



VIII Workshop de Águas Subterrâneas dos Comitês PCJ

Inovações na Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos

Realização:

CT-AS
Câmara Técnica de
Águas Subterrâneas



Apoio:



CT-Indústria
Câmara Técnica de Uso e
Conservação da Água na Indústria

CT-MH
Câmara Técnica de
Monitoramento Hidrológico

 **AgSolve**
GeoAcqua

edisonda
POÇOS SUBTERRÂNEOS



UNIPER
POÇOS SUBTERRÂNEOS



Sigesp





CT-AS
Cloruro Trisódico de
Ácido Sulfatado



CT-Indústria
 Empresa Brasileira de Saneamento
 Companhia de Saneamento de São Paulo

CT-MH
Clínica Técnica de
Mantenimiento Hidráulico

AgSolve
GeoAcqua



Sigesp



mralberto@geoinovacoes.com.br
www.geoinovacoes.com.br

Por que usar IA e modelos?

Crescimento da demanda por água subterrânea e desafios na gestão clássica

Usar tecnologia para subsidiar a hidrogeologia clássica com gestão inteligente

Objetivos

Entender como a IA e os modelos numéricos
podem apoiar em decisões baseadas em dados

O que é Inteligência Artificial?

É o campo da ciência da computação que cria sistemas capazes de simular funções cognitivas humanas, como: aprender, raciocinar, resolver problemas e tomar decisões.



ARTIFICIAL INTELLIGENCE VS MACHINE LEARNING VS DEEP LEARNING

1 Artificial Intelligence

Development of smart systems and machines that can carry out tasks that typically require human intelligence

2 Machine Learning

Creates algorithms that can learn from data and make decisions based on patterns observed
Require human intervention when decision is incorrect

3 Deep Learning

Uses an artificial neural network to reach accurate conclusions without human intervention

Inteligência Artificial Geral (IA)

Baseada em regras e lógica explícita

Aplicação: Sistemas especialistas em hidrogeologia

Algoritmos aprendem a partir de dados históricos

Principais técnicas: Árvores de Decisão; Máquinas de Vetores de Suporte (SVM). Ensemble Learning (Random Forest, Gradient Boosting)

Aplicação: Classificação de qualidade de água, previsão de níveis

Deep Learning

Redes Neurais Artificiais com múltiplas camadas

Principais arquiteturas:

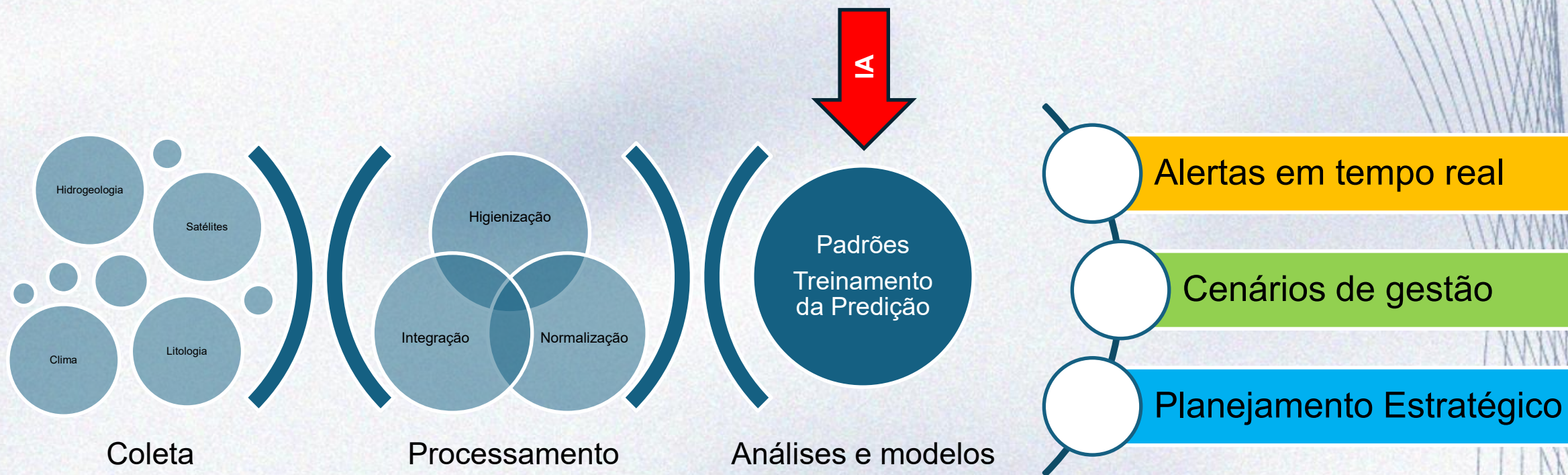
Redes Neurais Feedforward: previsão de níveis de aquífero

Redes Recorrentes (LSTM): séries temporais de fluxo

Redes Convolucionais (CNN): análise de dados de sensoriamento remoto

Aplicação: Modelagem complexa de aquíferos, processamento de satélites

A Cadeia de Real Valor





**VIII Workshop de
Águas Subterrâneas**
dos Comitês PCJ

Inovações na Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos

Realização:

CT-AS
Comitê Técnico de
Águas Subterrâneas



Apoio:



CT-Indústria
Comitê Técnico de Uso e
Gerenciamento de Água na Indústria

CT-MH
Comitê Técnico de
Monitoramento Hidrológico

AgSolve
GeoAcqua

edisonda



Sigesp



Aplicações Práticas de IA e Modelos Numéricos em Hidrogeologia e Gestão de Recursos Hídricos

Monitoramento e Previsão de Níveis de Água Subterrânea

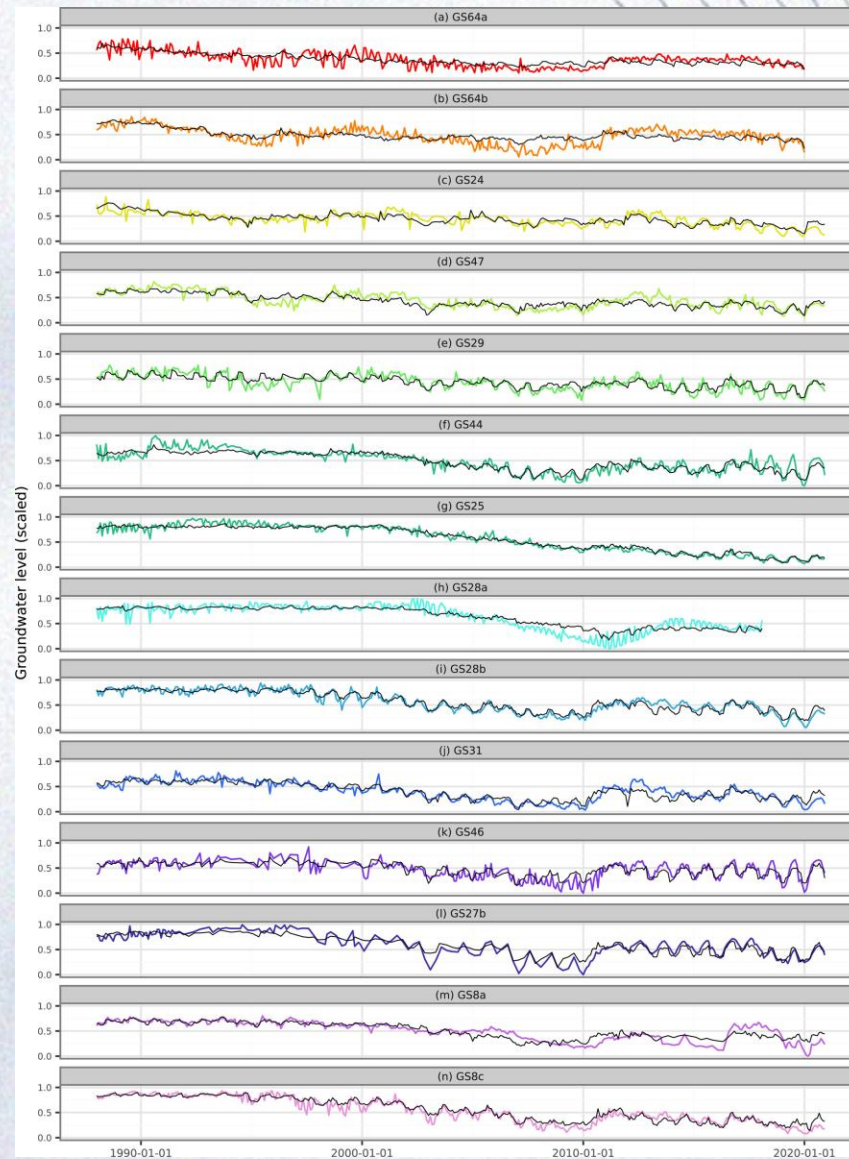
Desafio: Disponibilidade limitada de dados em tempo real

