Introdução às políticas e à regulação climáticas no contexto das aplicações de IA

Vaibhav Chugh
Pallavi Das

5 de agosto de 2026

© Council on Energy, Environment and Water, 2026

Estrutura da aula

(15 min) Parte 1: entendimento básico, escopo e implicações

- por que as políticas existem, o que visam, a disputa por equidade, os trade-offs recorrentes

(10 min) Parte 2: panorama, atores, desdobramentos e marcos em diferentes contextos globais.

- Grandes pactos globais, instituições multilaterais e mecanismos de financiamento e execução
- Políticas climáticas domésticas na Índia

(25 min) Parte 3: implicações para inovação, implantação e tomada de decisão

- Entender como as políticas e a regulação climáticas moldam a inovação, a implantação e a tomada de decisão, na teoria e na prática, sobretudo na área de IA e clima.

Parte 1: um modelo mental de política climática



Por que as políticas existem?

Para proteger um bem público global
Um clima estável é um bem público global. Ninguém pode ser excluído dele, e o benefício de um país não reduz o de nenhum outro.



Precificar uma externalidade negativa
As emissões de um poluidor prejudicam outros (calor, perda de safra), mas esse custo recai sobre terceiros, não sobre o poluidor, e por isso nunca entra em sua decisão.

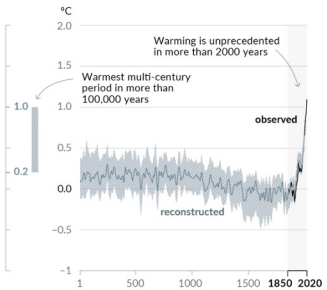


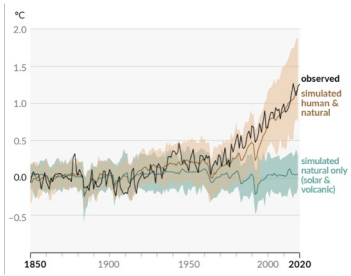
Ação coletiva / problema do carona
todos ganham quando os outros agem, então todos esperam que outro aja.



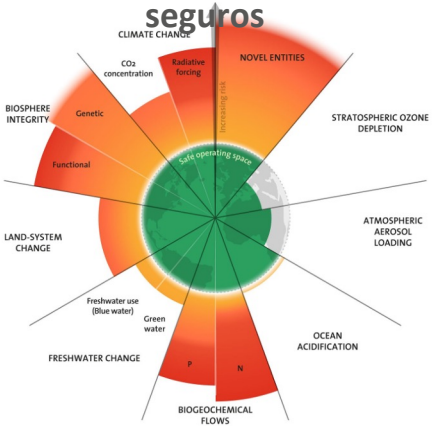
Por que precisamos de políticas climáticas?

Mudanças observadas

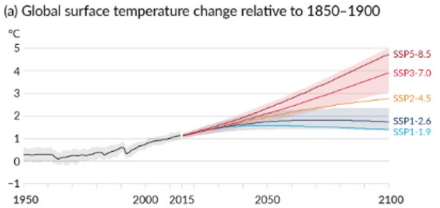


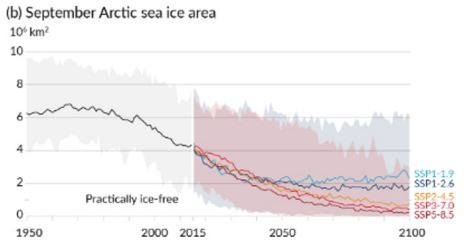


Limites seguros



Mudanças projetadas





https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/

O que as políticas visam diante da mudança climática?

