comportamento dos indicadores do “recurso” Clima.

5.2.3 Água

Atualmente quase 1 bilhão de pessoas não tem acesso a água potável sendo 2,5 bilhões sem acesso a saneamento básico. O processo de dessalinização tem tido um papel importante como recurso à água potável e utilização da água na agricultura.

No mundo cerca de 65 milhões m³ de água são dessalinizados por dia (~0,6% da oferta global). A interdependência da água com energia é notória, como exemplo o próprio processo de dessalinização, ou, refrigeração das usinas térmicas, interferência do fluxo de água dos rios nas usinas hidroelétricas, assim como a necessidade para as atividades de outras energias de processamento como refino de petróleo ou produtos de fabricação de combustíveis sintéticos.

Os indicadores que foram selecionados para compor a análise do recurso água são:

a. Número de domicílios com acesso a abastecimento de água (IA1)

Este indicador mostra a quantidade de domicílios com acesso a abastecimento de água no Brasil [42]. Estes dados foram obtidos através do Sistema de Informação da Atenção Básica – SIAB, disponibilizado pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde – DATASUS. Estes dados estão disponíveis no site: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?siab/cnv/SIABCbr.def>.

Tabela 6: Dados normalizados do número de domicílios com acesso a abastecimento de água.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,000 | 0,206 | 0,336 | 0,442 | 0,518 | 0,609 | 0,709 | 0,751 | 0,824 | 0,858 | 1,000 |

b. Produção de pescado marítima e continental (IA2)

Apresenta o volume de produção de pescado por modalidade, em um determinado território e período de tempo [43, 44]. Estes dados estão disponíveis em duas fontes, de 1994 a 2010 na publicação Indicadores de desenvolvimento sustentável - IDS 2010 publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e de 2008 a 2010 no Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura de 2010, publicado pelo Ministério da Pesca e Agricultura - MPA.

Tabela 7: Dados normalizados da produção de pescado marítima e continental.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,000 | 0,229 | 0,388 | 0,349 | 0,409 | 0,393 | 0,492 | 0,543 | 0,743 | 0,943 | 1,000 |

c. Volume útil dos principais reservatórios (IA3)

O último indicador selecionado para representar o recurso água foi o Volume útil dos principais reservatórios [45]. Os analisados foram, Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimbondo, Água Vermelha, Emborcação, Nova Ponte, Itumbiara, São Simão, Ilha Solteira, Barra Bonita, Promissão, Três Irmão, Jurumirim, Chavantes, Capivara, Governador Bento de Munhoz, Salto Santiago, Três Marias, Sobradinho, Luiz Gonzaga, Serra da Mesa, Tucuruí. Estes dados foram coletados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS e estão disponíveis no site: http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx.

Tabela 8: Dados normalizados do volume útil dos principais reservatórios.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,144 | 0,000 | 0,605 | 0,563 | 0,960 | 1,000 | 0,607 | 0,896 | 0,739 | 0,991 | 0,761 |

A figura 27 mostra o comportamento de cada um dos três indicadores que compõe o recurso que representa a utilização da Água.

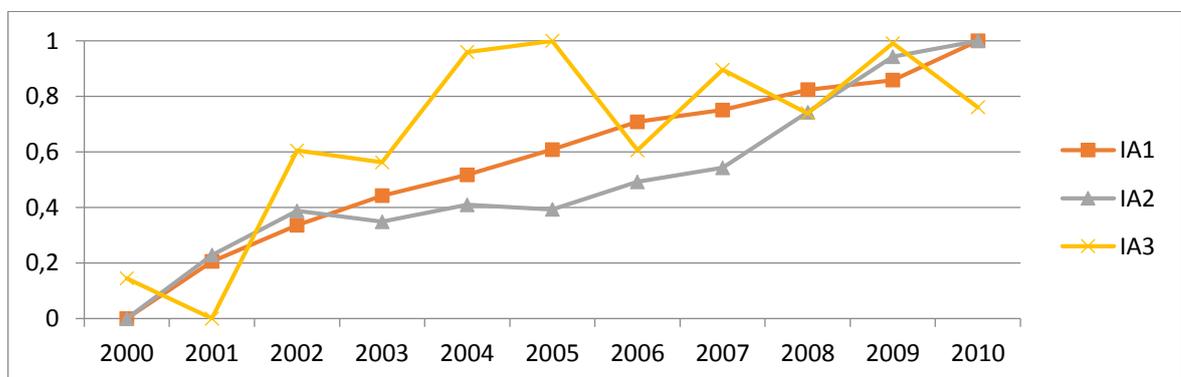


Figura 27: Comportamento dos indicadores do recurso Água.

5.2.4 Solo

Atualmente aproximadamente 1 bilhão de pessoas sofrem com o problema de desnutrição e fome. A produção agrícola por hectare é ineficiente, sem considerar desperdícios de energia e água no processo de irrigação estimulados por políticas falsas de incentivos.

A relação uso do solo como produção agrícola tem um embate direto com a produção de energia, como exemplo, biomassa e biocombustíveis, na ocupação do solo em detrimento da produção de alimento.

Os indicadores que foram selecionados para compor a análise do recurso solo são:

a. Área plantada com cana de açúcar (IS1)

Este indicador mede a área, em hectares, utilizada para a produção de cana de açúcar no Brasil. Os dados foram elaborados pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA, baseado em informações do IBGE [46].

Tabela 9: Dados normalizados da área plantada com cana de açúcar.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,000 | 0,033 | 0,076 | 0,116 | 0,176 | 0,218 | 0,353 | 0,515 | 0,777 | 0,926 | 1,000 |

b. Desflorestamento bruto anual na Amazônia legal (IS2)

Os dados sobre desflorestamento bruto da Amazônia legal, é um dos indicadores selecionados para compor o recurso do Uso do Solo, e são coletados através de satélites e publicados pelo INPE [47].

Tabela 10: Dados normalizados do desflorestamento bruto anual da Amazônia legal.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,540 | 0,538 | 0,705 | 0,886 | 1,000 | 0,578 | 0,351 | 0,224 | 0,285 | 0,022 | 0,000 |

c. Quantidade comercializada de fertilizantes (IS3)

A informação sobre a quantidade de fertilizante comercializada no Brasil é disponibilizada pelo IBGE na publicação IDS 2010, onde apresenta estes dados no período de 1992 até 2010, separando a comercialização de fertilizantes dividindo em 3 três categorias de acordo com seu tipo de nutriente, Nitrogênio (N), Fósforo (P2O5) e Potássio (K2O) em kg/há (Quilogramas por Hectares) [48].

Tabela 11: Dados normalizados da quantidade comercializada de fertilizantes.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,000 | 0,150 | 0,379 | 0,879 | 0,593 | 0,086 | 0,322 | 1,000 | 0,381 | 0,235 | 0,671 |

O comportamento de cada um dos três indicadores que compõe o recurso do Uso do Solo estão dispostos na figura 28.