Solução IA: Redes Neurais LSTM treinadas com séries históricas

Resultado: Previsões com semanas de antecedência

Caso de Referência: Metodologia do SGB/UFRJ/NASA (2024) - monitoramento de aquíferos brasileiros com IA

Monitoramento e Previsão de Níveis de Água Subterrânea



Estimativa de Recarga de Aquíferos

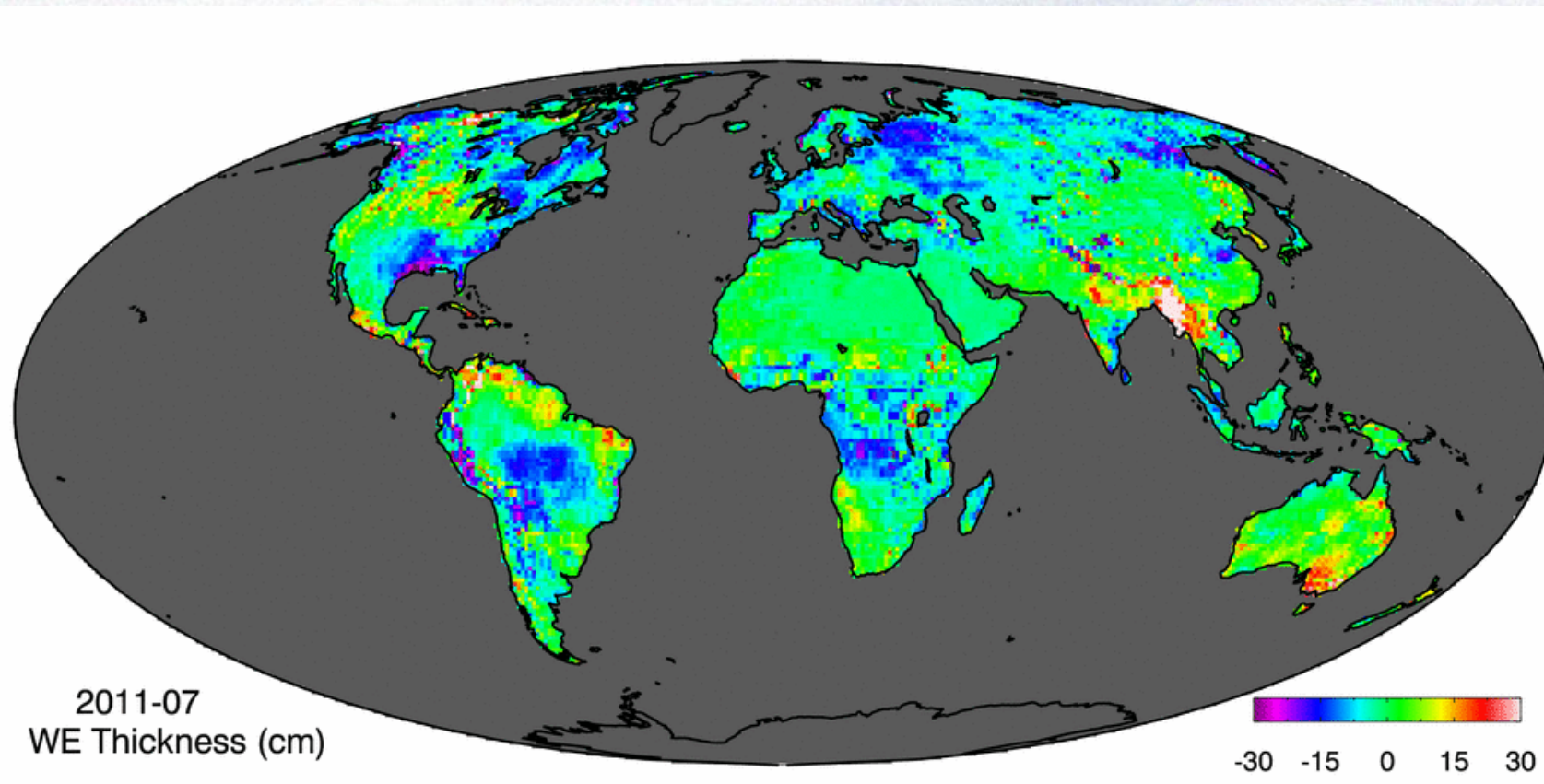
Desafio: Recarga é dinâmica e influenciada por múltiplas variáveis

Solução: Machine Learning + dados de satélites GRACE

Tecnologia: Algoritmos de ensemble para capturar não-linearidades

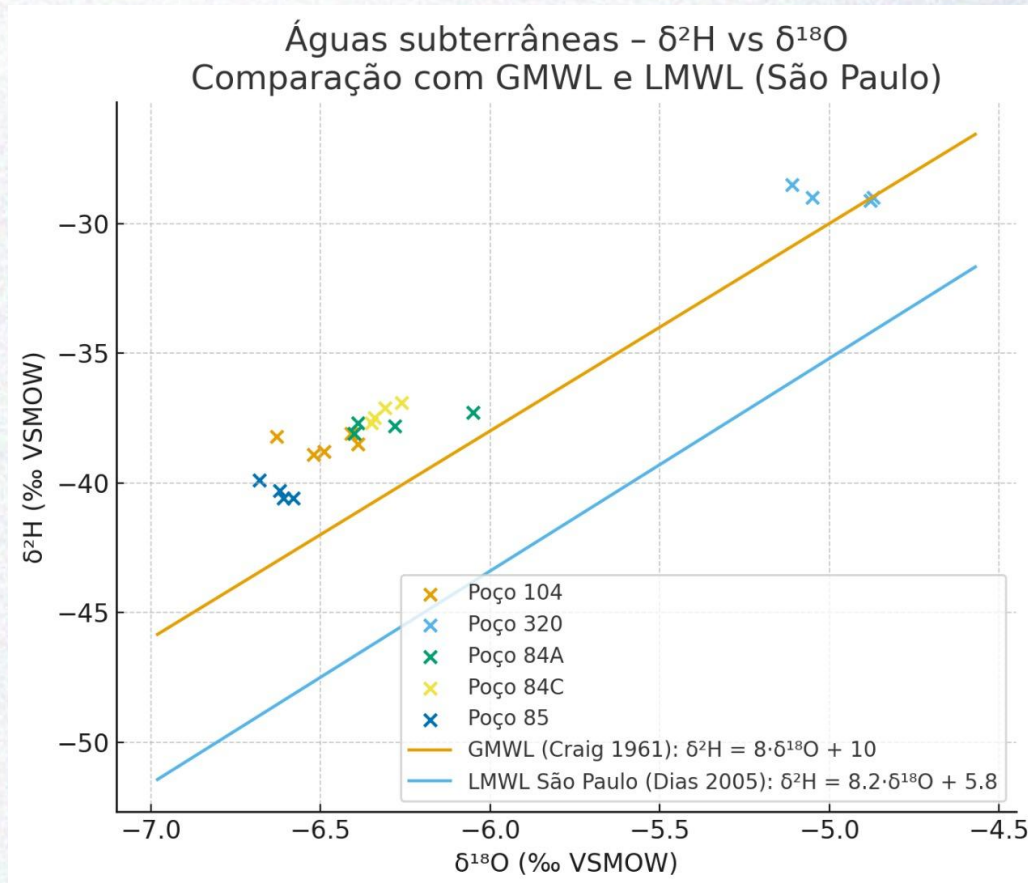
Impacto: Melhor entendimento da sustentabilidade do recurso

Estimativa de Recarga de Aquíferos



Dados de
armazenamento
de água do
GRACE
+
IA
=
Previsão de
Recarga

Estimativa de Recarga de Aquíferos



GenAI utilizada para
interpretação de dados
de isótopos em
aquíferos fraturados

Águas
meteóricas
=
recarga rápida
> vulnerabilidade

Simulação de Cenários com Modelos Numéricos Híbridos

Ferramentas tradicionais: MODFLOW (fluxo), MT3D (transporte)