Mitigação

Reduzir/evitar emissões

Renováveis, eficiência, precificação de carbono

Historicamente o enquadramento padrão do Norte Global

Adaptação

Gerir impactos inevitáveis como o aumento da temperatura e os eventos extremos

Soluções baseadas na natureza; seguro paramétrico; plano de ação contra o calor

Questão existencial para o Sul exposto

Meios de implementação e instrumentos de política

Financiamento

Tecnologia

Capacitação

Instrumentos de política

- **Baseados em mercado/preço** — impostos sobre carbono, sistemas de comércio de emissões (ETS/cap-and-trade), eliminação de subsídios aos combustíveis fósseis.
- **Regulatórios (comando e controle)** — padrões de emissão, normas de eficiência, proibições/eliminação gradual (p. ex. carvão, veículos a combustão), códigos de obras.
- **Fiscais/financeiros** — subsídios, créditos fiscais, títulos verdes, financiamento misto, tarifas feed-in, incentivos atrelados à produção.
- **Informativos/voluntários** — rotulagem, divulgação (p. ex. relato de riscos climáticos), compromissos corporativos de emissões líquidas zero.

Trade-offs das políticas

- **Custo vs. velocidade**
  - Imposto sobre carbono = ação rápida, regressiva, politicamente frágil.
  - Padrões = mais lentos, duradouros, embutidos em cronogramas

- **Escopo vs. profundidade**
  - Paris inclui todos os países, mas tem fiscalização fraca.
  - Mandatos locais (cidades, empresas) têm força, mas não ganham escala

- ***Por que isso importa**:* países escolhem instrumentos diferentes porque partem de condições diferentes. Não existe uma única política “certa”

Governança das políticas

Internacional
Tratados e normas definem a direção

Nacional
Governos assumem compromissos vinculantes e desenham políticas domésticas

Subnacional
Estados, províncias e cidades muitas vezes avançam mais rápido e implementam na ponta

Atores não estatais
Empresas, investidores e sociedade civil moldam e implementam as políticas

Um orçamento de carbono finito, e quem pode usá-lo

~876 $GtCO_2$

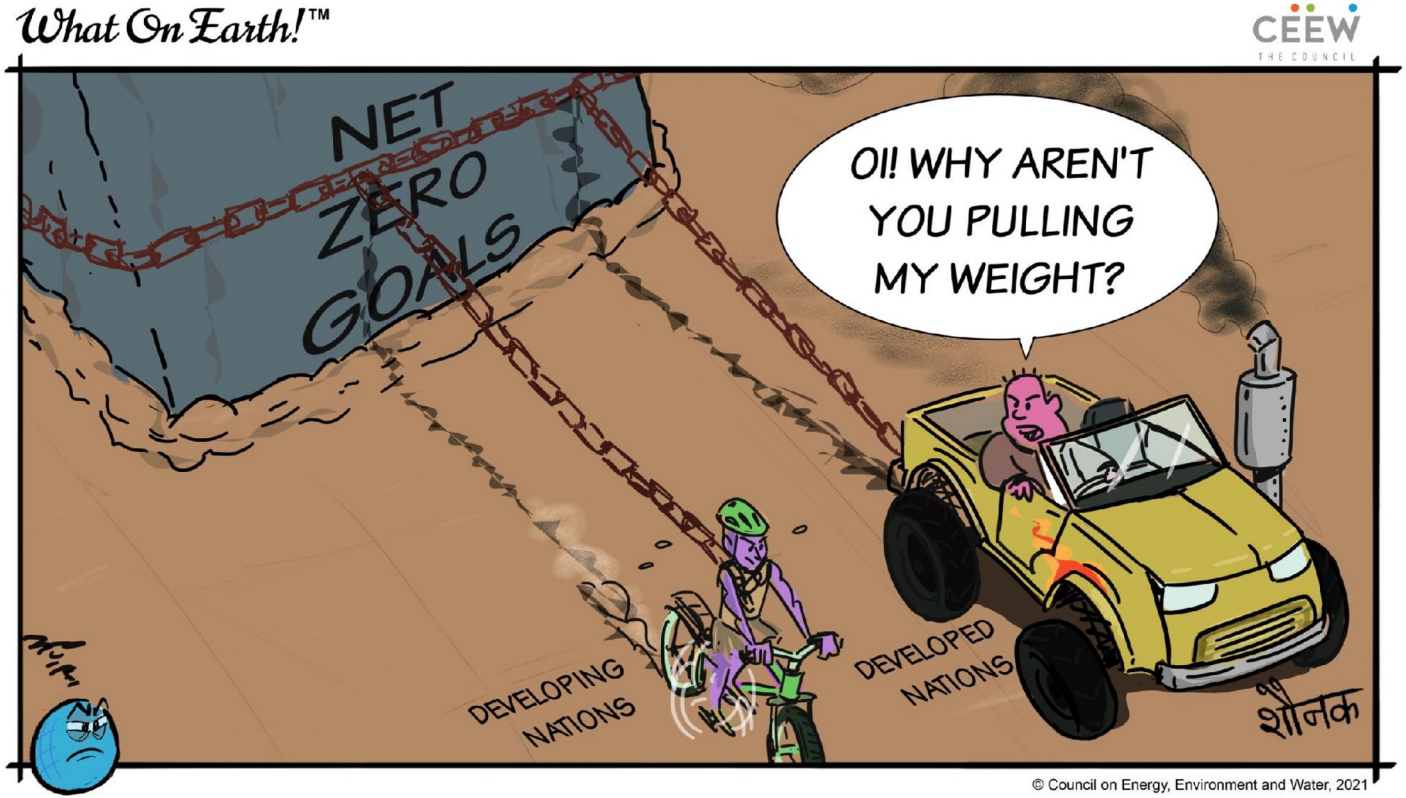
Orçamento de carbono finito para ficar abaixo de 2 °C