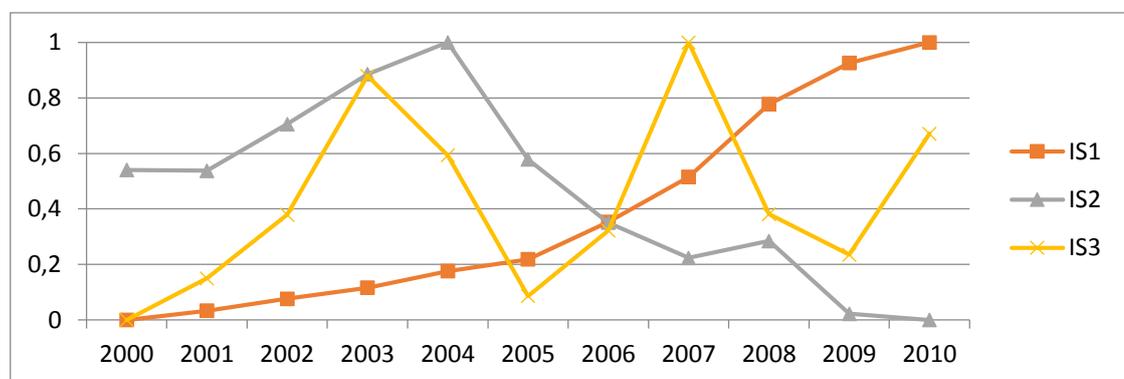


Figura 28: Comportamento dos indicadores do recurso Solo.

5.2.5 Energia

A segurança energética se destaca como um dos principais desafios do século XXI. Expectativas seguindo padrões históricos do uso de energia, impulsionados pelo desenvolvimento econômico, projetam um crescimento de três vezes o balanço

oferta/demanda do ano de 2000 para o ano de 2050, necessitando medidas extraordinárias tanto na produção da energia como na eficiência energética.

Dados mostram que 1,4 bilhão de pessoas não tem acesso a eletricidade, 3 bilhões não têm acesso ao uso de combustíveis “modernos” ou tecnologias como exemplo, para cocção, aquecimento domiciliar, refrigeração, iluminação, bombeamento de água, etc. Para algumas populações, as formas tradicionais de biomassa servem como principal fonte de energia, trazendo graves impactos na saúde e implicações ambientais com o exemplo o desmatamento.

Portanto a questão energética está vinculada a questão hidrológica assim como o uso do solo, que por consequência impactam nas questões climáticas, principalmente quando se considera a utilização de combustíveis fósseis através das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os indicadores que foram selecionados para compor a análise do recurso energia são:

a. Participação de fontes renováveis na oferta total de energia (IE1)

O indicador expressa a participação das fontes renováveis na oferta total interna de energia, no período de 1992 até 2010, e foram disponibilizadas pelo IBGE na publicação Indicadores de Desenvolvimento Sustentável de 2012 [49].

Tabela 12: Dados normalizados da participação de fontes renováveis na oferta total de energia.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,199 | 0,000 | 0,218 | 0,526 | 0,545 | 0,654 | 0,708 | 0,818 | 0,836 | 1,000 | 0,799 |

b. Intensidade energética (IE2)

Este indicador representa a Intensidade Energética do país, que é a eficiência no consumo final de energia. O indicador é constituído pela razão entre o consumo final de energia e o PIB nacional. Para se chegar a este número do consumo final de energia no Brasil, foi feita a conversão da energia elétrica de quilowatt-hora (kWh) para toneladas equivalentes de petróleo (tep), para isso foi usado o equivalente calórico (1 kWh = 860 kcal) como fator de conversão, segundo o primeiro princípio da termodinâmica [50].

Tabela 13: Dados normalizados da intensidade energética.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,750 | 0,500 | 0,750 | 1,000 | 0,875 | 0,625 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,000 | 0,250 |

c. Consumo de energia per capita (IE3)

Este indicador nos mostra o consumo final anual de energia por habitante. No Brasil, este indicador acompanha o crescimento do Produto Interno Bruto, já que o consumo de energia costuma ser associado ao grau de desenvolvimento de um país [51], como mostra a figura 29.

Tabela 14: Dados normalizados do consumo de energia per capita.

| Ano | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valores Normalizado | 0,350 | 0,000 | 0,076 | 0,101 | 0,250 | 0,300 | 0,400 | 0,600 | 0,775 | 0,625 | 1,000 |

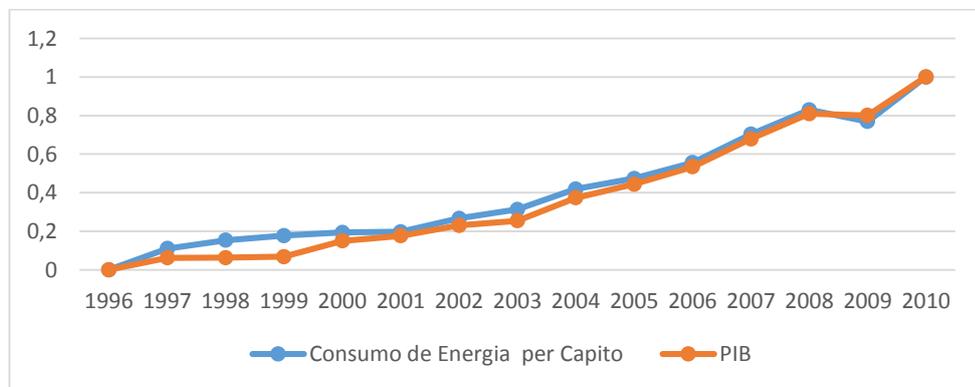


Figura 29: Consumo de energia per capita X produto interno bruto.

Os dados coletados foram elaborados e disponibilizados pelo Instituto brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e publicados no IDS 2012.

Os dados referentes aos três indicadores que compõe o recurso Energia estão apresentados na figura 30.

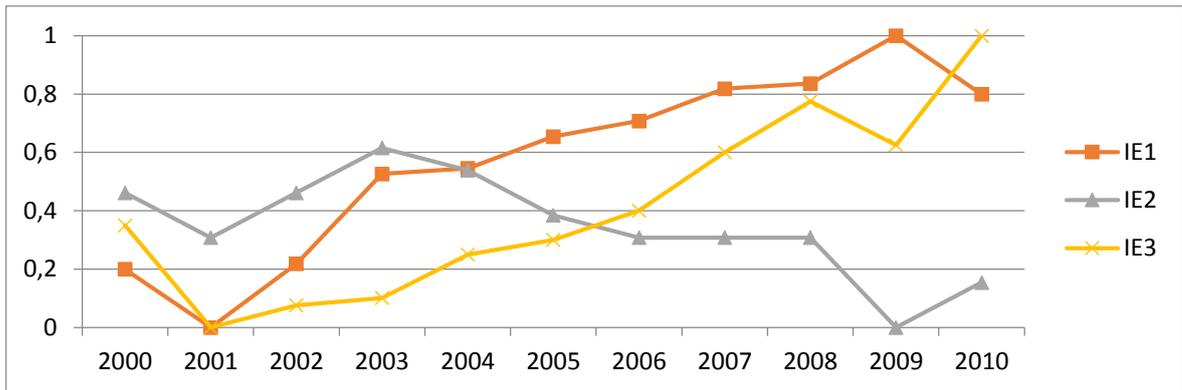


Figura 30: Comportamento dos indicadores do recurso Energia.

5.3 Plataforma Computacional

Este trabalho foi desenvolvido utilizando a plataforma de linguagem MATLAB, fazendo uso do pacote FUZZY LOGIC TOOLBOX, da MathWorks, sobre licença disponível aos usuários do CEN - Centro de Engenharia Nuclear do IPEN.

