

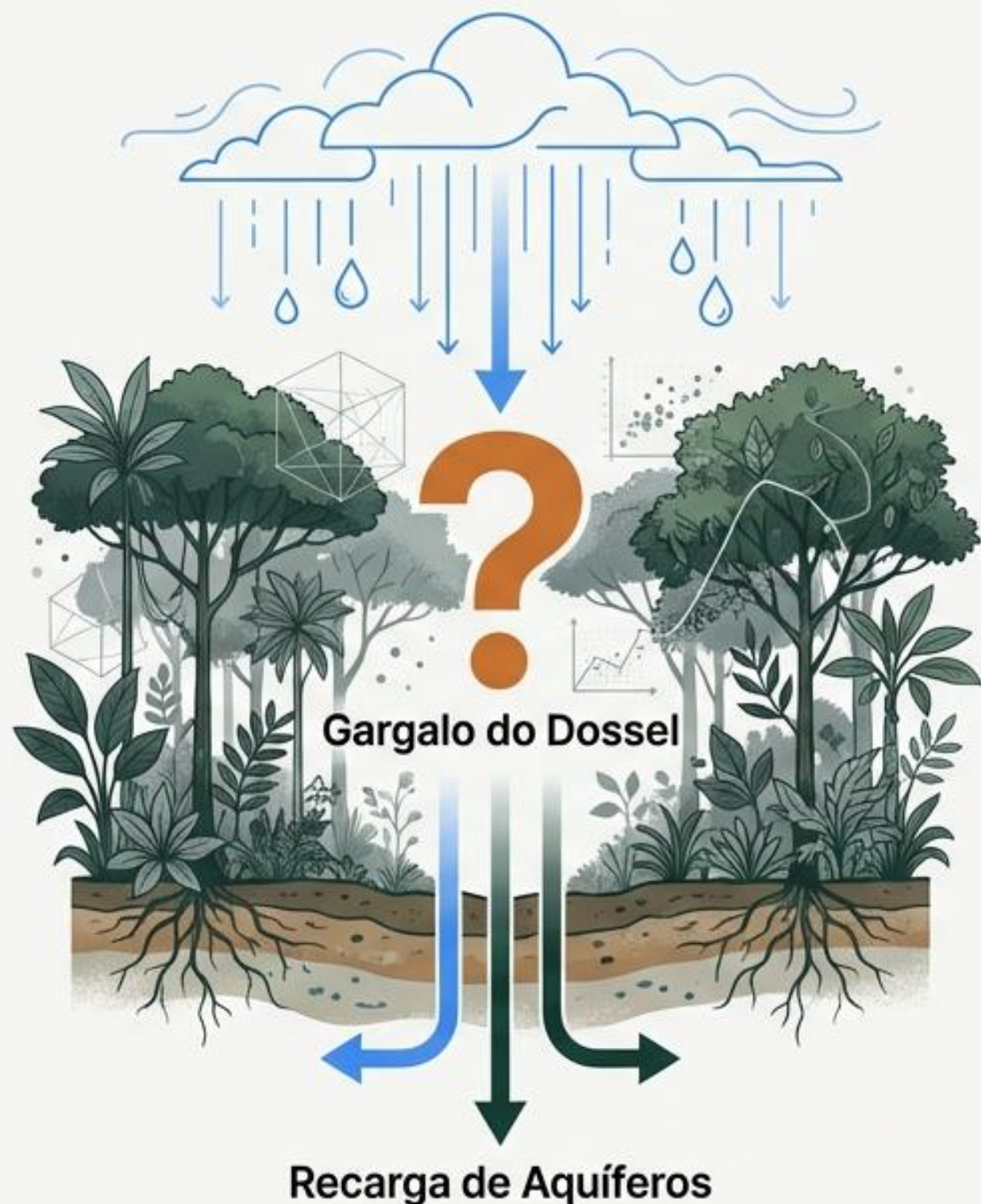
Decodificando a Floresta: O Paradigma PaML na Gestão Hídrica

Modelagem da Precipitação com Inteligência Artificial na Mata Atlântica



Alejandra Bustillos Vega
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

A Crise Invisível da Segurança Hídrica



A Ameaça

A Mata Atlântica abastece **125 milhões** de pessoas, mas prever a Precipitação Efetiva (a água que realmente recarrega os aquíferos) é um desafio cego.



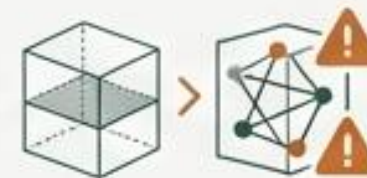
O Problema dos Dados

Em florestas densas tropicais, dados sofrem falhas constantes por quedas de energia e entupimentos.