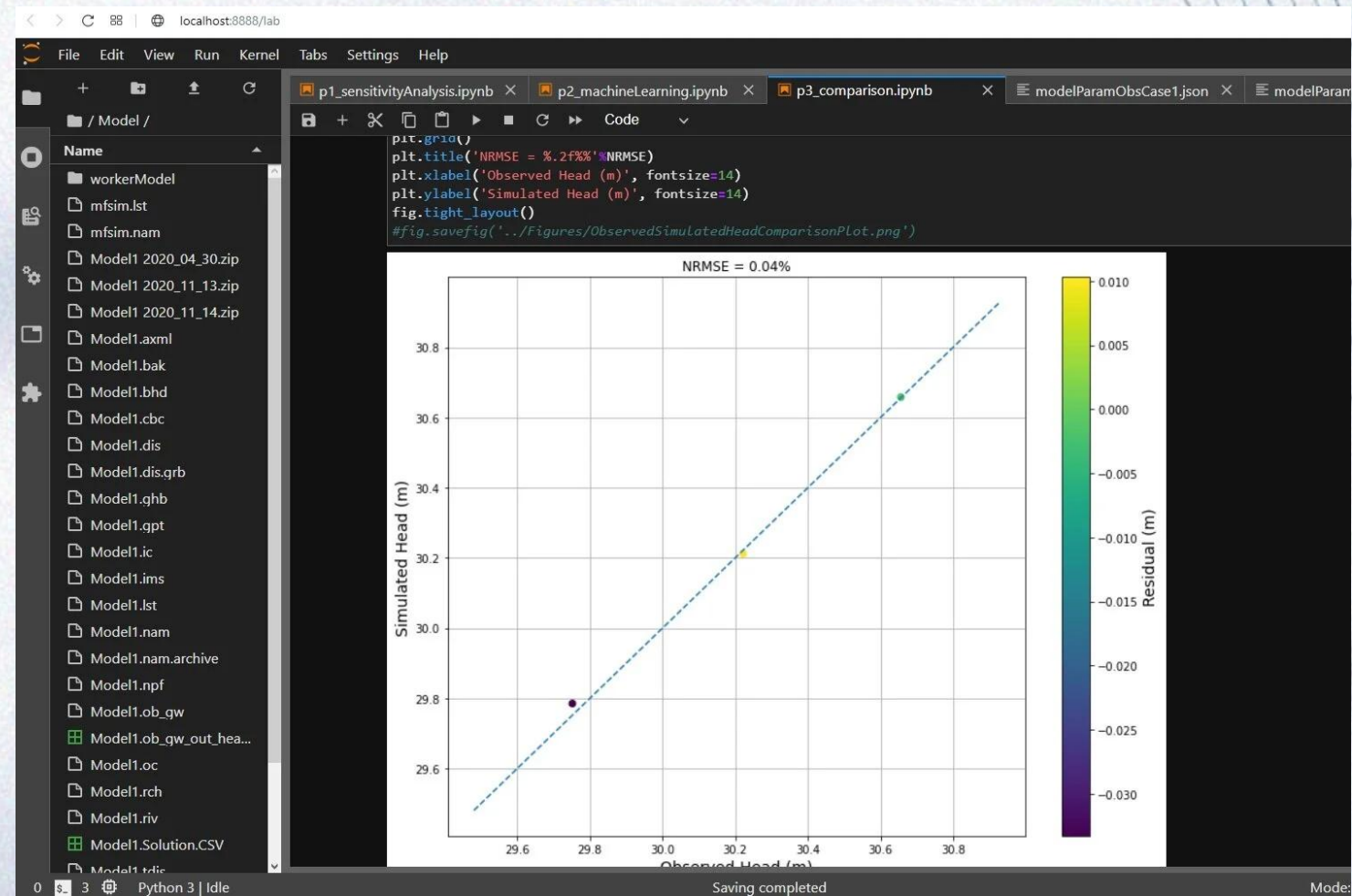
Integração com IA:

- Aceleração computacional
- Inversão de parâmetros hidrogeológicos
- Otimização de exploração

Vantagem: Redução de tempo de simulação mantendo precisão

Simulação de Cenários com Modelos Numéricos Híbridos

Machine
Learning para
calibração de
modelo numérico
de fluxo



Qualidade de Água Subterrânea

Desafio: Previsão de contaminação em aquíferos

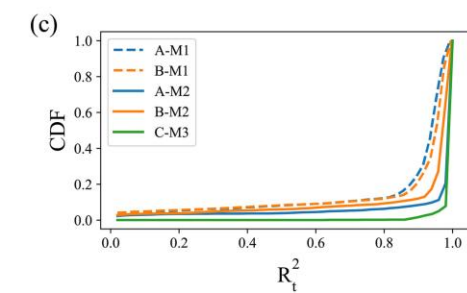
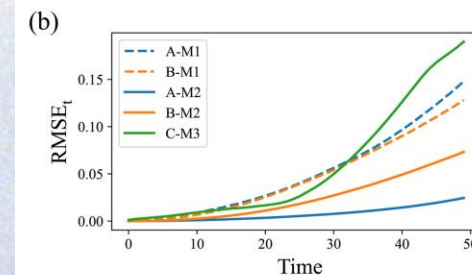
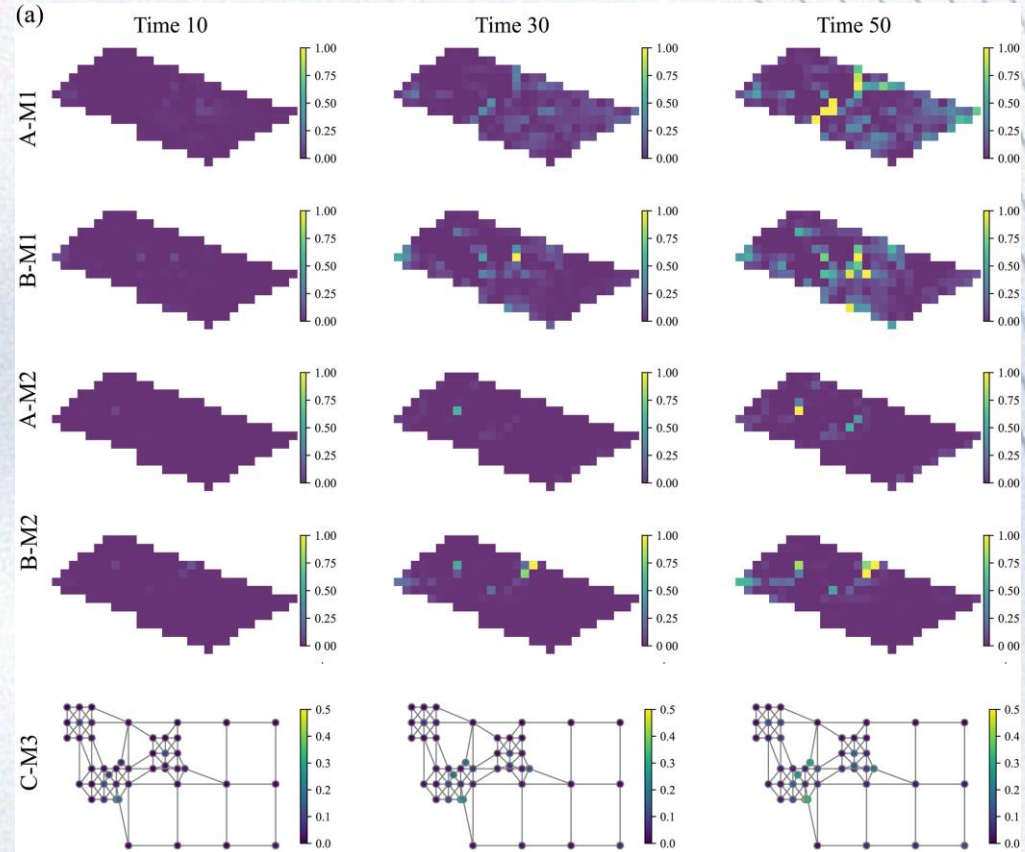
Solução IA:

- Classificação com Machine Learning
- Redes Neurais para previsão de concentração de contaminantes