6 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ANÁLISE

A construção da arquitetura fuzzy para a criação desta ferramenta utilizou quatro conjuntos distintos que representam cada um dos quatro recursos que serão analisados, cada um composto por três variáveis que estão relacionadas com cada recurso, Clima, Água, Uso do Solo e Energia.

Inicialmente foram pesquisadas variáveis que representassem um dos recursos e que também estivessem relacionadas direta e indiretamente com mais de um recurso, mas muitas barreiras foram encontradas no que diz respeito à disponibilidade e acesso a estes dados.

Os dados com menor disponibilidade estão relacionados a água, uma vez que cada região do país é responsável pela gestão e divulgação de dados referentes a sua área. Com isso não foi possível incluir dados com maior correlação com os outros recursos.

6.1 Etapas da arquitetura fuzzy para o índice “CASE”

A criação da arquitetura fuzzy foi dividida em três etapas:

Primeira etapa – Fuzzificação dos dados

A fuzzificação é a modelagem das informações das variáveis de entrada através de conjuntos fuzzy, é nesta etapa onde as variáveis linguísticas são definidas, assim como a função de pertinência das mesmas com o conjunto a ser analisado.

Inicialmente foram definidos três subconjuntos para cada variável, sendo eles Baixo, Médio e Alto. Os resultados da modelagem com este número de subconjuntos se mostrou pouco confiável, uma vez que entradas com grande diferença retornavam resultados similares.

Partindo deste ponto, foram criados novos conjuntos, compostos por cinco subconjuntos, Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto, aprimorando significativamente a análise, atingindo o objetivo esperado através de uma maior sensibilidade no comportamento dos resultados.

Todas as variáveis de entrada contêm uma distribuição temporal de 2000 até 2010, sendo o suficiente para explicar o comportamento dos dados analisados. Estes dados foram normalizados para que todas as entradas tenham um valor numérico entre 0 e 1 onde zero é o menor valor registrado no período e 1 o maior, com isso todos estes dados foram mapeados pelo sistema fuzzy com a mesma grandeza.

A figura 31, apresenta as funções de pertinência criadas para a modelagem fuzzy de primeira ordem do recurso energia.

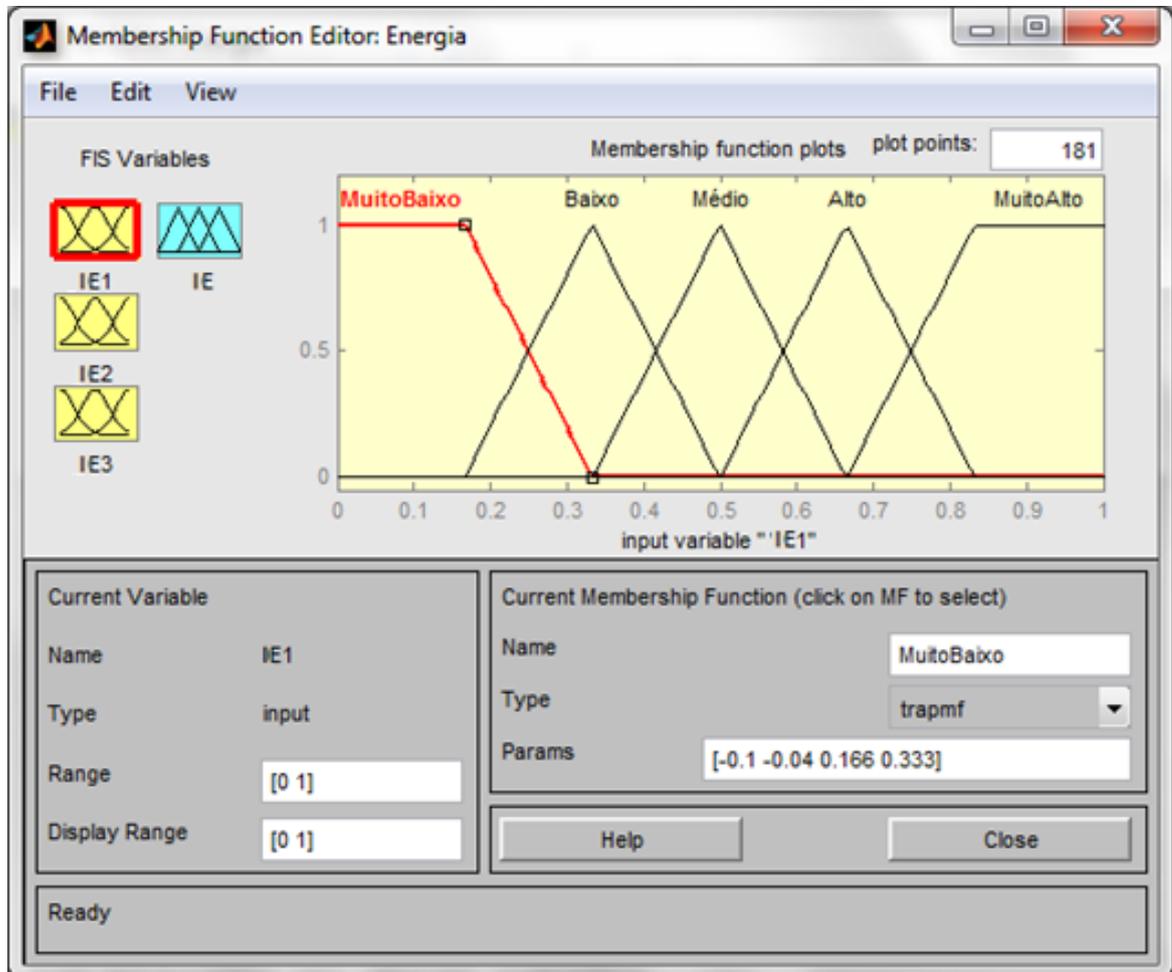


Figura 31: Funções de pertinência na fuzzificação dos dados.

Na função representada anteriormente na figura 15, o eixo y é o grau de pertinência respectivo à função de pertinência da entrada com o conjunto analisado e o eixo x, o universo de discurso. Este foi dividido igualmente, garantindo que cada subconjunto ou “estado” das variáveis tivessem a mesma área de abrangência. Para os estados, Muito Baixo e Muito Alto, foram definidas funções de pertinência trapezoidal e para os demais triangular.

A figura 32 mostra uma modelagem fuzzy de primeira ordem completa onde as variáveis do recurso energia denominadas IE1, IE2 e IE3, são inseridas no sistema e mapeadas em uma saída IE, que irá compor a modelagem de segunda ordem representando o recurso Energia.

