ANÁLISE DOS INDICADORES DE SALUBRIDADE AMBIENTAL: UTILIZANDO MODELAGEM VIA REGRAS FUZZY

Palavras-Chave: SANEAMENTO BÁSICO, SALUBRIDADE AMBIENTAL, LÓGICA *FUZZY*

Autores(as):

MANUELA NAKAOKA, FT – UNICAMP

Prof(ª). Dr(ª). ELAINE CRISTINA CATAPANI POLETTI (orientador(a)), FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O crescimento desordenado e a ausência de planejamento urbano resultam na formação de cidades com *déficits* relacionados à salubridade ambiental, entendida como o conjunto de condições ambientais que garantem a saúde e o bem estar de uma nação, prevenindo doenças e proporcionando qualidade de vida.

A falta de saneamento básico de municípios e de comunidades torna o ambiente insalubre, criando um ciclo contínuo de vulnerabilidade sanitária e social. Por outro lado, sua existência e eficiência corroboram para a garantia de qualidade mínima de vida e saúde da população. Dentro deste contexto, o Indicador de Salubridade Ambiental (ISA), desenvolvido pela Câmara Técnica de Planejamento do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONESAN) de São Paulo em 1999, se destaca como uma ferramenta importante para a gestão de questões relacionadas à qualidade de vida da população, pois possibilita o monitoramento contínuo das condições ambientais e a avaliação do impacto das políticas de saneamento.

De acordo com Manual Básico da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo, a salubridade ambiental pode ser entendida como a qualidade do meio ambiente, tanto no tocante à prevenção de doenças de veiculação hídrica e ambiental quanto ao aperfeiçoamento das condições sanitárias em benefício da saúde da população urbana e rural (São Paulo, 1999).

Visto isso, a defesa que se faz é que a salubridade ambiental de uma cidade ou região pode ser avaliada como um elemento essencial para a gestão do monitoramento ambiental, que influencia diretamente a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável de um município.

Com isso, o objetivo deste estudo é realizar um modelamento matemático, baseado em Lógica *Fuzzy*, de um indicador de salubridade de municípios paulistas para a avaliação integrada dos cenários, alternativo ao ISA, usando, por base, os critérios estabelecidos no Manual Básico da

Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo, com vistas a contribuir para a avaliação da salubridade ambiental de forma integrada e fomentar discussões sobre tais parâmetros e incentivar iniciativas públicas.

A hipótese deste estudo é que a aplicação da lógica *Fuzzy*, formalizada por Zadeh em 1965, na modelagem contribui significativamente para a construção de cenários detalhados para os municípios, favorecendo uma abordagem holística das questões ambientais, sanitárias, de saúde e socioeconômicas, com características próprias da teoria: de flexibilização de estados limítrofes e consideração de relações múltiplas de forma simples e eficiente.

Com essa abordagem, pretende-se compreender de forma mais abrangente as condições dos municípios e utilizar essas informações como ferramentas de apoio à administração pública, de forma menos rígida e contribuir para a tomada de decisões sobre os serviços de saneamento básico e a formulação de políticas públicas que melhorem as condições de saúde e ambiental das regiões.

METODOLOGIA:

Com o objetivo de quantificar a salubridade ambiental nos municípios paulistas, este estudo propõe a criação de um índice alternativo ao Indicador de Salubridade Ambiental (ISA), utilizando os critérios estabelecidos no *Manual Básico da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo.*

Desta forma, o ponto de partida desta pesquisa foi a revisão teórica sobre o ISA, desenvolvido pela Câmara Técnica de Planejamento do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONESAN) de São Paulo, a fim de compreender sua estrutura, metodologia e aplicabilidade.

Em seguida, foram aprofundados os estudos sobre a Teoria do Conjuntos *Fuzzy*, com ênfase na Lógica *Fuzzy*, abrangendo seus princípios fundamentais, operadores e aplicações em sistemas de tomada de decisão.

Com a fundamentação teórica consolidada, iniciou-se a modelagem do índice de salubridade ambiental, seguido de sua implementação computacional em ambiente Matlab, utilizando um pacote específico para Lógica *Fuzzy*.

Na sequência, foram coletadas informações sobre 50 municípios paulistas (escolhidos aleatoriamente) através de dados disponíveis no Relatório de Salubridade Ambiental de 2022 e o IDHM de 2010, e realizadas simulações, com o intuito de analisar os níveis de salubridade ambiental segundo o índice proposto. A distribuição dos municípios foi demarcada no mapa do estado de São Paulo, com o objetivo de identificar condições ambientais das diversas regiões.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A modelagem do ISA_F, por meio de controladores Fuzzy, considerou um sistema com seis variáveis de entrada, sendo as mesmas consideradas pelo Conselho Estadual:

- indicador de abastecimento de água (Iab);

- indicador de esgotamento sanitário (Ies);
- indicador de resíduos sólidos (Irs);
- indicador de controle de vetores (Icv);
- indicador de recursos hídricos (Irh) e
- indicador socioeconômico (Ise).