A Falha dos Modelos

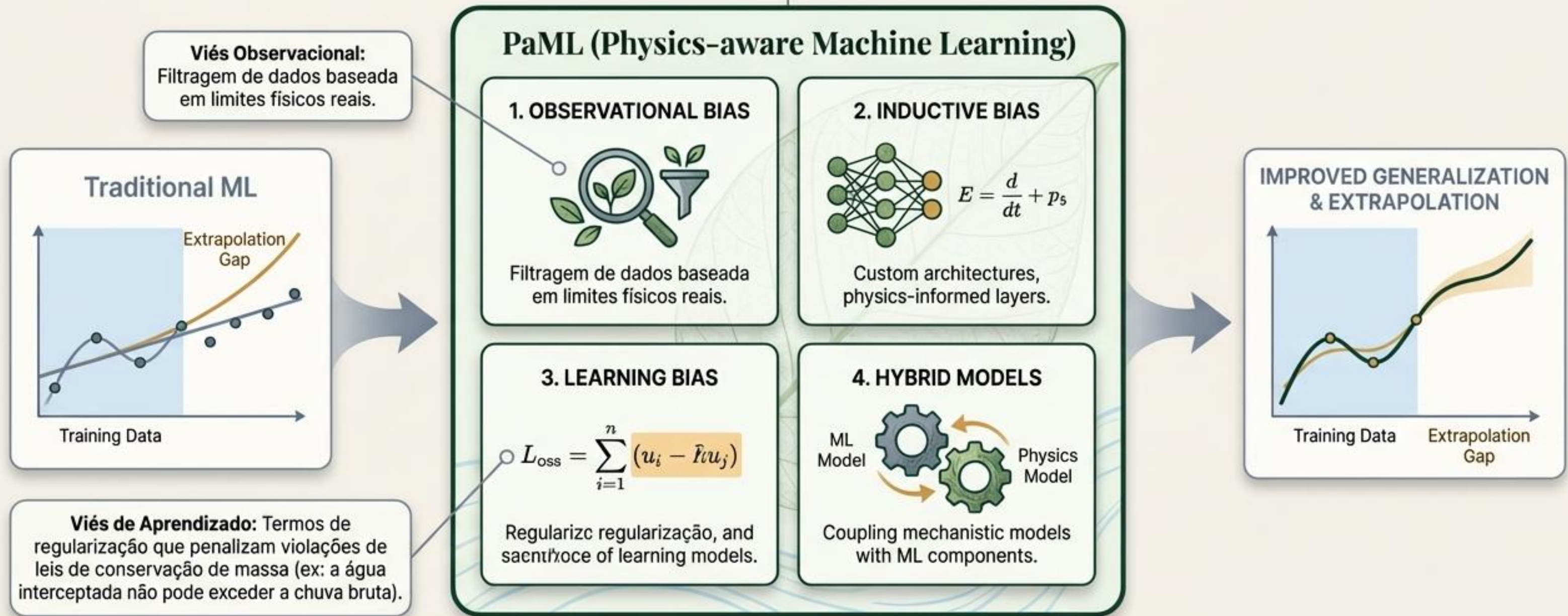
Modelos físicos clássicos são estáticos e não conseguem lidar com as **mudanças sazonais** da floresta e eventos climáticos extremos.



Physics-aware Machine Learning (PaML) Paradigm

O Conceito Central

"A IA não substitui a hidrologia física; ela funde o conhecimento mecânico com a capacidade de reconhecer padrões não lineares."