Quem pode usar o espaço restante é A disputa distributiva da política climática

- **RCDR-CR:** responsabilidades comuns porém diferenciadas e respectivas capacidades (UNFCCC, 1992): problema compartilhado, deveres diferenciados por responsabilidade e capacidade
- **Responsabilidade histórica:** as emissões acumuladas importam. EUA, UE e países em desenvolvimento têm emissões históricas muito altas
- **Espaço de carbono:** dividir o orçamento por emissões atuais? per capita? acumuladas? Cada resposta implica obrigações radicalmente diferentes

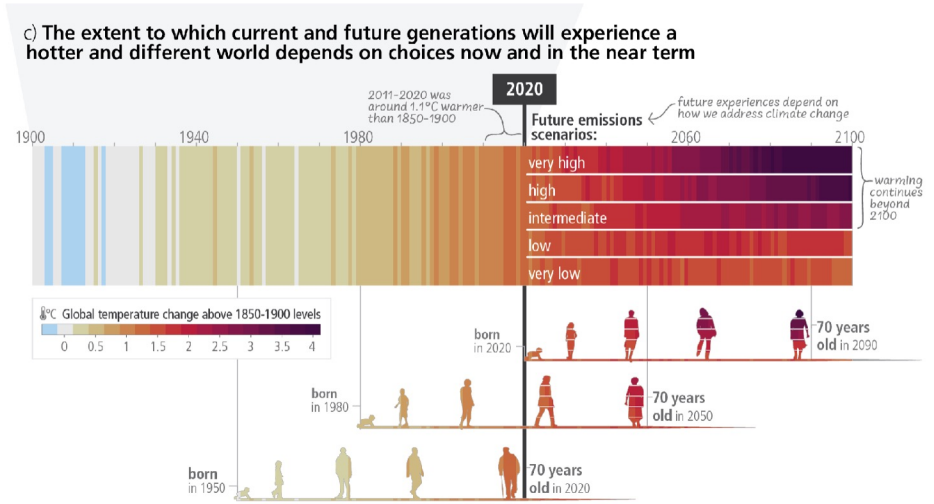
https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-economics-and-policy/carbon-clock/remaining-carbon-budget Acesso em 24 jul. 2026

Parte 2: o panorama das políticas climáticas



O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: mantendo a ciência à frente