Impacto: Detecção precoce de anomalias, proteção de poços

Qualidade de Água Subterrânea

Geração de
diversos cenários
de contaminação



Gestão Otimizada de Poços

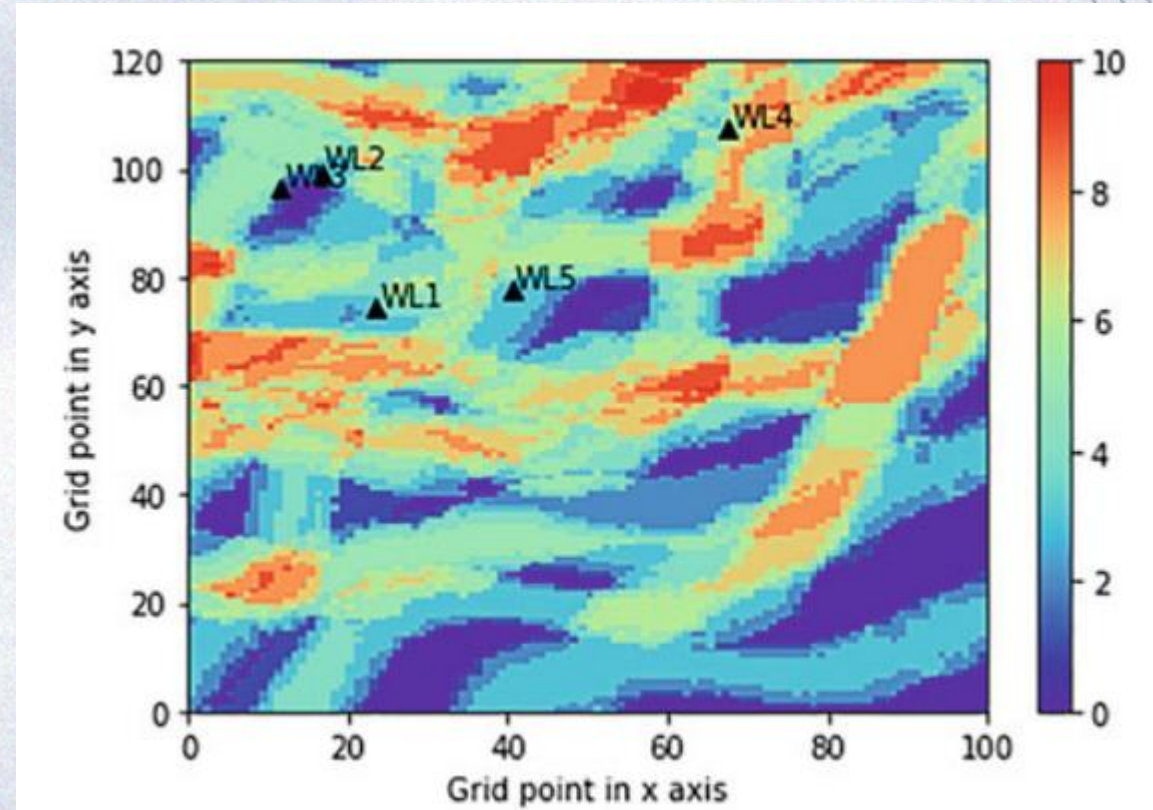
Problema: Alocação eficiente de exploração

Abordagem: Algoritmos de Reinforcement Learning

Resultado: Distribuição ótima de extrações minimizando rebaixamentos

Gestão Otimizada de Poços

Optimization
algorithms para
locação de poços



Previsão de Respostas a Eventos Extremos

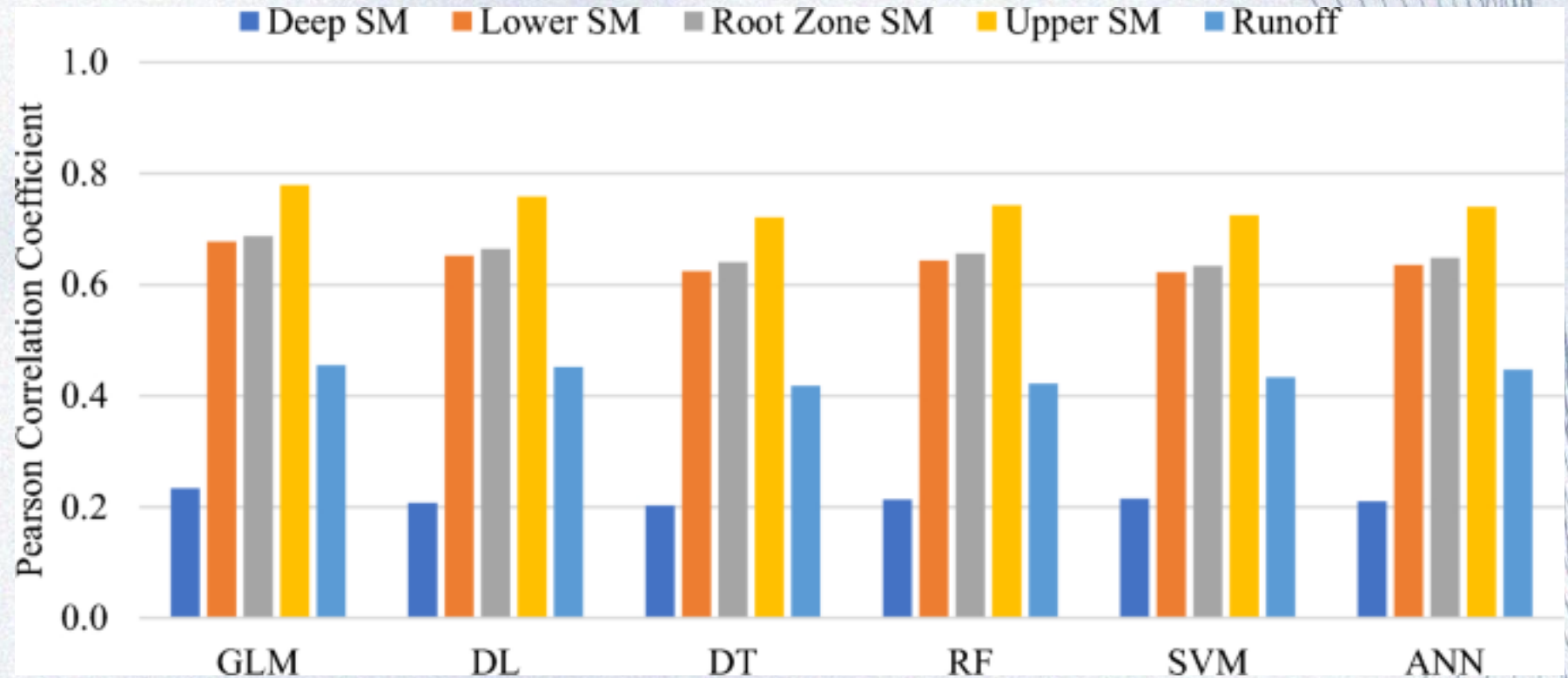
Cenário: Secas prolongadas, chuvas intensas