O Laboratório Vivo: A Manhã

11+ Anos

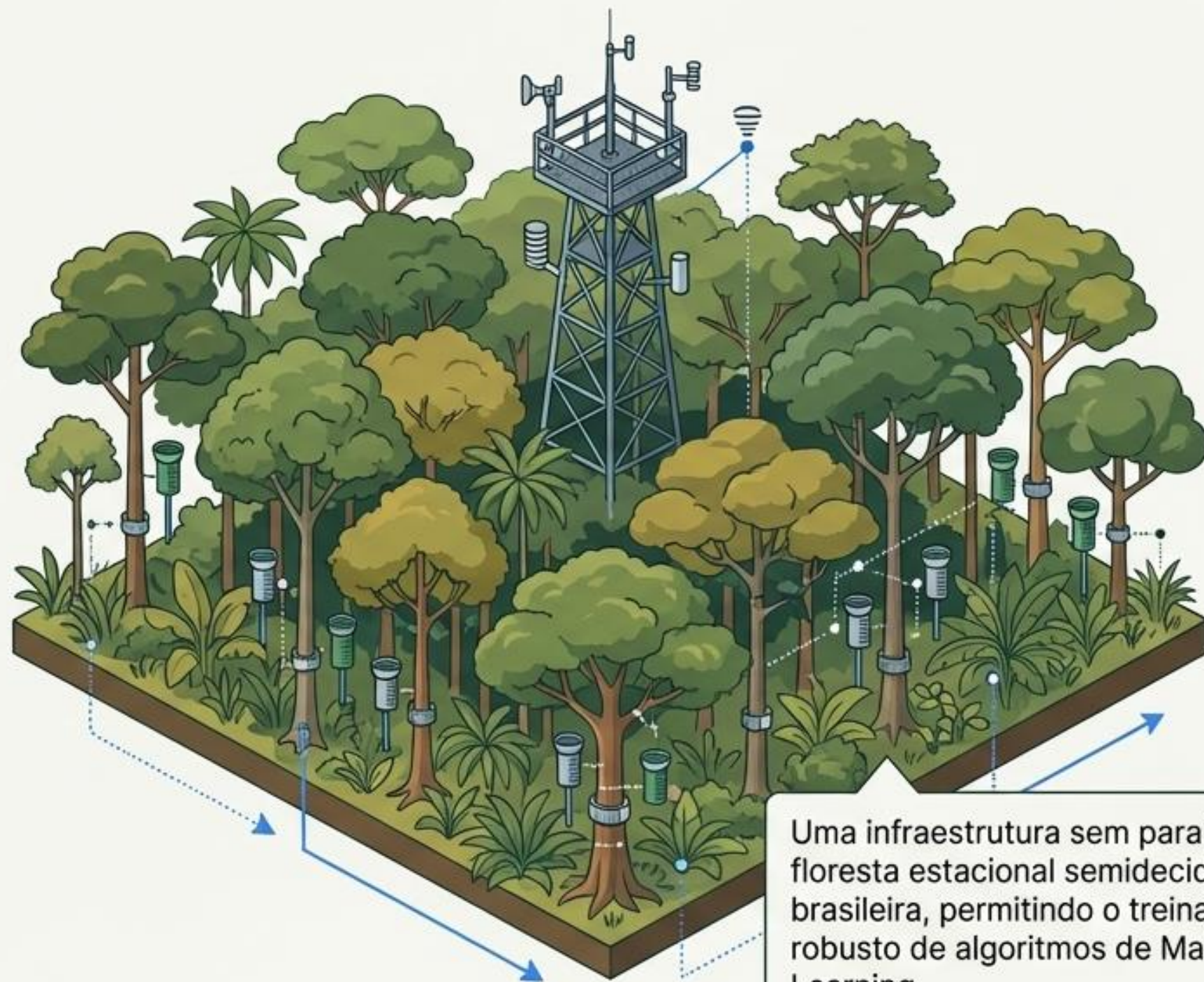
Série temporal contínua de alta resolução (2012-2023).

32 Sensores Espaciais

Pluviômetros de sub-bosque capturando a heterogeneidade espacial (throughfall).

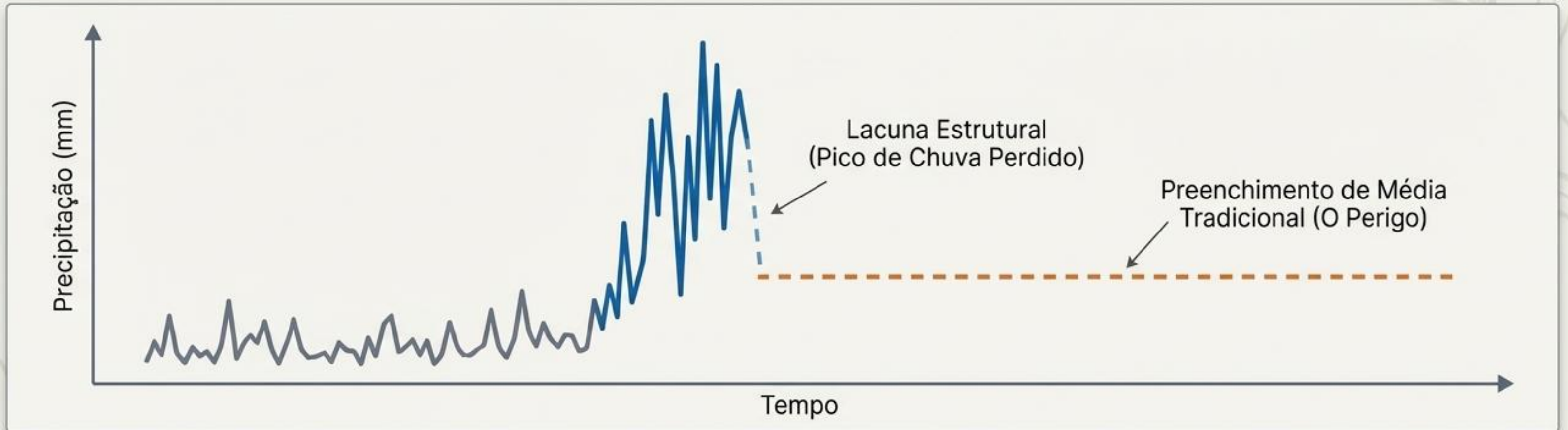
32 Árvores Monitoradas

Medição exata do escoamento pelo tronco (stemflow) em 15 espécies distintas.



Uma infraestrutura sem paralelo na floresta estacional semidecidual brasileira, permitindo o treinamento robusto de algoritmos de Machine Learning.

Eixo 1: O Paradoxo dos Dados Tropicais



A Realidade Operacional

Chove muito, mas a infraestrutura falha. Entupimentos orgânicos e picos de energia criam lacunas estruturais.