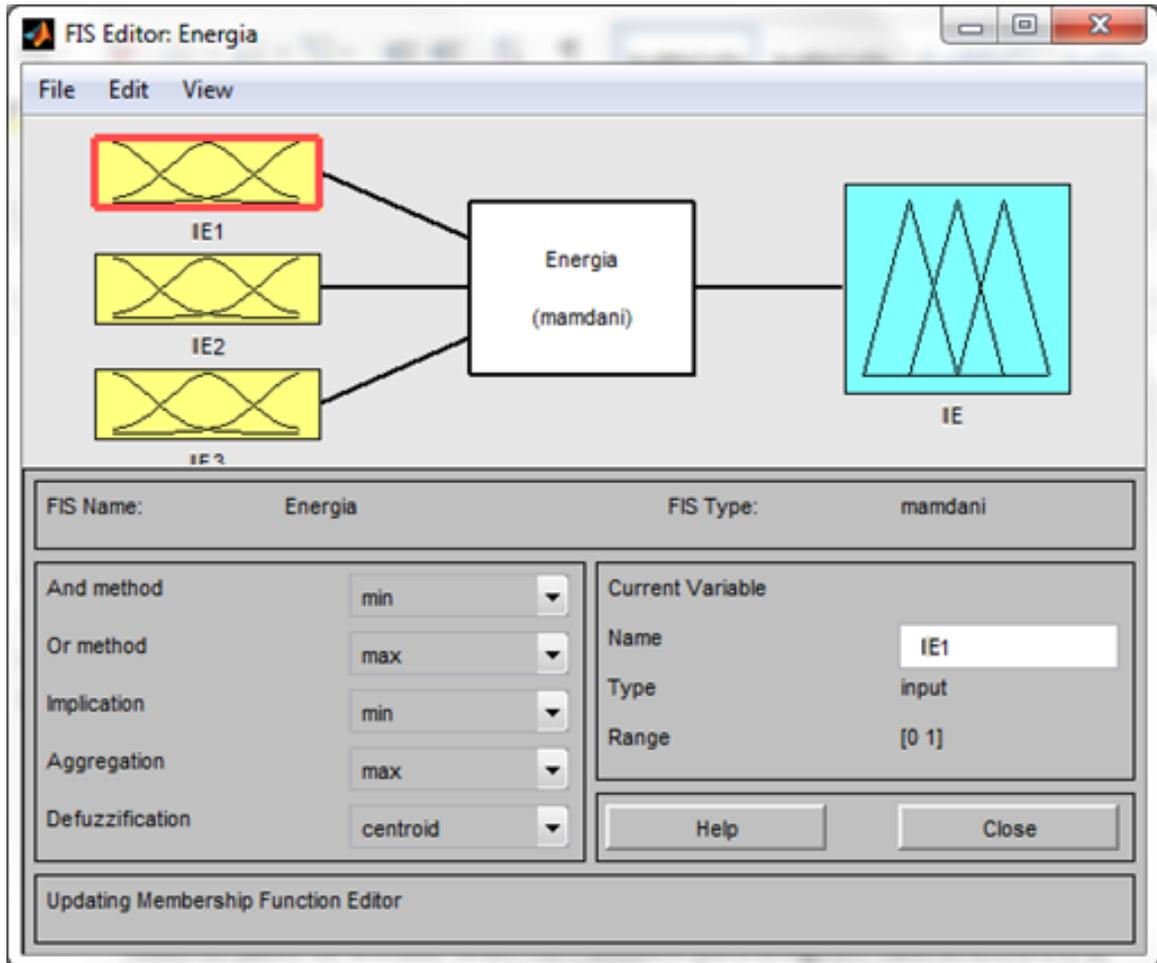


Figura 32: Modelagem fuzzy do recurso energia.

Segunda etapa – Regras e Inferências

A lógica fuzzy permite modelar as variáveis de entrada representando o pensamento de um especialista através de regras previamente estabelecidas. É nesta etapa onde este processo é construído.

Na definição destas regras é possível aplicar pesos diferentes para cada uma, o que não foi aplicado neste projeto, uma vez que esta pesquisa busca a neutralidade dos resultados, não partindo de nenhum princípio, político, social ou ambiental, obtendo assim resultados totalmente imparciais, onde serão consideradas somente o comportamento dos dados e suas interações.

Para a elaboração das regras referente a modelagem de primeira ordem, foi necessário a criação de 125 regras para cada um dos quatro recursos (Clima, Água, Solo e Energia) e seus respectivos indicadores, conforme tabela 2.

Na elaboração das regras da modelagem de segunda ordem foi necessário a criação de 625 regras para que todas as possibilidades de interação fossem representadas, uma vez que o número de variáveis de entrada na modelagem de segunda ordem são quatro (IC, IA, IS e IE), conforme figura 25. Estas regras consistem na associação de todas as combinações de estados das variáveis com um estado no conjunto de saída, que também é composto por cinco subconjuntos representados pelas variáveis linguísticas, Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto.

A figura 33 apresenta de forma simplificada, a interface do Tool Box, onde estas regras são relacionadas.

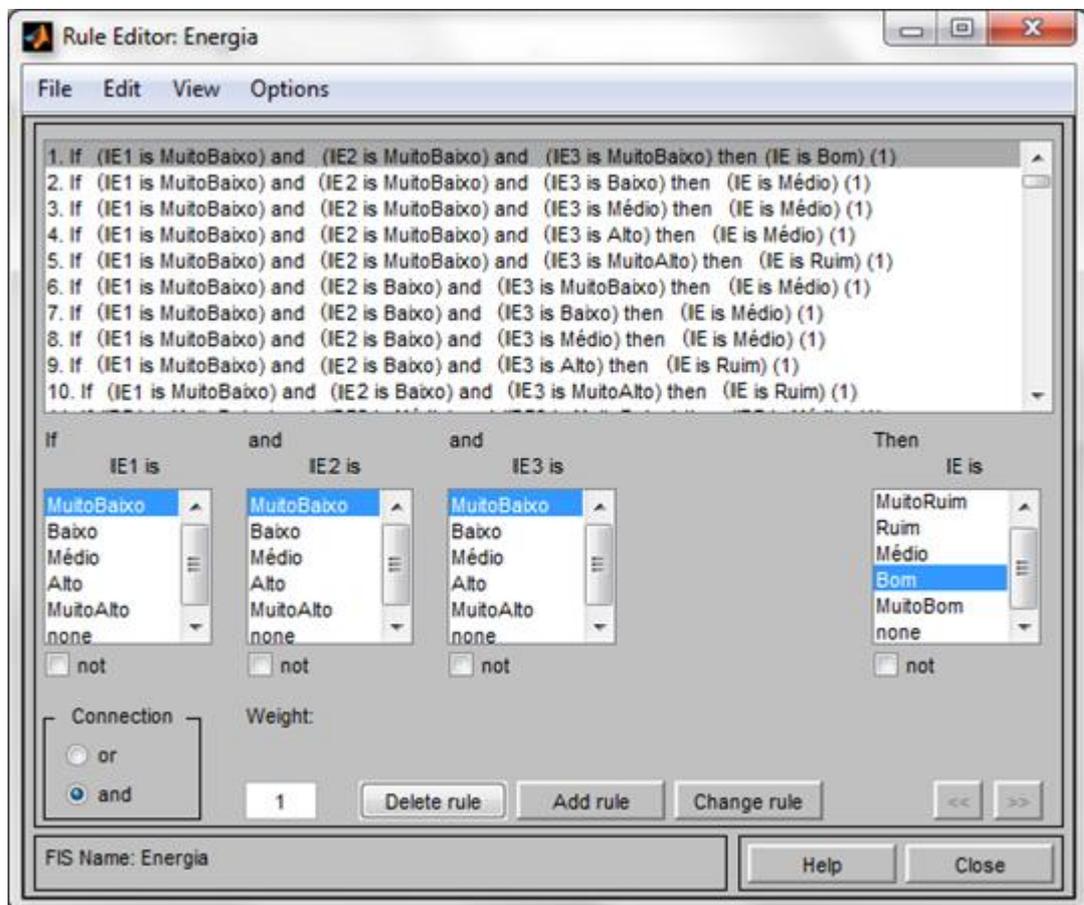


Figura 33: Regras da modelagem fuzzy do recurso água.