Modelo: Integração de IA com previsões climáticas

Benefício: Planejamento de contingência com antecedência

Previsão de Respostas a Eventos Extremos

Uso de diversos
modelos de IA
para previsão de
seca



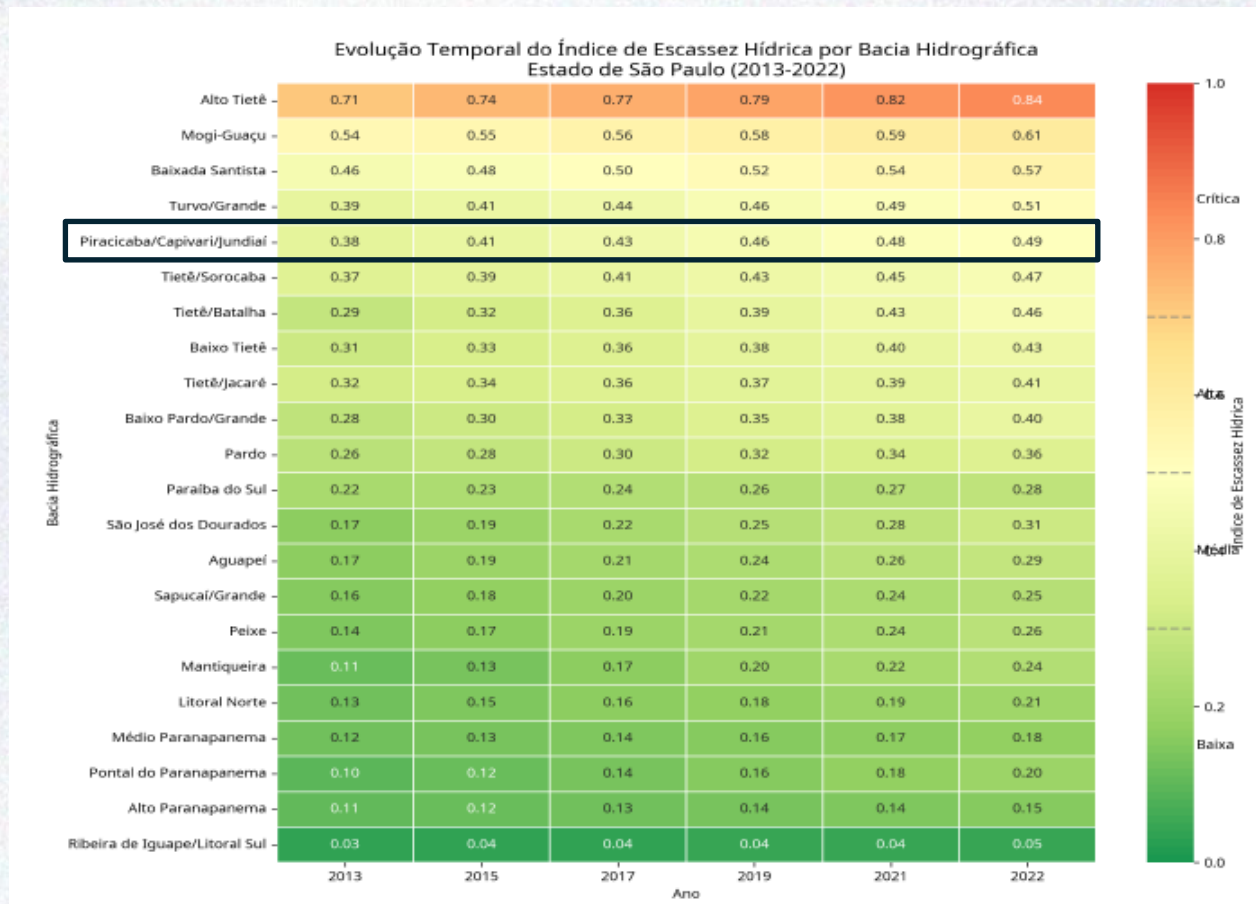
Estudo de caso da bacia PCJ

Cenário: Avaliar Stress Hídrico e Prever Cenários Futuros

Modelo: Manus.AI

Benefício: Diagnóstico rápido e subsídio ao Planejamento de contingência com antecedência

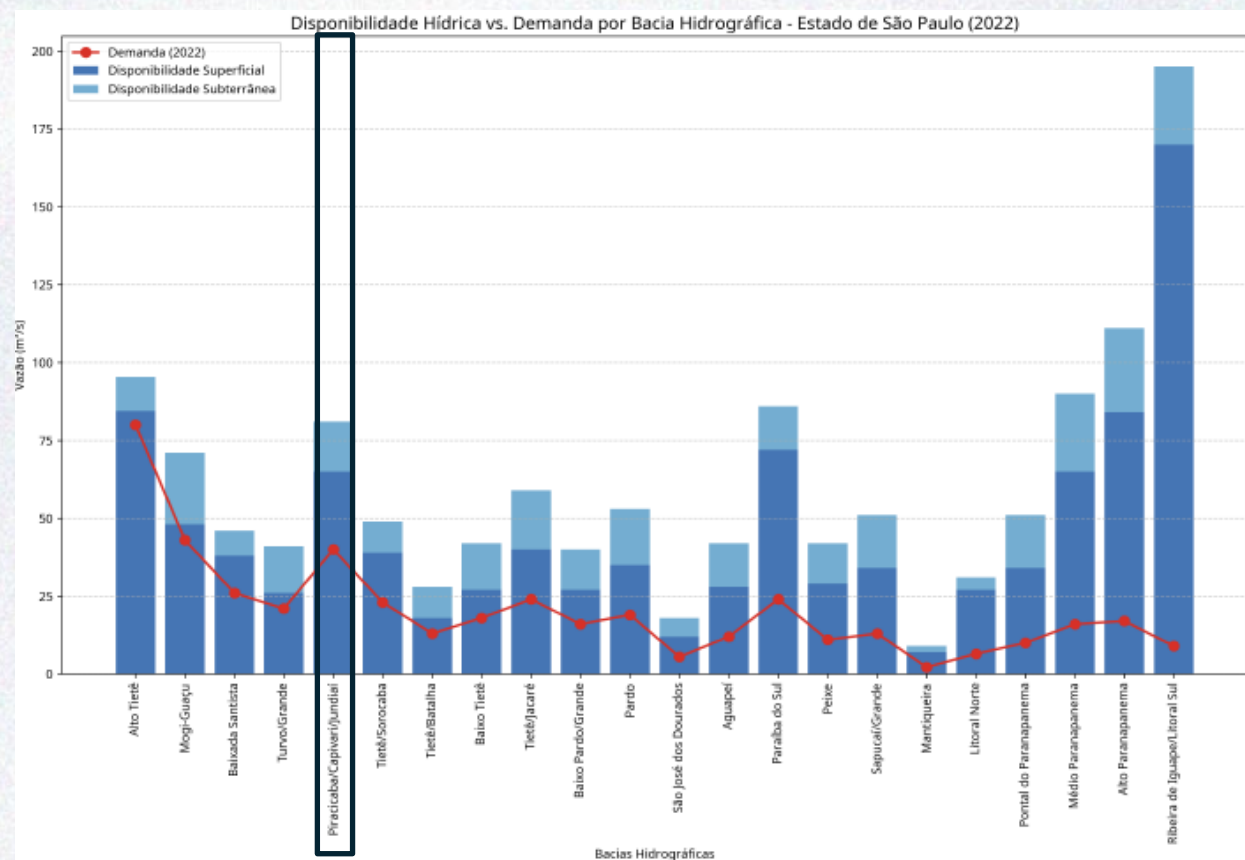
Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)



Aumento de 10%
no stress hídrico
da bacia PCJ em
10 anos

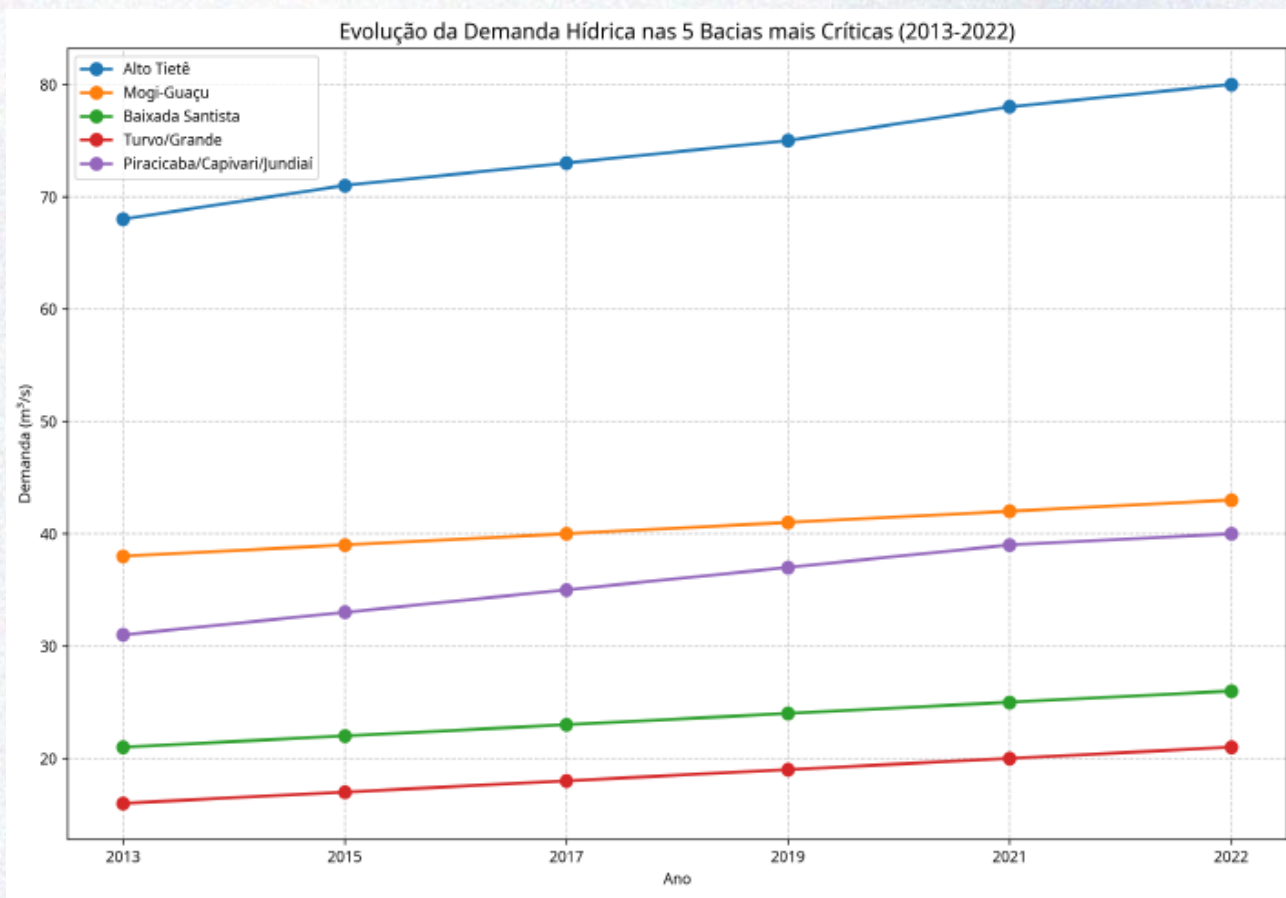


Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)