- **Ele avalia, não pesquisa**. O IPCC não produz ciência nova: revisa e sintetiza milhares de estudos publicados para estabelecer o que se sabe, com que grau de confiança e onde estão as incertezas.
- **Governos e cientistas juntos**. Os relatórios são escritos por centenas de autores especialistas voluntários, e o Sumário para Formuladores de Políticas é aprovado linha a linha por todos os governos membros.
- **Três grupos de trabalho.** GT1 (ciência física), GT2 (impactos, adaptação, vulnerabilidade), GT3 (mitigação). Os ciclos de avaliação duram cerca de 6–7 anos; o Sétimo Relatório de Avaliação (AR7) está em andamento



https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/figures/summary-for-policymakers/IPCC_AR6_SYR_SPM_Figure1.png

A UNFCCC existe para romper esse impasse, levando todos a se comprometer juntos, publicamente e de forma repetida

Papel da **UNFCCC** (e do Acordo de Paris sob ela):

- Ela reúne **quase todos os países à mesa,** para que ninguém corte sozinho enquanto outros pegam carona
- Ela torna os **compromissos visíveis e públicos** (NDCs), dando previsibilidade à indústria e responsabilizando os países
- Ela promove **reuniões periódicas** (as COPs anuais e Bonn no meio do ano) para manter o diálogo, destravar negociações e cobrar os compromissos



Grupos de negociação

- **Grupo Africano** – um dos cinco grupos regionais de negociação da ONU, com 54 Estados membros
- **Grupo Árabe** – formalmente a Liga dos Estados Árabes, organização regional criada em 1945
- **BASIC (Brasil, África do Sul, Índia e China)** – coalizão de quatro grandes economias emergentes
- **União Europeia (UE)** – os 28 Estados membros da UE, com negociações conduzidas pela DG Clima
- **Grupo dos 77 + China (G77 + China)** – grande aliança de 134 países em desenvolvimento
- **Países menos desenvolvidos (PMDs)** – grupo dos países mais pobres do mundo, que muda conforme as economias evoluem
- **Países em desenvolvimento afins (LMDC)** – grupo de países em desenvolvimento que representa 3,5 bilhões de pessoas, focado em garantir que os países ricos arquem com a maior responsabilidade pelo combate à mudança climática
- **Aliança dos Pequenos Estados Insulares (AOSIS)** – grupo de 44 pequenas ilhas e Estados costeiros de baixa altitude
- **Grupo Guarda-Chuva** – grupo transcontinental de países, muitos vistos como pouco entusiasmados com o clima no passado recente, embora em muitos casos essas posições estejam mudando

Fonte: https://www.carbonbrief.org/interactive-the-negotiating-alliances-at-the-paris-climate-conference/

Arquitetura internacional: a mudança de regime (da coerção à pressão entre pares)

1992 UNFCCC

O marco. Define princípios, incluindo RCDR-CR, mas sem metas vinculantes

1997 QUIOTO

De cima para baixo: metas vinculantes apenas para países do Anexo I (ricos).

2015 PARIS

De baixo para cima: cada país define sua própria NDC, revista por um mecanismo de ambição crescente e por um balanço global a cada 5 anos.

Como o pacto vincula um país: a NDC da Índia

- Corte de 47% na intensidade de emissões até 2035 em relação a 2005
- 60% de capacidade elétrica não fóssil até 2035 em relação a 2005
- 3,5 a 4,0 bilhões de toneladas de CO_2 equivalente via cobertura florestal e arbórea até 2035 (em relação a 2005)

https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2245209&reg=3&lang=1

Nível nacional: economias diferentes, ferramentas diferentes

A lição: não existe uma única "política climática". O que um país usa depende de sua riqueza, de seu perfil de emissões e de sua política.