A Inferência é a etapa onde as regras são examinadas paralelamente. Esta etapa consiste no tratamento computacional deste conjunto de regras criando a região resultante, como mostra a figura 34.

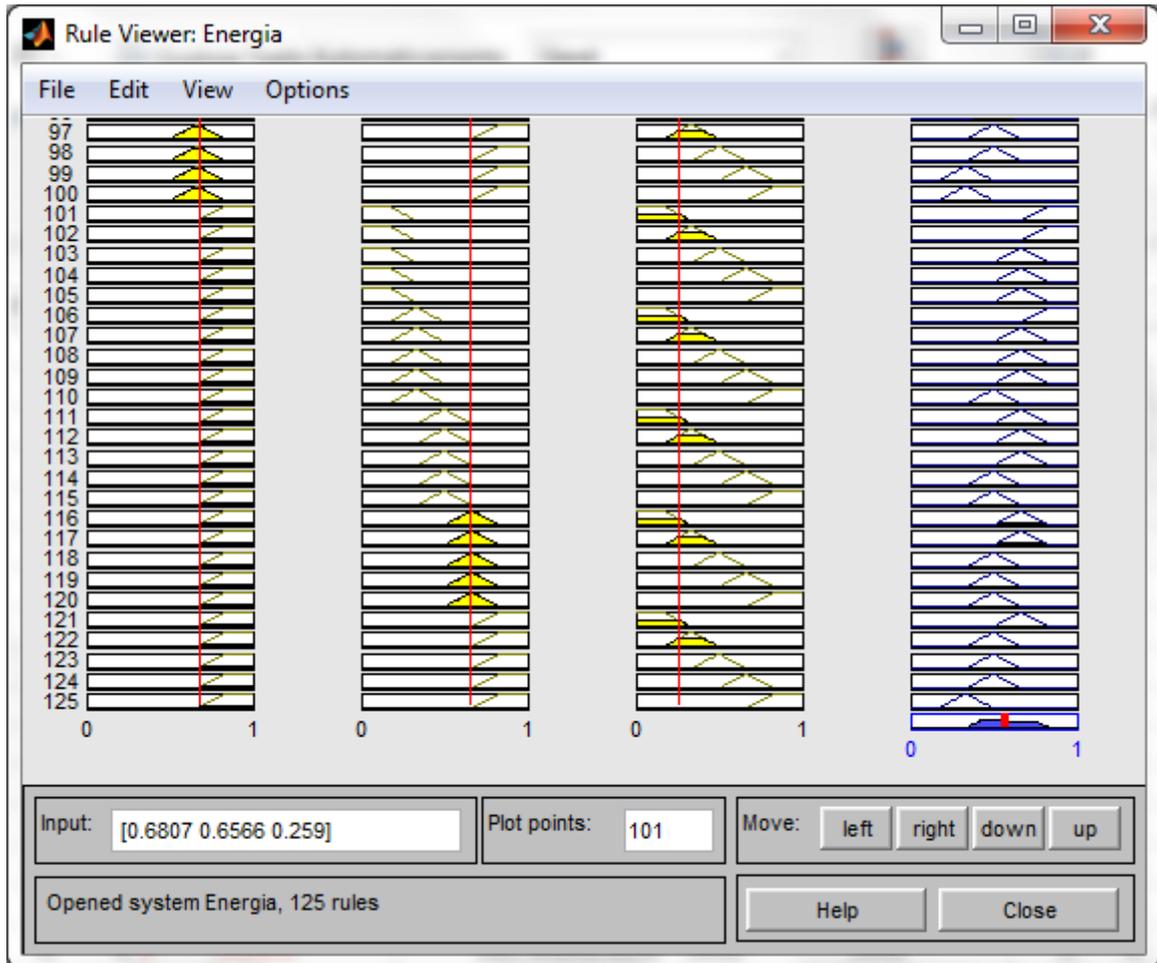


Figura 34: Sistema de inferência da modelagem fuzzy.

Terceira etapa – Defuzzificação

A última fase da arquitetura fuzzy é a Defuzzificação destes dados. É nesta fase onde a região resultante do processo de inferência é traduzido em um valor numérico através de diferentes técnicas de defuzzificação. Para este projeto foi aplicado o método centroide, por ser o mais utilizado em pesquisas acadêmicas atualmente.

Foram criadas duas arquiteturas diferentes, uma de primeira ordem, onde as três variáveis de cada recurso serão mapeadas em uma saída representando cada uma destes recursos. Estas saídas servirão de entradas na arquitetura fuzzy de segunda ordem, onde serão mapeadas e como resultado teremos o Índice CASE, que mede o comportamento do desenvolvimento sustentável no Brasil ao longo dos anos, baseado nos dados coletados de Clima, Água, Uso do Solo e Energia e suas interações. O índice CASE terá como resultado valores entre 0 e 1.

7 RESULTADOS

Através da aplicação da lógica fuzzy para a criação desta metodologia foi possível obter um indicador que represente cada um dos recursos e as interações de suas variáveis. Estes Indicadores são IC (Indicador Climático), IA (Indicador da Água), IS (Indicador do Solo) e IE (Indicador Energético).

O aumento dos subconjuntos da arquitetura fuzzy de três para cinco, nos garantiu resultados mais confiáveis, uma vez que uma quantidade maior de regras foram ativadas durante o processo de Inferência, dando um poder computacional maior ao sistema.

Os primeiros resultados obtidos foram os comportamentos destes recursos no período analisado como mostra a tabela 15:

Tabela 15: Resultados da modelagem fuzzy de primeira ordem.

| | Clima | Água | Solo | Energia |
|-------------|--------------|-------------|-------------|----------------|
| 2000 | 0.499 | 0.127 | 0.665 | 0.381 |
| 2001 | 0.492 | 0.186 | 0.665 | 0.499 |
| 2002 | 0.333 | 0.435 | 0.614 | 0.415 |
| 2003 | 0.333 | 0.435 | 0.333 | 0.499 |
| 2004 | 0.333 | 0.577 | 0.482 | 0.499 |
| 2005 | 0.499 | 0.604 | 0.665 | 0.547 |
| 2006 | 0.775 | 0.603 | 0.642 | 0.596 |
| 2007 | 0.531 | 0.735 | 0.476 | 0.569 |
| 2008 | 0.806 | 0.766 | 0.555 | 0.499 |
| 2009 | 0.872 | 0.872 | 0.595 | 0.665 |
| 2010 | 0.665 | 0.858 | 0.491 | 0.583 |

Os indicadores que representam os recursos Clima, Água e Energia, apresentaram crescimento no período analisado, mostrando uma evolução na gestão destes recursos.

No caso do Clima, esse crescimento se dá devido a melhora no monitoramento de queimadas e da implantação de novas leis que entraram em vigor neste período. Já o indicador da Água teve como principal impulsionador de seus resultados o aumento do

número de domicílios com abastecimento de água, e a melhora no volume útil dos principais reservatórios neste período.

O indicador que mede o desenvolvimento energético apresentou um crescimento não significativo. Dentre as três variáveis que compõem este indicador duas apresentaram evolução, a melhora da intensidade energético e o aumento da participação de fontes renováveis no consumo de energia do país. A variável responsável pela diminuição deste crescimento, foi o aumento do consumo de energia per capita que é resultado do crescimento do país de 2000 a 2010, uma vez que o consumo de energia acompanha o aumento do PIB.