O Perigo da Média

Preencher falhas com métodos estatísticos tradicionais (Regressão Linear, IDW) destrói o registro dos eventos extremos (innovative outliers).

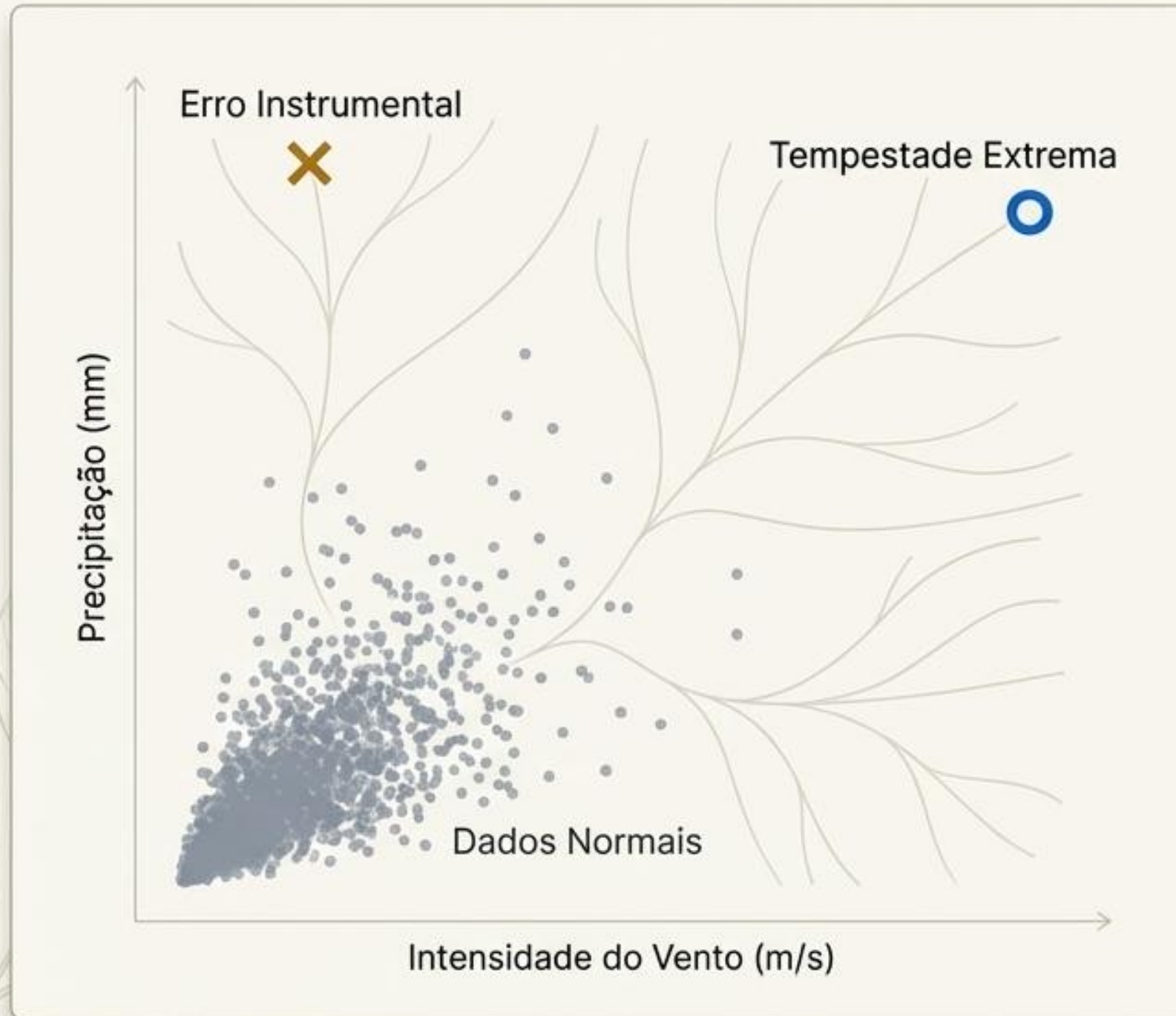


A Consequência

Subestimar eventos extremos resulta em modelos de prevenção de enchentes perigosamente otimistas.



Separando o Ruído da Tempestade com IA



Isolation Forest (iForest)

Isola anomalias baseado no comprimento do caminho em árvores de decisão. Altamente eficaz para a distribuição assimétrica da chuva, lidando bem com os frequentes zeros da série.

Local Outlier Factor (LOF)

Baseado em densidade local. Útil, mas computacionalmente pesado e excessivamente sensível em séries de alta frequência.

🍃 O Veredito

iForest purifica a base de dados em múltiplas dimensões (chuva, umidade, vento) sem amputar a variabilidade real da natureza.