Como variável de saída, construímos o indicador: ISA_F- Índice de Saneamento Ambiental.

As variáveis de entrada relativa aos índices de abastecimento de água (Iab), de esgotamento sanitário (Ies), de resíduos sólidos (Irs), de vetores (Icv) e de recursos hídricos (Irh) foram classificadas linguisticamente em três faixas: Crítico, Moderado e Bom. A variável de entrada relativa ao índice socioeconômico (Ise) foi classificada como: Baixo, Médio e Alto.

A variável de saída do sistema foi classificada como: Insalubre, de Baixa Salubridade, de Média Salubridade e Salubre.

O desenvolvimento do processo teve como objetivo a construção de um modelo representativo que capturasse o comportamento dinâmico do sistema em estudo, permitindo assim uma análise mais eficiente das relações entre as variáveis envolvidas.

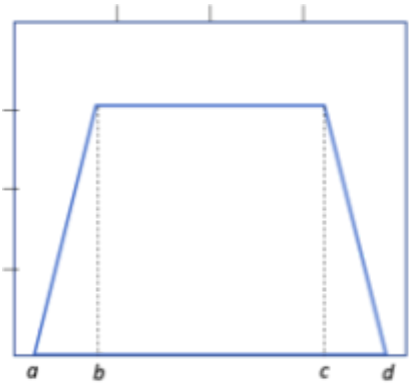

Figura 1 - Função trapezoidal. Fonte: autoral

Todas as funções de pertinência, tanto das variáveis de entrada quanto de saída, foram modeladas no formato trapezoidal, conforme apresentado na Figura 1 e seus limites seguem apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelamento das funções de pertinência

Índice	**Domínio**	**Limites da função Trapezoidal** $[a,\ b,\ c,\ d]$
Iab	[0,100]	[-10,0,40,41] Crítico [40,41,60,61] Moderado [60,61,100,110] Bom
Ies	[0,100]	[-10,0,50,51] Crítico [50,51,85,86] Moderado [85,86,100,110] Bom
Irs	[0,100]	[-10,0,25,26] Crítico [25,26,50,51] Moderado [50,51,100,110] Bom
Icv	[0,100]	[-10,0,25,26] Crítico [25,26,50,51] Moderado [50,51,100,110] Bom
Irh	[0,100]	[-10,0,40,41] Crítico [40,41,60,61] Moderado [60,61,100,110] Bom

Ise	[0,1]	[-1,0,0.599,0.6] Baixo [0.599,0.6,0.699,0.7] Médio [0.699,0.7,1,2] Bom
ISA_F	[0,100]	[-10,0,25,26] Insalubre [25,26,50,51] Baixa Salubridade [50,51,75,76] Média Salubridade [75,76,100,110] Salubre

No total, foram modeladas 729 regras linguísticas, compondo o Sistema de Base de Regras Fuzzy do tipo: *"SE **Iab** é crítico e **Ies** é crítico e **Irs** é crítico e **Icv** é crítico e **Irh** é crítico e **Ise** é baixo, ENTÃO ISA_F é insalubre"* e os métodos de Inferência e de Defuzzificação utilizados foram os de Mamdani e Centro de Gravidade, respectivamente.

A modelagem possibilitou avaliar a salubridade dos municípios, proporcionando uma ferramenta estratégica para o planejamento de políticas públicas e para o monitoramento dos avanços em saneamento básico e saúde ambiental.