Comparação
entre demanda e
disponibilidades
hídricas
subterrânea e
superficial

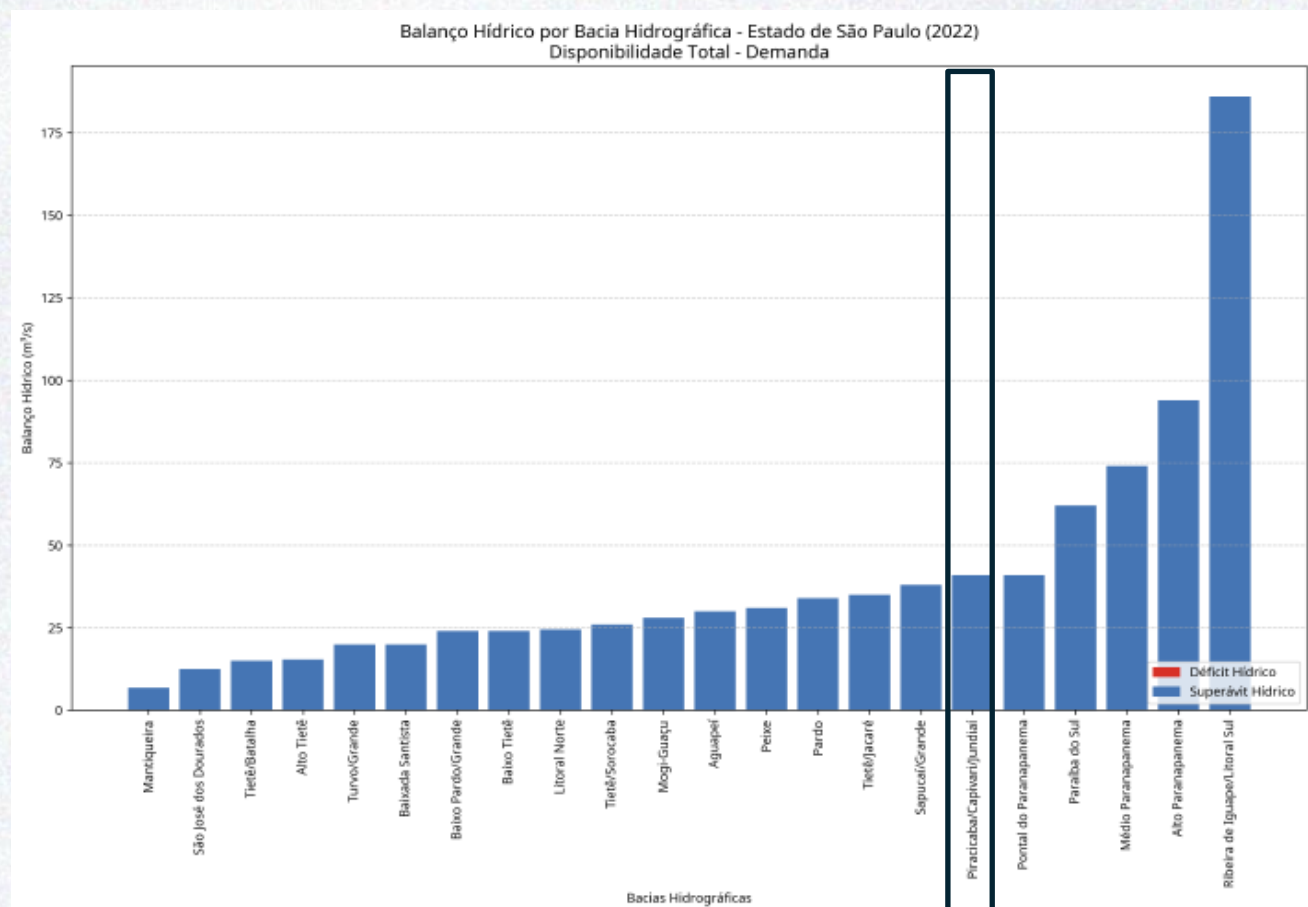
Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)