Reconstruindo a Memória da Chuva



Eixo 2: O Gargalo do Dossel e a Sazonalidade

Estação Chuvosa

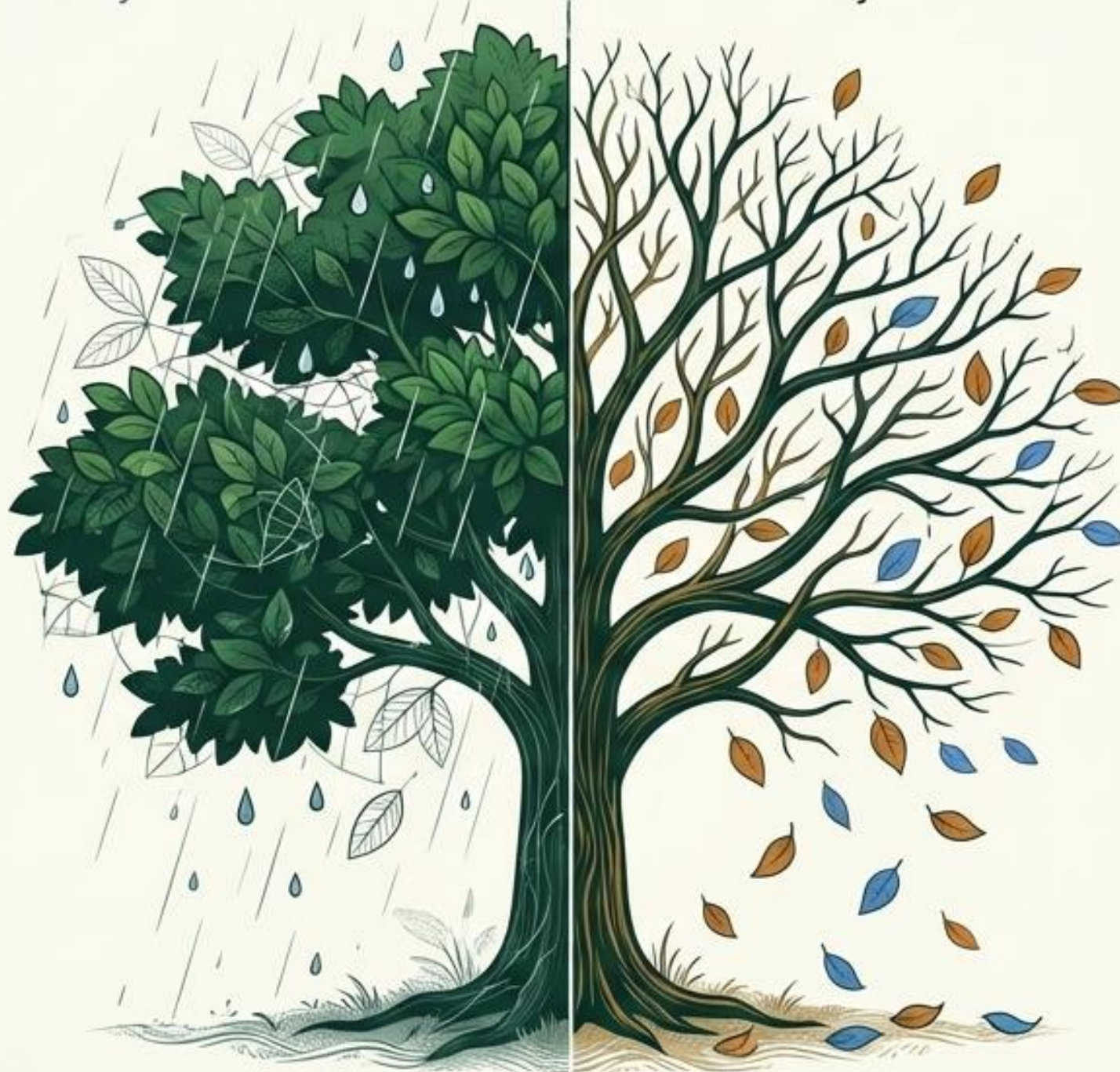
Estação Seca

A Limitação Clássica

Modelos analíticos (como Gash e Rutter) assumem que parâmetros de interceptação são constantes o ano todo.