O único indicador que apresentou regresso foi o indicador que mede o desenvolvimento do recurso do solo (IS) devido ao aumento da quantidade de fertilizantes comercializada e do crescimento exponencial da área utilizada para plantação de cana de açúcar. A figura 35 mostra o comportamento destes indicadores.

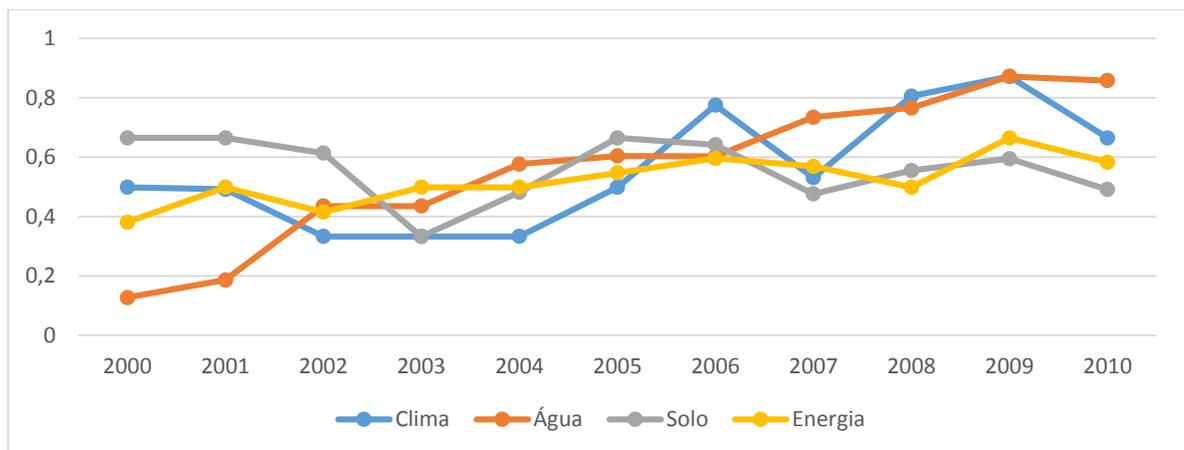


Figura 35: Comportamento dos indicadores no período de 2000 a 2010.

Os indicadores de cada um dos recursos, Clima, Água, Uso do Solo e Energia, formam a base de dados de entrada da arquitetura fuzzy de segunda ordem, responsável pelo mapeamento destas informações em uma saída denominada Índice CASE. A tabela 16, assim como a figura 36, apresentam o comportamento do índice CASE, considerando a série temporal de 11 anos, representando o desenvolvimento sustentável no Brasil com base nos recursos estudados.

Tabela 16: Resultados da modelagem fuzzy de segunda ordem.

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I.CASE | 0.386 | 0.488 | 0.426 | 0.333 | 0.470 | 0.600 | 0.632 | 0.572 | 0.660 | 0.787 | 0.665 |

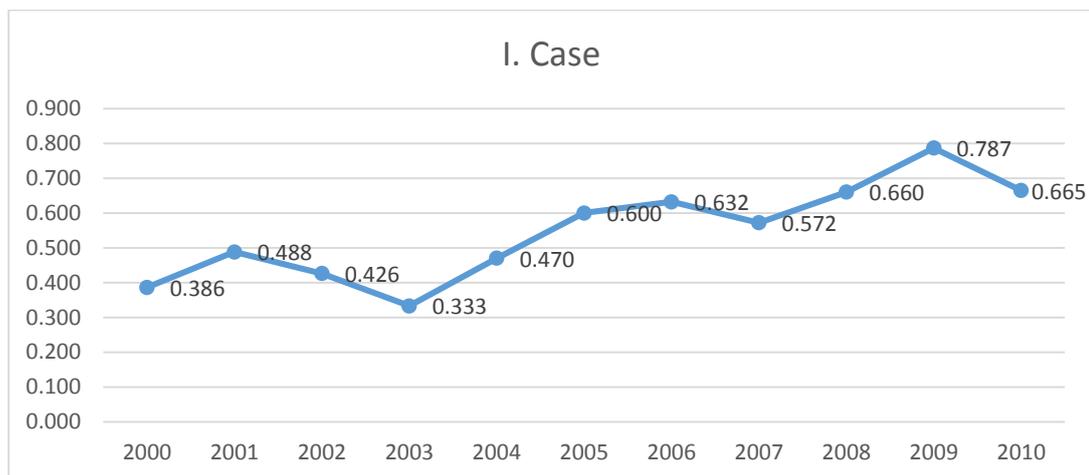


Figura 36: Comportamento do índice CASE no período de 2000 a 2010.

De acordo com o índice obtido, houve um crescimento contínuo no comportamento do desenvolvimento sustentável no Brasil. Este crescimento foi impulsionado principalmente pelo desempenho positivo dos indicadores de Clima, Água e Energia, apresentando registros com pico negativo no ano de 2003 e positivo em 2009. Uma das melhores características desta ferramenta é que nos permite retroagir nos anos buscando dados para melhor entender os motivos que explicam o comportamento do Índice CASE.

Assim, podemos ver que em 2003, ano em que o índice apresentou o menor valor do período analisado, os indicadores de Clima, Água, Solo e Energia apresentaram baixo desempenho, sendo eles: 0,333 (Clima), 0,435 (Água), 0,333 (Solo) e 0,499 (Energia). A ferramenta possibilita também que esta análise seja ainda mais profunda, buscando entender não somente o desempenho de cada recurso, mas também de todos os indicadores que o compõe. Como exemplo, podemos utilizar o recurso do clima, que apresentou um índice de 0,333. A tabela 17 apresenta os indicadores de clima no ano de 2003.

Tabela 17: Indicadores de Clima, ano de 2003.

| Recurso Clima | 2003 |
|---|-------------|
| IC1: Emissões de gases de efeito estufa | 0,868 |
| IC2: Consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio | 0,334 |
| IC3: Focos de queimadas | 0,740 |

Através da análise de seus indicadores podemos ver que no ano foram registrados altos índices de emissões de gases de efeito estufa (0,868), o consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio apresentou um valor intermediário (0,334) e foram registrados uma grande quantidade de focos de queimadas (0,740)

8 CONCLUSÃO

A maior dificuldade em mensurar algo como a sustentabilidade em um país ou região está na inconsistência na base de dados sob o aspecto temporal e na falta de uma ferramenta que possa unificar múltiplas variáveis, considerando todas as suas interdependências, além da seleção das variáveis que devem ser parametrizadas para compor o índice.

Assim sendo, os objetivos propostos foram alcançados, considerando que a ferramenta apresenta como resultado um índice de fácil interpretação representando a interação entre Clima, Água, Solo e Energia, proporcionando uma análise da utilização dos recursos estudados.

Esta ferramenta nos mostra a evolução temporal do desenvolvimento sustentável no Brasil, além de nos permitir fazer uma análise retroativa deste índice ano a ano e todas as variáveis que o compõem, auxiliando na tomada de decisão no desenvolvimento de políticas públicas e privadas.

Estas variáveis separadamente não podem explicar a sustentabilidade como um todo, mas quando analisadas de forma integrada revelam um significado mais amplo sobre este fenômeno.