Evolução da
demanda hídrica
nas 5 bacias
mais críticas

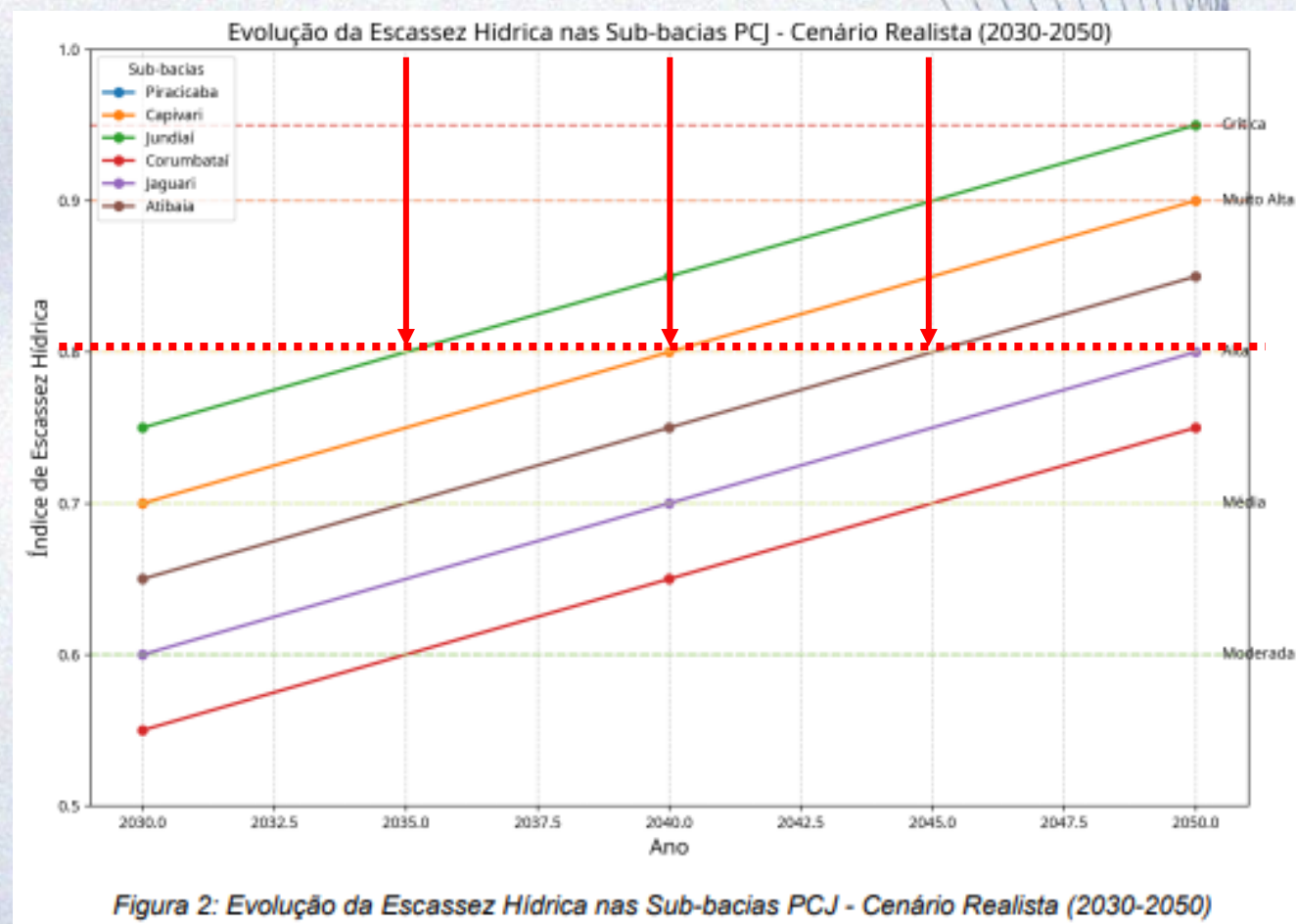
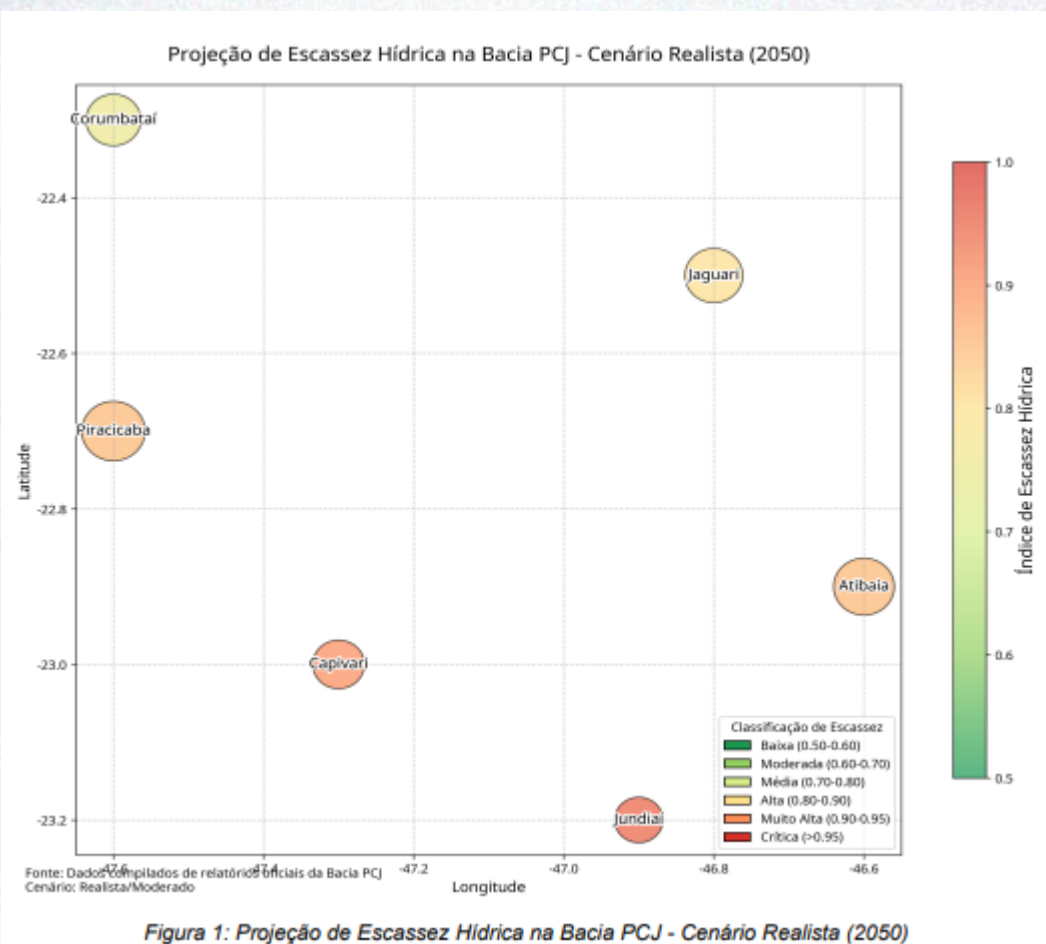


Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)



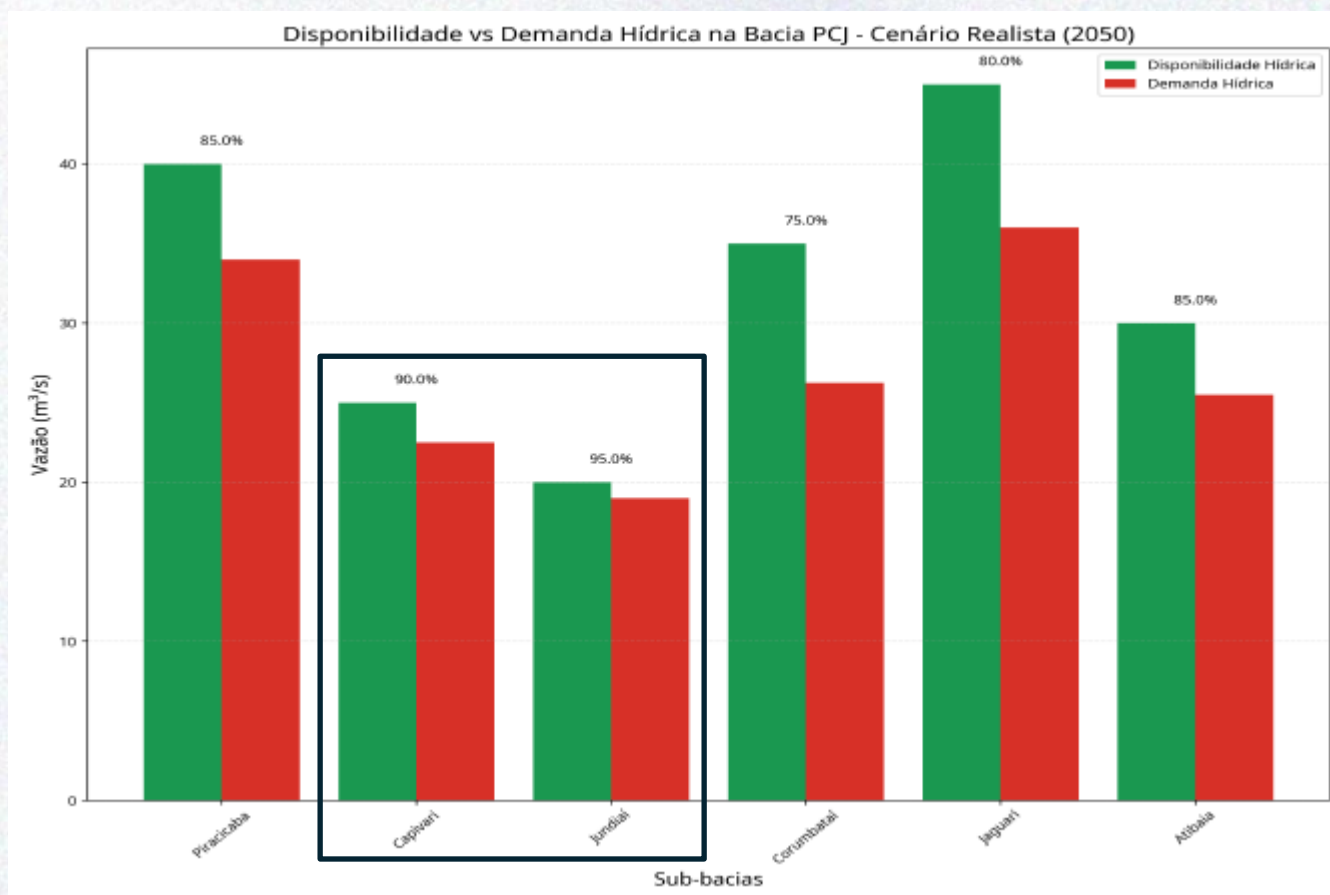
Balanço hídrico
por UGRHI

Projeção de Stress Hídrico – PCJ (2050)





Projeção de Stress Hídrico – PCJ (2050)



Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)

2.1 Coleta de Dados

Foram coletados dados históricos de disponibilidade hídrica (vazões médias) e demanda hídrica (consumo por setor) para o período de 2013 a 2022, a partir de relatórios do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH). Adicionalmente, foram utilizadas projeções climáticas da Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura, projeções demográficas da Fundação SEADE e projeções econômicas do Plano de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo (2022-2040).

2.2 Modelagem

Foram desenvolvidos modelos lineares para projetar a disponibilidade e a demanda hídrica futuras, utilizando regressão linear simples baseada nas tendências históricas observadas. Para cada bacia hidrográfica, foram criados modelos específicos que consideram suas características particulares. O índice de escassez hídrica foi calculado como a razão entre a demanda e a disponibilidade hídrica. Valores acima de 1,0 indicam situação crítica, onde a demanda supera a disponibilidade. Valores entre 0,7 e 1,0 indicam situação de alerta, e valores abaixo de 0,7 indicam situação confortável.