A Realidade Física

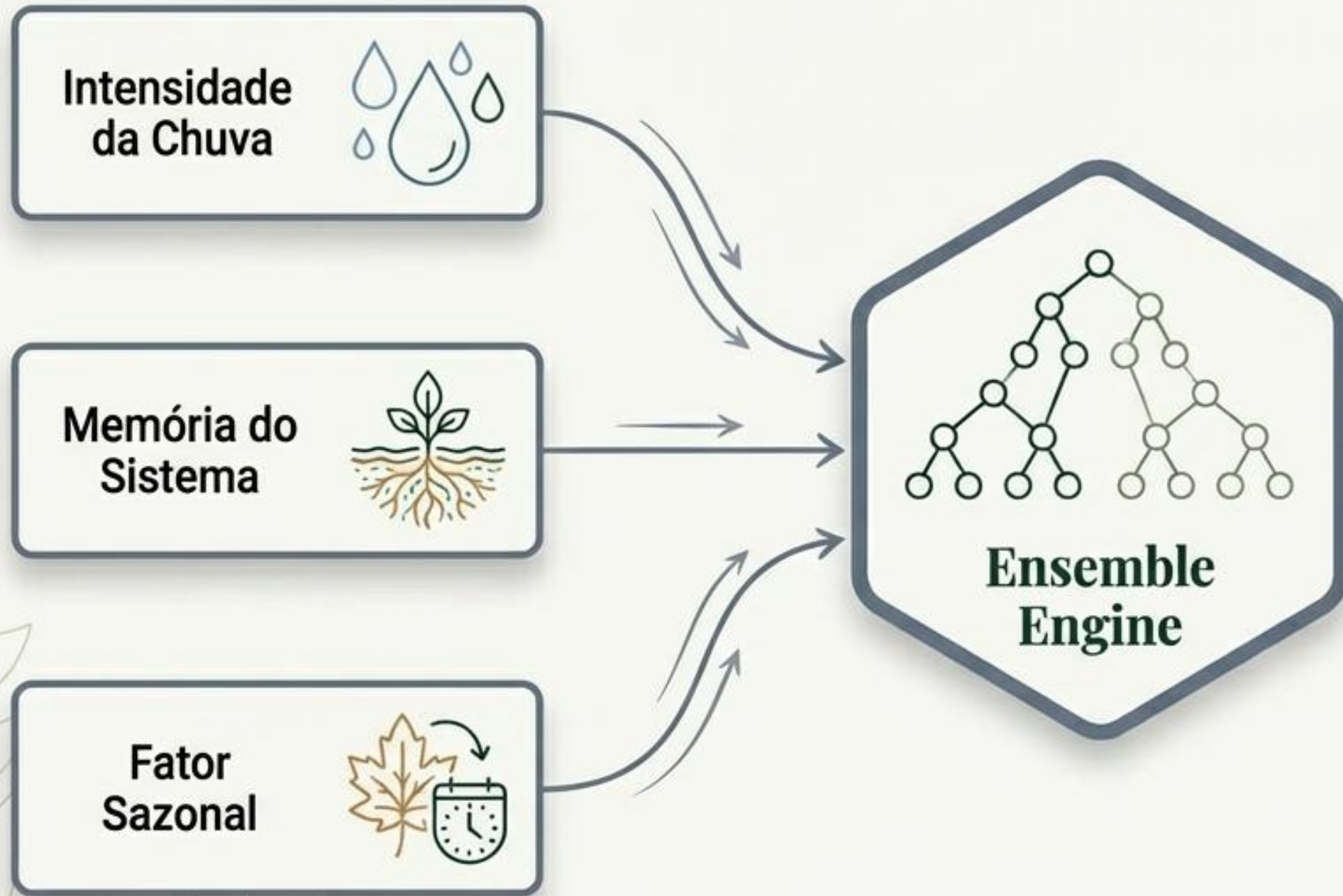
Na floresta estacional semidecidual, até 50% das espécies perdem folhas na seca. A arquitetura da copa muda radicalmente.



O Erro Sistemático

Usar uma fórmula estática gera superestimativa na seca e subestimativa na chuva, distorcendo o balanço hídrico.

Capturando a Dinâmica Viva da Floresta



Por que Ensembles?

Algoritmos baseados em árvores de decisão não exigem equações rígidas. Eles aprendem as não-linearidades e os limites físicos diretamente dos dados.

Memória Hidrológica

O modelo entende que o impacto de uma chuva depende de quão molhada a floresta já estava pelos eventos anteriores.

Sem Recalibração Manual

A IA adapta os parâmetros de escoamento e interceptação automaticamente para cada estação do ano.

Abrindo a Caixa Preta com SHAP



Interpretabilidade

A IA não apenas entrega um número; ela explica como chegou lá (técnica SHAP - SHapley Additive exPlanations).

Descoberta Científica

O modelo provou que a memória da floresta (o intervalo sem chuva e o volume das últimas chuvas) modula ativamente a capacidade de retenção do dossel.

Física Validada

A rede neural descobriu de forma autônoma a mesma física assintótica de saturação documentada em campo, validando o paradigma PaML.