8.1 Contribuição para pesquisa técnica e científica

Para a pesquisa técnica a principal contribuição é a disponibilização de uma ferramenta com utilidade para tomadores de decisão na avaliação de projetos públicos/privados considerando os recursos analisados e suas interações sobre o ponto de vista de sustentabilidade.

A contribuição com relação à pesquisa científica consiste na criação de uma ferramenta matemática que utiliza Inteligência artificial através de lógica fuzzy, voltada para a sustentabilidade.

8.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendações para trabalhos futuros, baseado nos resultados e na ferramenta apresentada nesta dissertação, temos:

- I. Comparação de resultados com outras ferramentas como Dashboard of Sustainability e o próprio CLEW em desenvolvimento pela Agência Internacional de Energia Atômica.
- II. Elaboração do I. CASE para diferentes países estabelecendo comparações.
- III. Aplicação do I. Case por estado buscando entender a gestão dos recursos em âmbito regional.
- IV. Modificar a programação do Dashboard of Sustainability para representar a metodologia aqui proposta, medindo a sustentabilidade baseada nos recursos Clima, Água, Solo e Energia.

ANEXO I – BASE DE DATOS IN NATURA

| In-natura | IC1 | IC2 | IC3 | IA 1 | IA 2 | IA 3 |
|-------------|----------|-----------|------------|----------|------------|--------|
| 2000 | 2083.570 | 11099.000 | 101537.000 | 15532111 | 843376.50 | 51.861 |
| 2001 | 2099.480 | 7413.000 | 145567.000 | 19413038 | 939756.00 | 47.792 |
| 2002 | 2319.610 | 3976.000 | 234367.000 | 21870677 | 1006869.00 | 64.854 |
| 2003 | 2358.749 | 4514.786 | 210894.000 | 23874602 | 990272.00 | 63.652 |
| 2004 | 2532.088 | 3213.650 | 232621.000 | 25298325 | 1015914.00 | 74.847 |
| 2005 | 2032.260 | 2072.080 | 225610.000 | 27012741 | 1009073.00 | 75.976 |
| 2006 | 1765.433 | 1409.520 | 117315.000 | 28900457 | 1050808.00 | 64.886 |
| 2007 | 1626.439 | 1508.506 | 229327.000 | 29709032 | 1072226.00 | 73.042 |
| 2008 | 1730.427 | 1294.272 | 123249.000 | 31082753 | 1156423.00 | 68.630 |
| 2009 | 1222.384 | 1462.470 | 123211.000 | 31728406 | 1240813.40 | 75.732 |
| 2010 | 1246.477 | 1207.710 | 249291.000 | 34398565 | 1264764.90 | 69.245 |

| In-natura | IS 1 | IS 2 | IS 3 | IE 1 | IE 2 | IE 3 |
|-------------|-------------|-----------|---------|--------|-------|--------|
| 2000 | 4879841.000 | 18226.000 | 128.832 | 40.940 | 0.221 | 45.270 |
| 2001 | 5022490.000 | 18165.000 | 134.680 | 39.460 | 0.219 | 41.380 |
| 2002 | 5206656.000 | 21650.000 | 143.620 | 41.080 | 0.221 | 42.220 |
| 2003 | 5377216.000 | 25396.000 | 163.145 | 43.370 | 0.223 | 42.500 |
| 2004 | 5633700.000 | 27772.000 | 151.987 | 43.510 | 0.222 | 44.160 |
| 2005 | 5815151.000 | 19014.000 | 132.189 | 44.320 | 0.220 | 44.720 |
| 2006 | 6392846.000 | 14286.000 | 141.410 | 44.720 | 0.219 | 45.830 |
| 2007 | 7086851.000 | 11651.000 | 167.860 | 45.540 | 0.219 | 48.050 |
| 2008 | 8210877.000 | 12911.000 | 143.700 | 45.670 | 0.219 | 50.000 |
| 2009 | 8845833.000 | 7464.000 | 138.000 | 46.890 | 0.215 | 48.330 |
| 2010 | 9164756.000 | 7000.000 | 155.015 | 45.400 | 0.217 | 52.500 |

ANEXO II – BASE DE DADOS NORMALIZADA PELO MÁXIMO - MÍNIMO

| Normalizado | IC1 | IC2 | IC3 | IA 1 | IA 2 | IA 3 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2000 | 0.658 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.144 |
| 2001 | 0.670 | 0.627 | 0.298 | 0.206 | 0.229 | 0.000 |
| 2002 | 0.838 | 0.280 | 0.899 | 0.336 | 0.388 | 0.605 |
| 2003 | 0.868 | 0.334 | 0.740 | 0.442 | 0.349 | 0.563 |
| 2004 | 1.000 | 0.203 | 0.887 | 0.518 | 0.409 | 0.960 |
| 2005 | 0.618 | 0.087 | 0.840 | 0.609 | 0.393 | 1.000 |
| 2006 | 0.415 | 0.020 | 0.107 | 0.709 | 0.492 | 0.607 |
| 2007 | 0.309 | 0.030 | 0.865 | 0.751 | 0.543 | 0.896 |
| 2008 | 0.388 | 0.009 | 0.147 | 0.824 | 0.743 | 0.739 |
| 2009 | 0.000 | 0.026 | 0.147 | 0.858 | 0.943 | 0.991 |
| 2010 | 0.018 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.761 |

| Normalizado | IS 1 | IS 2 | IS 3 | IE 1 | IE 2 | IE 3 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2000 | 0.000 | 0.540 | 0.000 | 0.199 | 0.750 | 0.350 |
| 2001 | 0.033 | 0.538 | 0.150 | 0.000 | 0.500 | 0.000 |
| 2002 | 0.076 | 0.705 | 0.379 | 0.218 | 0.750 | 0.076 |
| 2003 | 0.116 | 0.886 | 0.879 | 0.526 | 1.000 | 0.101 |
| 2004 | 0.176 | 1.000 | 0.593 | 0.545 | 0.875 | 0.250 |
| 2005 | 0.218 | 0.578 | 0.086 | 0.654 | 0.625 | 0.300 |
| 2006 | 0.353 | 0.351 | 0.322 | 0.708 | 0.500 | 0.400 |
| 2007 | 0.515 | 0.224 | 1.000 | 0.818 | 0.500 | 0.600 |
| 2008 | 0.777 | 0.285 | 0.381 | 0.836 | 0.500 | 0.775 |
| 2009 | 0.926 | 0.022 | 0.235 | 1.000 | 0.000 | 0.625 |
| 2010 | 1.000 | 0.000 | 0.671 | 0.799 | 0.250 | 1.000 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRUNDTLAND, Gro Harlem. **Nosso Futuro Comum**. Editora FGV, 1987. “**Our Common Future**”, Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [2] SANTOS, Francisco Carlos Barbosa dos. **Desenvolvimento e análise de um índice de sustentabilidade energética utilizando lógica fuzzy**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-04082011-103327/>>. Acesso em: 2014-02-18.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**, 2nd. Edition. New York, USA: United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2005.
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios and Strategies to 2050**. IEA/OECD, Paris, 2010.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Seeking Sustainable Climate Land Energy and Water (CLEW) strategies**, Nuclear Technology Review, 2009.
- [6] ROGNER, H.H. **Climate, Land, Energy and Water Strategies**, in: 2009.
- [7] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Climate Change, water and food security**, FAO Water Report 36, 2011.
- [8] BRAZILIAN, Morgan; ROGNER, H.; HOWELLS, Mark; HERMANN, Sebastian; ARENT, Douglas; GIELEN, Dolf; STEDUTO, Pasquale; MUELLER, Alexander, KOMOR, Paul, TOL, Richard S.J.; YUMKELLA, Kandeh K. **Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach**, Energy Policy, 2011.
- [9] CAMARGO, Ana Luiza de Brasil. **Desenvolvimento Sustentável: Dimensões e Desafios**. Editora Papirus, 2003.
- [10] SILVA, Christian Luiz da; SOUZA-LIMA, José Edmilson de. **Políticas Públicas e Indicadores para o Desenvolvimento Sustentável**. Editora Saraiva, 2010.
- [11] BRÜSEKE, F. J. O Problema do desenvolvimento sustentável. In: CAVALCANTI, C. (org.). **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. São Paulo: Cortez, 2003. p.29-40.
- [12] SACHS, Ignacy. – **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel e FUNDAP, 1993.