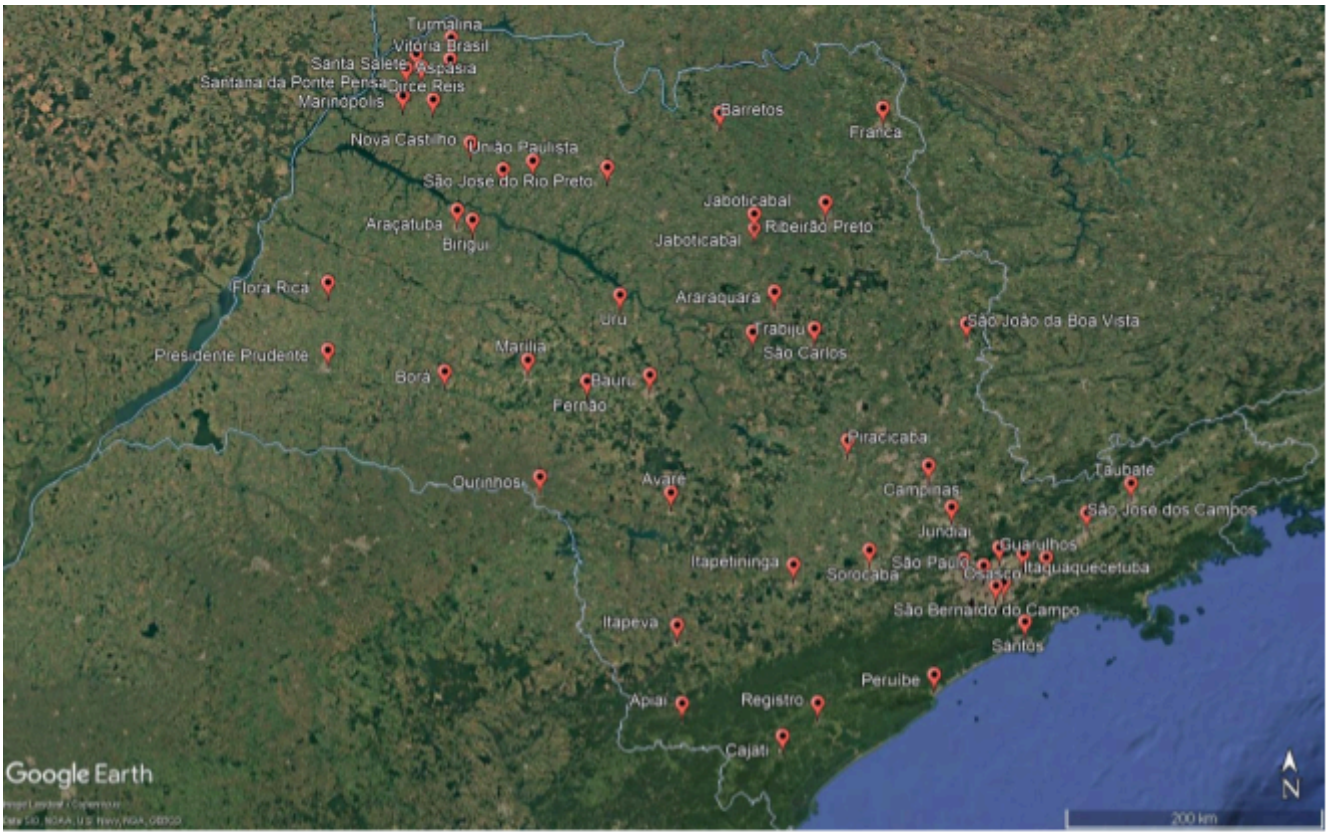

Figura 2 - Mapa dos 50 municípios. Fonte: autoral. Mapa obtido via Google Earth.

Para a validação do modelo, foram utilizados dados de 50 municípios do estado de São Paulo para realizar as simulações e analisar os resultados, conforme apresentado na Figura 2.

Os municípios selecionados, distribuídos por todo o estado, tiveram suas informações coletadas do Relatório de Salubridade Ambiental da CETESB de 2022, utilizando-se, em substituição ao Ise (Indicador Socioeconômico), o IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal) de cada

município, disponível no Atlas de Desenvolvimento Humano, por se tratar de um índice oficial proposto pelo governo federal .

De acordo com as simulações, 76% obtiveram a mesma classificação atribuída pela CETESB; 20% apresentaram um resultado mais otimista em relação à classificação da CETESB, indicando uma salubridade ambiental mais alta e, por fim, 4% obtiveram um resultado mais pessimista, com indicação de salubridade inferior àquela apontada utilizando o ISA convencional.

De modo geral, a classificação dos municípios no tocante ao abastecimento de água e esgotamento sanitário foi prevalecida, tendo em vista sua relevância.

CONCLUSÕES:

Tendo em vista os objetivos da pesquisa, de desenvolvimento de um Indicador de Salubridade Ambiental (ISA) baseado em regras *fuzzy*, conclui-se que a metodologia proposta demonstrou ser eficaz na avaliação, ao incorporar complexidade e incertezas inerentes aos sistemas de saneamento e saúde pública, ao flexibilizar os estados limítrofes do domínio e ao considerar a dependência de múltiplas variáveis.

A categorização das variáveis em quatro faixas também possibilitou uma interpretação intuitiva e acessível dos resultados.

Com isso, conclui-se que a abordagem *fuzzy* contribuiu de forma significativa para uma representação mais abrangente e realista das condições ambientais, de saúde, de saneamento e socioeconômicas dos municípios analisados, oferecendo subsídios técnico-científicos relevantes para a formulação de políticas públicas eficazes.

BIBLIOGRAFIA

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Salubridade Ambiental.** São Paulo, 2022.

PNDU - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; FJP - Fundação João Pinheiro. **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil: dados do IDHM 2010.** Brasília, 2013. Disponível em: http://www.atlasbrasil.org.br. Acesso em: 26 de maio de 2025.

SÃO PAULO (Estado). **ISA - Indicador de Salubridade Ambiental: manual básico.** Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. São Paulo, 1999.

ZADEH, Lotfali Askar. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.