A Validação Inflexível: Evitando a Decoreba

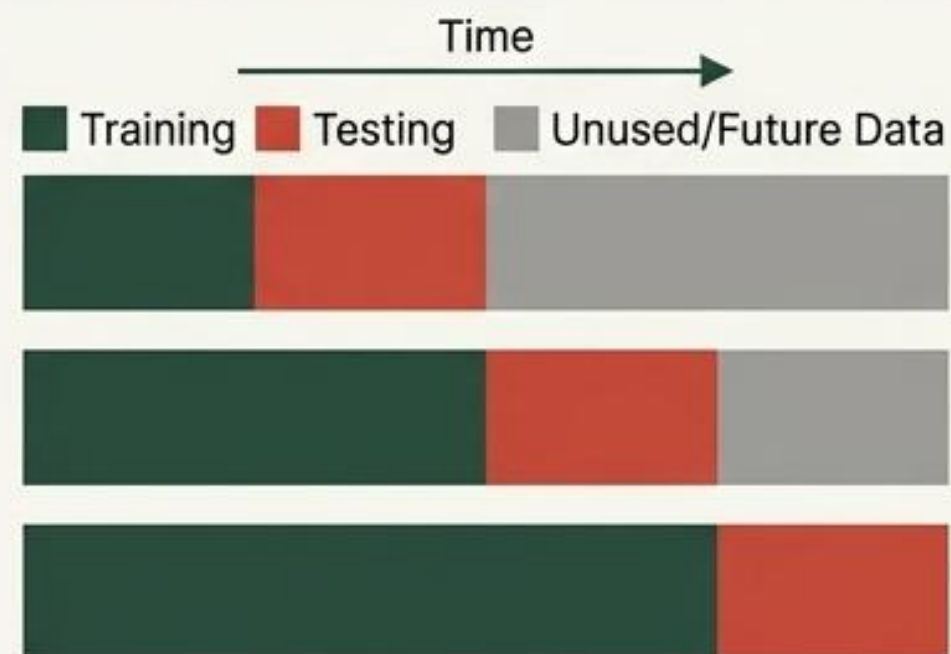
O Risco do Overfitting: Em séries temporais de chuva, a validação aleatória tradicional cria vazamento de dados (a IA decora a tempestade).

A Random K-fold CV



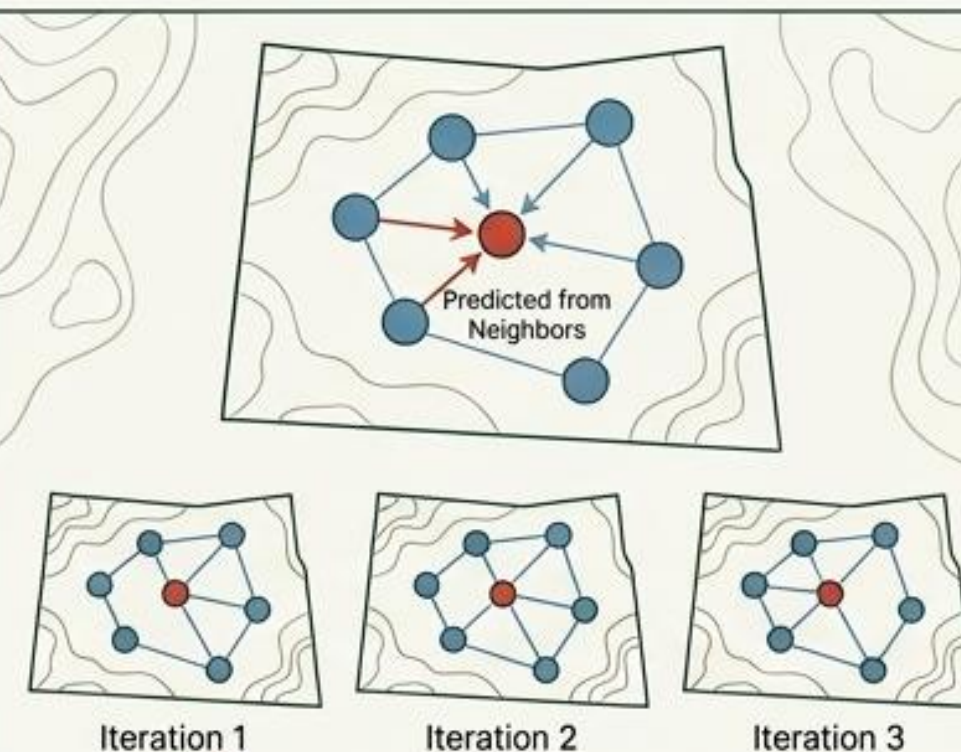
Data shuffled, order ignored.
Not suitable for temporal or spatial data.

B Temporal Validation (TSCV)



Validação Walk-Forward. A IA treina estritamente no passado para prever o futuro.

C Spatial Validation (LOPO)



Leave-One-Point-Out. A IA tenta prever a água em um ponto da floresta onde nunca viu um sensor.

Conclusão: O modelo generaliza a física, não apenas os dados locais.

Da Ciência à Aplicação Operacional

Precipitação Efetiva em Tempo Real



Precipitação Efetiva
em Tempo Real

O Gargalo Histórico

Medir a chuva sob a floresta exige equipamentos caros, frágeis e de manutenção exaustiva.