O modelo "regular + precificar" dos países de alta renda

- **UE** — regular + precificar: Pacto Ecológico / Fit for 55, EU ETS (cap-and-trade), CBAM (taxa de fronteira), Taxonomia da UE

O restante do Sul Global: mesma lógica, pressões diferentes

- **China** — escala dirigida pelo Estado: ETS nacional (2021, setor elétrico), metas de "duplo carbono" (pico antes de 2030, neutralidade antes de 2060) e domínio industrial em solar, baterias e VEs
- **Índia** — subsídio + modo missão (implantar primeiro, precificar depois): National Solar Mission, PM-KUSUM (bombas solares), PM Surya Ghar (telhados, 2024), FAME (VEs), LT-LEDS.
- **Brasil** — o modelo de *uso da terra*: sua mitigação é dominada pelo desmatamento da Amazônia, não pela energia; sucesso das políticas = fazer valer a proteção florestal. Também mantém um dos programas de biocombustíveis mais antigos do mundo (etanol).
- **África do Sul** — o modelo de *transição justa*: muito dependente do carvão e caso-teste da **Parceria para uma Transição Energética Justa (JET-P)**, um acordo com vários doadores para financiar uma saída gradual do carvão sem colapsar os meios de vida das regiões carboníferas.
- **Indonésia / Vietnã** — também receptores de **JET-P**: dependentes do carvão, de crescimento rápido, negociando transições financiadas externamente, onde financiamento climático e política nacional se encontram na prática.
- **Quênia / Etiópia** — o modelo de *salto tecnológico / ricos em renováveis*: redes já quase totalmente renováveis (geotérmica, hídrica), então sua fronteira é acesso e resiliência, não descarbonizar uma rede suja.

Regimes transversais: a fronteira que cruza fronteiras

O que faz o CBAM?

O mecanismo de ajuste de carbono na fronteira da UE taxa o carbono incorporado em importações: aço, alumínio, cimento, fertilizantes, eletricidade, hidrogênio.

A fase definitiva (com pagamento) começou em 1º de janeiro de 2026; multa de €100/tonelada em caso de déficit. Ampliação para ~180 produtos derivados proposta para 2028.

Objetivo: impedir o "vazamento de carbono", ou seja, empresas se mudando para fugir do preço do EU ETS.

O debate que ele provoca…

Para exportadores indianos e de outros países do Sul Global, o CBAM é um custo direto na fronteira da UE.

Visto de Délhi:

"protecionismo verde": um bloco rico exportando seus custos climáticos para produtores mais pobres.

Visto de Bruxelas:

uma medida legítima contra vazamento que nivela o campo de jogo.

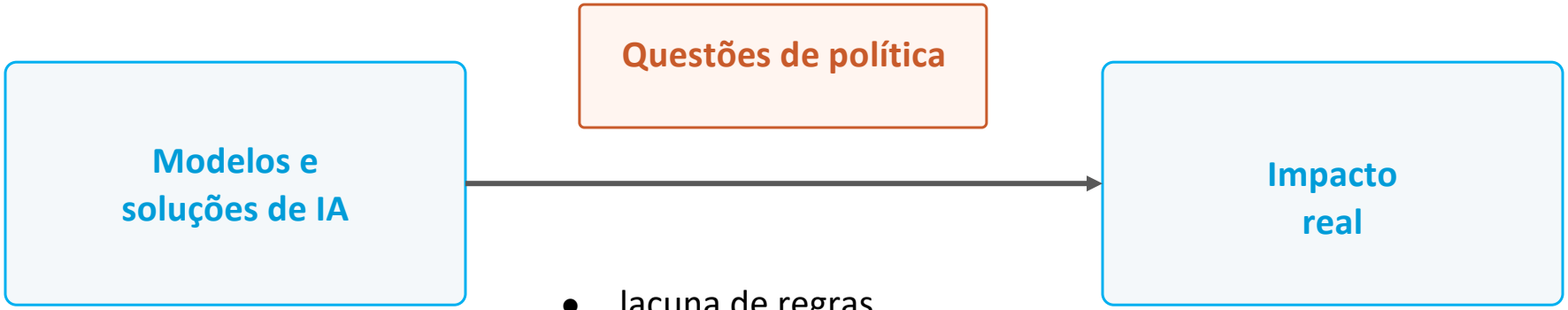
O melhor exemplo de um instrumento ocidental que remodela as escolhas do Sul Global, hoje contestado na OMC.

Parte 3: implicações para inovação, implantação e tomada de decisão

Que papel as políticas têm no clima e na IA?