2.3 Cenários

Foram desenvolvidos três cenários para as projeções futuras: • Cenário Otimista: Considera menor declínio na disponibilidade hídrica e menor aumento na demanda, refletindo políticas eficientes de gestão de recursos hídricos, adoção de tecnologias de economia de água e menor impacto das mudanças climáticas. • Cenário Moderado: Segue as tendências lineares observadas no período histórico, sem alterações significativas nos padrões de disponibilidade e demanda. • Cenário Pessimista: Considera maior declínio na disponibilidade hídrica e maior aumento na demanda, refletindo políticas ineficientes de gestão, baixa adoção de tecnologias de economia de água e maior impacto das mudanças climáticas.

Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)

4.1 Bacias Críticas

As bacias hidrográficas que apresentam situação mais crítica em todos os cenários são:

- Alto Tietê: Abriga a Região Metropolitana de São Paulo e já apresenta índice de escassez superior a 1,0 atualmente. No cenário pessimista, o índice pode chegar a 1,8 em 2050.
- Piracicaba/Capivari/Jundiaí: Região altamente industrializada e com forte crescimento urbano, apresenta índice de escassez projetado de 1,5 no cenário moderado em 2050.
- Turvo/Grande: Importante região agrícola, com alta demanda para irrigação, apresenta índice de escassez projetado de 1,3 no cenário moderado em 2050.
- Tietê/Batalha: Apresenta tendência de aumento significativo da demanda, com índice de escassez projetado de 1,2 no cenário moderado em 2050.
- Mogi-Guaçu: Região com forte presença agroindustrial, apresenta índice de escassez projetado de 1,1 no cenário moderado em 2050.

4.2 Impactos Econômicos

O impacto econômico estimado da escassez hídrica até 2050 varia significativamente entre os cenários:

- Cenário Otimista: R\$ 8,2 bilhões, afetando principalmente os setores industrial (45%) e agrícola (35%).
- Cenário Moderado: R\$ 12,4 bilhões, com impactos distribuídos entre os setores industrial (48%), agrícola (32%) e urbano (20%).
- Cenário Pessimista: R\$ 15,7 bilhões, com impactos severos nos setores industrial (50%), agrícola (30%) e urbano (20%).

As bacias com maior impacto econômico projetado são Piracicaba/Capivari/Jundiaí (R\$ 1,2 bilhão), Alto Tietê (R\$ 1,1 bilhão) e Sorocaba/Médio Tietê (R\$ 1,0 bilhão) no cenário moderado.

Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)

5.1 Infraestrutura Hídrica

- Ampliação e interligação de sistemas de abastecimento, priorizando as bacias críticas.
- Construção de novos reservatórios estratégicos em regiões com alta variabilidade sazonal.
- Modernização dos sistemas de distribuição para redução de perdas físicas (atualmente em torno de 30-40%).
- Implementação de sistemas de reúso de água em escala municipal e industrial.
- Desenvolvimento de infraestrutura para captação e aproveitamento de águas pluviais.

5.2 Gestão da Demanda

- Implementação de programas de eficiência hídrica nos setores industrial, agrícola e urbano.
- Adoção de tarifas progressivas que incentivem o uso racional da água.
- Estabelecimento de metas de redução de consumo para grandes usuários.
- Incentivos fiscais para adoção de tecnologias de economia de água.
- Campanhas de conscientização e educação ambiental para a população.

5.3 Governança e Políticas Públicas

- Fortalecimento dos comitês de bacias hidrográficas e dos instrumentos de gestão.
- Aprimoramento dos sistemas de outorga e cobrança pelo uso da água.
- Integração das políticas de recursos hídricos com políticas de uso do solo, energia e desenvolvimento econômico.
- Implementação de sistemas de alerta precoce para secas e eventos extremos.
- Desenvolvimento de planos de contingência para situações de crise hídrica.

5.4 Proteção de Ecossistemas

- Recuperação e proteção de áreas de mananciais e matas ciliares.
- Criação e manutenção de áreas de proteção ambiental em regiões estratégicas para a produção de água.
- Implementação de programas de pagamento por serviços ambientais para proprietários rurais que conservem nascentes e áreas de recarga.
- Controle da poluição hídrica através de tratamento adequado de efluentes industriais e domésticos.
- Monitoramento da qualidade da água e da saúde dos ecossistemas aquáticos.

Sugestões de
ação para criação
de políticas
públicas

Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)

6.1 Setor Industrial

- Implementação de sistemas de reúso de água e circuitos fechados de refrigeração.
- Adoção de tecnologias de produção mais limpas e eficientes no uso da água.
- Desenvolvimento de planos de contingência para períodos de escassez hídrica.
- Diversificação das fontes de abastecimento, incluindo captação de águas pluviais e reúso.
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento de processos industriais com menor consumo de água.
- Estabelecimento de metas progressivas de redução do consumo de água por unidade produzida.

6.2 Setor Agrícola

- Adoção de sistemas de irrigação mais eficientes, como gotejamento e microaspersão.
- Implementação de técnicas de manejo do solo que aumentem a retenção de água, como plantio direto e cobertura vegetal.
- Seleção de culturas mais adaptadas às condições climáticas locais e com menor demanda hídrica.
- Utilização de sistemas de monitoramento da umidade do solo para otimização da irrigação.
- Construção de pequenos reservatórios para armazenamento de água em períodos chuvosos.
- Adoção de práticas de agricultura de precisão para otimização do uso de recursos.

6.3 Setor Urbano

- Implementação de programas de redução de perdas nos sistemas de distribuição.
- Adoção de equipamentos economizadores de água em edificações públicas e privadas.
- Desenvolvimento de sistemas de aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas cinzas em edificações.
- Implementação de infraestrutura verde nas cidades para aumentar a infiltração e reduzir o escoamento superficial.
- Revisão dos códigos de obras e edificações para incorporar requisitos de eficiência hídrica.
- Desenvolvimento de campanhas educativas para conscientização da população sobre o uso racional da água.

Sugestões de
ação para os
setores
econômicos
principais

Stress Hídrico – Estado de São Paulo (2013 a 2022)

8. Referências

1. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, 2013-2022.
2. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH). Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH 2024-2027). São Paulo, 2023.
3. Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado de São Paulo. Nota Técnica sobre Projeções Climáticas para o Estado de São Paulo. São Paulo, 2022.
4. Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado de São Paulo. Plano de Ação Climática e Desenvolvimento Sustentável para São Paulo (PAC 2050). São Paulo, 2022.
5. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE). Projeções Populacionais para o Estado de São Paulo até 2050. São Paulo, 2022.
6. Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo. Plano de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo (2022-2040). São Paulo, 2022.
7. Comitê das Bacias Hidrográficas do Alto Tietê. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2022. São Paulo, 2022.
8. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2022. Piracicaba, 2022.
9. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Estudo sobre Disponibilidade Hídrica Subterrânea no Estado de São Paulo. São Paulo, 2021.
10. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. Brasília, 2021.
11. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Sexto Relatório de Avaliação (AR6) - Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. 2022.
12. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Governança dos Recursos Hídricos no Brasil. Paris, 2021.

Desafios e Limitações

- Qualidade de dados: Lacunas históricas, poucos pontos de monitoramento
- Validação: Necessidade de confronto com dados independentes
- Interpretabilidade: "Caixa preta" do deep learning vs. transparência necessária
- Computação: Custo de infraestrutura para processar grandes volumes

Oportunidades Futuras e Próximos Passos

- Internet das Coisas (IoT): Mais sensores em tempo real
- Big Data: Integração com dados de outras fontes (meteorologia, agricultura)
- Computação em Nuvem: Escalabilidade de modelos
- Tomada de Decisão Colaborativa: Plataformas de IA para comitês de bacias
- Regulamentação: Incorporação de resultados em políticas públicas



**VIII Workshop de
Águas Subterrâneas**
dos Comitês PCJ

Inovações na Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos

Realização:

CT-AS
Comitê Técnico de
Águas Subterrâneas



Apoio:



CT-Indústria
Comitê Técnico de Uso e
Gerenciamento de Água na Indústria

CT-MH
Comitê Técnico de
Monitoramento Hidrológico

AgSolve
GeoAcqua

edisonda



Sigesp



OBRIGADO!

Marcio Alberto, Geól. Dr.

11 94970-2592

mralberto@geoinovacoes.com.br

www.geoinovacoes.com.br