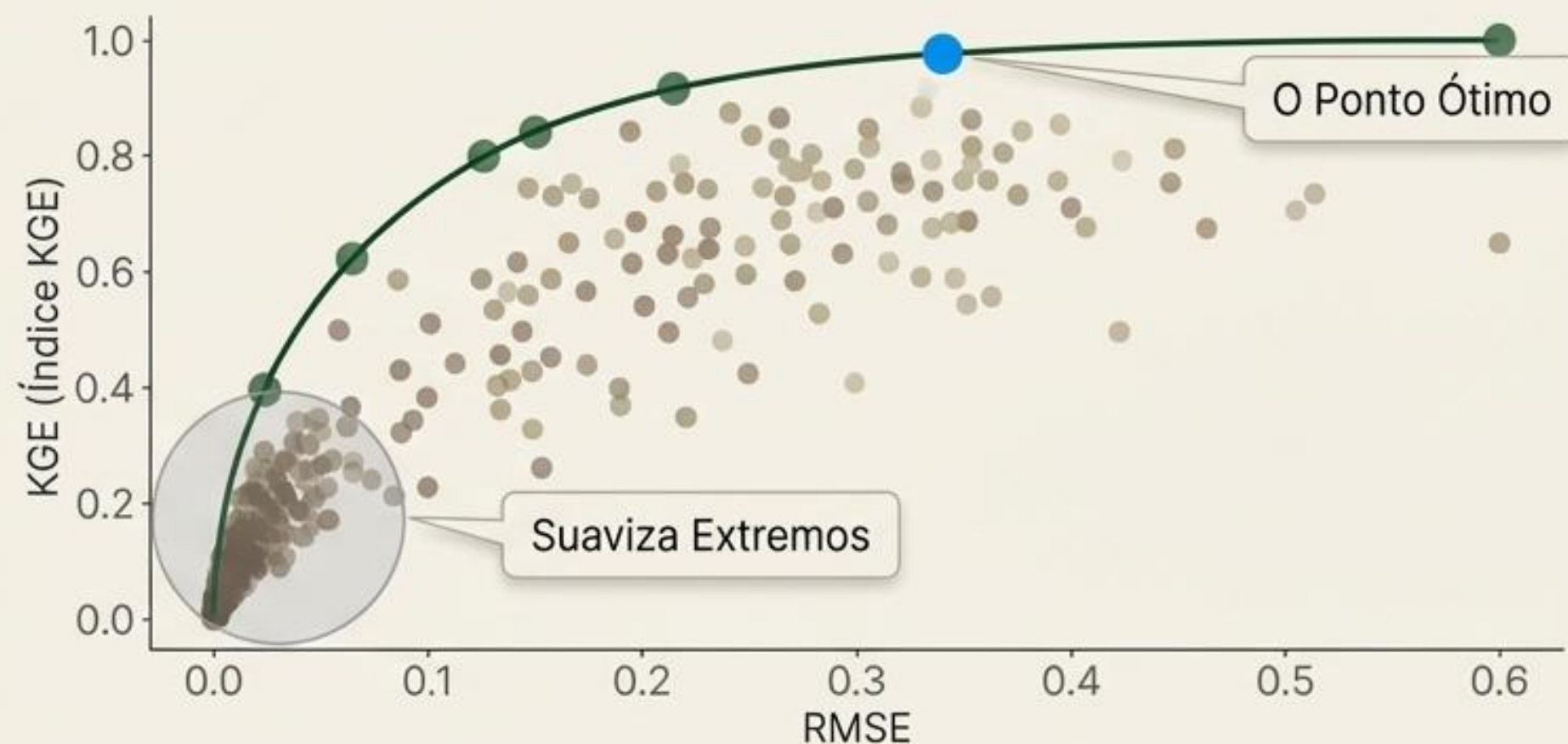
A Grande Vitória

O algoritmo treinado agora estima a água real que atinge o solo usando apenas dados climáticos padrão de superfície.

Gestão Imediata

Permite a implementação operacional em mais de 5.000 bacias florestais brasileiras que não possuem sensores de sub-bosque.

A Fronteira de Pareto: Indo Além do RMSE



A Armadilha do RMSE

Otimizar modelos apenas pelo erro médio esmaga os picos. O modelo acerta a média, mas erra feio durante a tempestade.

Índice KGE

Avaliamos os modelos pela Eficiência de Kling-Gupta, que equilibra correlação, viés e variabilidade.

Por que Importa?

Preservar a variabilidade geométrica garante que os eventos de ponta (os grandes responsáveis por inundações e recargas críticas) não sejam ignorados.



Impacto Socioambiental e Segurança Hídrica no Antropoceno

Gestão de Recursos Hídricos

Modelos validados oferecem subsídios vitais para concessão de outorgas e cálculo preciso do balanço hídrico regional.

Resiliência Climática

Permite prever como as florestas irão responder (em recarga e interceptação) frente ao aumento de eventos extremos projetados.

Democratização da Ciência

Estruturas de código aberto capacitam gestores locais a operar hidrologia de fronteira sem infraestrutura milionária.



Escutando a Natureza Através dos Dados

1. **Dados Resgatados:** Falhas sanadas respeitando a física convectiva extrema.
2. **Interceptação Decodificada:** Fim das equações estáticas; a IA capta a memória e a sazonalidade viva da floresta.
3. **Hidrologia Operacional:** A previsão de água disponível tornou-se viável sem a dependência de sensores de alto custo sob o dossel.

"A natureza não faz perguntas, ela apenas registra. A Hidrologia Orientada por Dados é a nossa melhor ferramenta para escutá-la."