- [13] SACHS, Ignacy. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond 2002.
- [14] WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Ecological Footprint Method**. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [15] VAN BELLEN, Hans Michael. **Indicadores de sustentabilidade**: uma análise comparativa. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005.
- [16] YALE CENTER FOR ENVIRONMENTAL LAW & POLICY; CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK AT COLUMBIA UNIVERSITY. **Environmental performance index**: Full Report and Analysis, 2014. Disponível em: <http://epi.yale.edu/files/2014_epi_report.pdf> Acesso em: 2015-01-20
- [17] SOUTH PACIFIC APPLIED GEOSCIENCE COMMISSION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Building Resilience in SIDS**: The Environmental Vulnerability Index. Suva: South Pacific Applied Geoscience Commission, 2005.
- [18] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2010**. Rio de Janeiro, 2010.
- [19] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2012**. Rio de Janeiro, 2012.
- [20] GAMA, Margarida do Carmo F. Pereira. **Medidas de Bem-estar e Sustentabilidade**: Desenvolvimento de Metodologia de Análise e Seleção de Métricas. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em: <<http://run.unl.pt/handle/10362/2668>> Acesso em: 2013-12-15.
- [21] LOUETTE, Anne. **Compêndio de Indicadores de Sustentabilidade de Nações**: uma Contribuição ao Diálogo da Sustentabilidade. São Paulo: WHH – Willis Harman House, 2007.
- [22] MCLELLAN, R. et. al. **Living Planet Report 2014**: People and places, species and spaces. WWF, Switzerland, 2014.
- [23] INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS. **Energy Modeling Framework**: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE). Disponível em: <<http://www.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html>> Acesso em: 2013-11-10.

- [24] STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE. **Water Evaluation and Planning: WEAP**. Disponível em: <<http://www.weap21.org/index.asp?action=201>> Acesso em: 2013-11-10
- [25] COMMUNITY FOR ENERGY, ENVIRONMENT, AND DEVELOPMENT. **Long range Energy Alternatives Planning system: LEAP**. Disponível em: <<http://www.energycommunity.org/default.asp?action=47>> Acesso em: 2013-11-10.
- [26] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Agro-ecological Zoning System**: Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/land/databasesinformation-systems/aez-agro-ecological-zoning-system/en/>> Acesso em: 2013-11-10.
- [27] HARDI, P.; ZDAN, T. J. **The Dashboard of Sustainability**, Winnipeg: IISD, 2000.
- [28] INSTITUTO REAL DE TECNOLOGIA – KTH, **CLEWs** - Climate, Land, Energy and Water strategies to navigate the nexus, Estocolmo, 2015. Disponível em: <<https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/desa/researchareas/clews-climate-land-energy-and-water-strategies-to-navigate-the-nexus-1.432255>> Acesso em: 2015-05-05.
- [29] COMMISSION ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Indicators for Sustainable Development for Making Decision**. United Nations Department of Economic and Social Affairs: Division for Sustainable Development, 2007.
- [30] MEADOWS, Dornella H. et. al. **Limites do Crescimento: a atualização de 30 anos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.
- [31] BENNETI, Luciana Borba. **Avaliação do Índice de Desenvolvimento Sustentável (IDS) do Município de Lages/SC através do Método Painel de Sustentabilidade**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/>> Acesso em: 2014-05-11
- [32] SCANDAR NETO, Wadih J. **Síntese que organiza o olhar**. uma proposta para a construção e representação de indicadores de desenvolvimento sustentável e sua aplicação para os municípios fluminenses. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas - ENCE. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>> Acesso em: 2013-09-01.
- [33] SALTELLI, A. et. al. **Composite indicators: the controversy and the way forward**. Palermo, OECD World Forum on Key Indicators. 2004.
- [34] AGÊNCIA PORTUGUESA PARA O MEIO AMBIENTE, **Proposta para um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Direção Geral do Ambiente, 2000.

- [35] ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**: Information and Control 8, 338-353, 1965.
- [36] ROSS, Timothy J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, John Wiley & Sons, 2004.
- [37] YEN, J.; Langari, R. **Fuzzy logic: intelligence, control, and information**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.
- [38] BARROS, Laércio, BASSANEZI, Rodney C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. IME USP, 2006.
- [39] MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/347281.html>> Acesso em: 2014-11-08.
- [40] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2012: Consumo de substâncias destruidoras da camada de ozônio**, p. 24. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtm> Acesso em: 2014-09-07.
- [41] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Focos de queimadas**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>> Acesso em: 2014-11-11.
- [42] DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA DO SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE, SISTEMA DE INFORMAÇÃO DA ATENÇÃO BÁSICA, **Número de domicílios com acesso a abastecimento de água**. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?siab/cnv/SIABCbr.def>> Acesso em: 2014-12-21.
- [43] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2010**. Produção de pescados marítima e continental, p. 124-129. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2010.shtm> Acesso em: 2014-07-09.
- [44] MINISTÉRIO DA PESCA E AGRICULTURA. **Boletim estatístico da pesca e aquicultura 2010**. Disponível em: <http://www.mpa.gov.br/files/Docs/Informacoes_e_Estatisticas/Boletim%20Estat%C3%A4Dstico%20MPA%202010.pdf> Acesso em: 2014-08-05.

- [45] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, **Volume Útil dos Principais Reservatórios**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx> Acesso em: 2014-11-10.
- [46] UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, **Área Plantada com cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5>> Acesso em: 2014-11-09.
- [47] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>> Acesso em: 2014-11-15.
- [48] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável 2010**: Uso de Fertilizantes, p. 45-51. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2010.shtm> Acesso em: 2014-07-09.
- [49] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IDS 2012 (Indicadores de Desenvolvimento Sustentável) - Participação das fontes renováveis na oferta de energia, p. 282. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtm> Acesso em: 2014-07-09.
- [50] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IDS 2012 (Indicadores de Desenvolvimento Sustentável) – Intensidade Energética, p. 279. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtm> Acesso em: 2014-07-09.
- [51] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IDS 2012 (Indicadores de Desenvolvimento Sustentável) – Consumo de Energia per Capita, p. 276. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtm> Acesso em: 2014-07-09.

DADOS DO AUTOR

Nome: Fernando Henrique Franchi Quinhoneiro

E-mail: fernando.quinhoneiro@usp.br

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2249414645069901>