As políticas são estruturadas e formais, lentas mas responsáveis, e funcionam melhor quando os problemas são bem compreendidos e estáveis

A IA é exploratória, iterativa e flexível, adequada a desafios ambíguos ou em evolução



- lacuna de regras
- na infraestrutura de dados
- responsabilização
- capacidade de agir

A mesma IA apresentada para cortar emissões é ela própria uma emissora não regulada

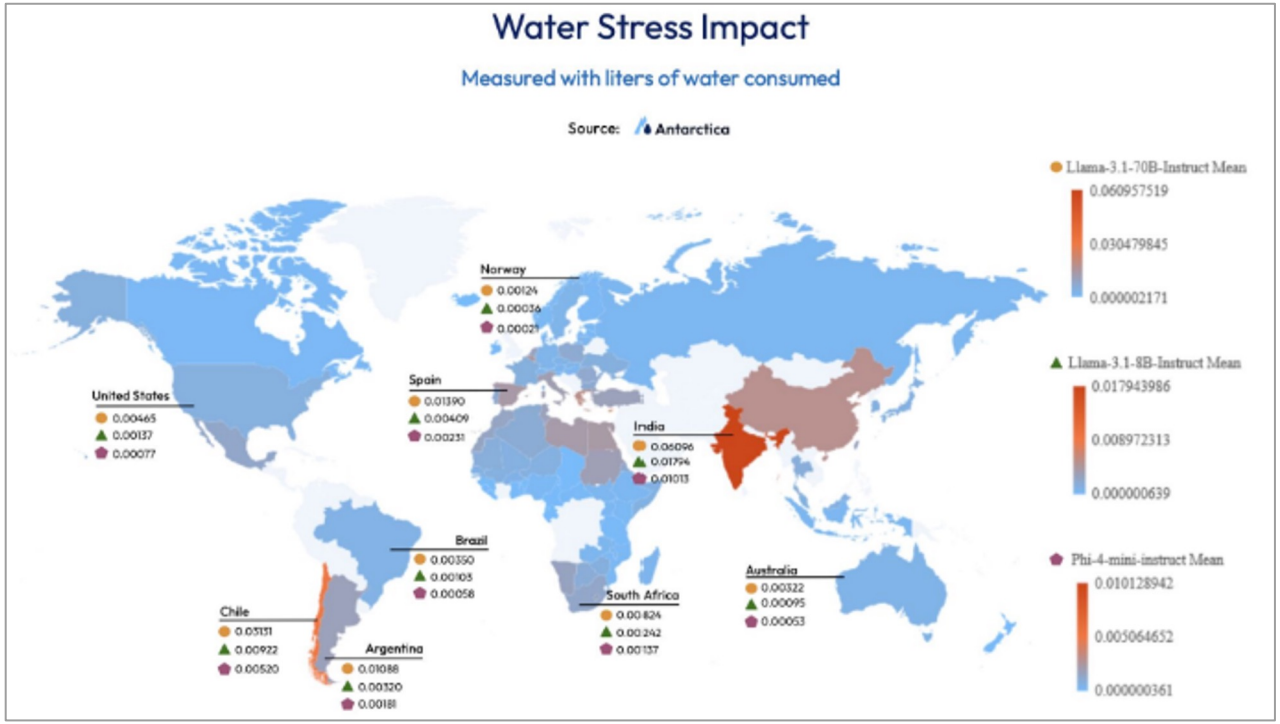
A IA em energia, transporte e alimentação pode cortar 3,2–5,4 bilhões de toneladas de CO_2e por ano até 2035, reduções maiores que as emissões dos data centers e da própria IA. (Nature*)

As políticas moldam a IA	**A moratória de Singapura para data centers** - impôs uma **moratória a novos data centers em 2019** pela pressão sobre energia e água - A aprovação agora se dá por **alocação competitiva**: exige eficiência de ponta e pelo menos 50% de energia verde. - ~30% menos energia nos equipamentos de TI, deslocando **o ônus da eficiência do edifício para a camada de computação**
A IA molda a execução das políticas	**O CCTS da Índia será lançado em out. de 2026** - O CCTS, primeiro mercado regulado de carbono da Índia, entra em operação com a primeira negociação de certificados **abrangendo ~490 entidades obrigadas,** entre os maiores ETS do mundo - Os créditos são emitidos com base nas **emissões verificadas por unidade produzida**, então todo o mercado depende da qualidade do MRV. - **O MRV digital** (satélite + IA) substitui auditorias manuais lentas por dados contínuos e invioláveis, com fornecedores relatando até **70% menos custos de verificação**

*https://www.nature.com/articles/s44168-025-00252-3

A mesma consulta de IA enviada a um data center na Índia gera um impacto de estresse hídrico 21 vezes maior que na Alemanha.

Mathieu François, CEO da Antartica (post no LinkedIn)

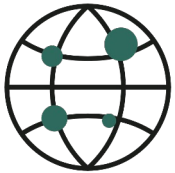


Uma consulta de tamanho médio no **LLaMA 8B** consome **8,96 mL de água na Índia.** A mesma consulta consome **3,26 mL na Alemanha.** A diferença em volume é menor que 3x.

Mas, ponderado pela escassez regional, o **impacto de estresse hídrico é 17,1 na Índia e 0,8 na Alemanha.** A diferença vira 21x.

Com o **modelo 70B** e um prompt longo, **o impacto de estresse na Índia chega a 122, contra 5,7 na Alemanha.**

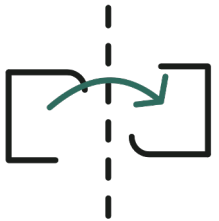
Os custos de carbono da IA: três lacunas de governança



A distribuição geográfica dos custos de carbono da IA



Contabilidade de carbono obrigatória para treinamento e inferência de IA



Responsabilização transfronteiriça quando uma IA criada em um país prejudica pessoas em outro

O que diferencia a IA na ação climática

Construir soluções de IA para a ação climática exige uma abordagem mais ampla

	Convencional	Ação climática
Propósito e motivação	• Resultados de negócio: lucro, participação de mercado, PI	• Resolver problemas comunitários ou sistêmicos: a IA é parte de um problema maior
Quem define o problema Partes interessadas/engajamento	• Gestores de negócio, equipes operacionais e de dados	• Comunidades afetadas, órgãos públicos, ONGs: oficinas participativas, questionários, sessões de codesenho
Questões sociais e éticas	• Mais reativa e voltada à conformidade (p. ex. GDPR)	• Incorporadas desde o início: equidade e inclusão, proteção da privacidade
Dados e métodos	• Dados estruturados, limpos, internos	• Dados muitas vezes incompletos e bagunçados, que exigem interpretação, limpeza e compreensão do contexto
Responsabilização e sucesso	• KPIs: vendas, redução de custos, engajamento de usuários	• Benefícios sociais, mudanças sistêmicas, responsabilização perante as comunidades envolvidas

Escapar da armadilha do “PILOTO” .

DADOS / PROBLEMA

o que é construído

Os dados devem ser **representativos da população** e das **condições** locais

OXÍMETRO DE PULSO

Dados verificados em campo, **de propriedade das instituições responsáveis** pela ação

BRASIL INPE (PRODES/DETER)

Identificar o **enunciado correto do problema** desde o início

MODELO DE SURTOS DE DENGUE / MP

IMPLANTAÇÃO

se chega a alguém

Integrar a IA aos **fluxos de trabalho existentes** com mecanismos de ação

ENCHENTE DE DERNA

Acurácia e referências precisam ser estabelecidas em **cenários reais de implantação,** não em laboratório

TRIAGEM DE RD DO GOOGLE - TAILÂNDIA

TOMADA DE DECISÃO

se é confiável

Para sistemas críticos, projetar com **humano no circuito**

PREVISIA - BRASIL

Apropriação institucional além dos pilotos e para melhorias iterativas que permitam a operacionalização gradual

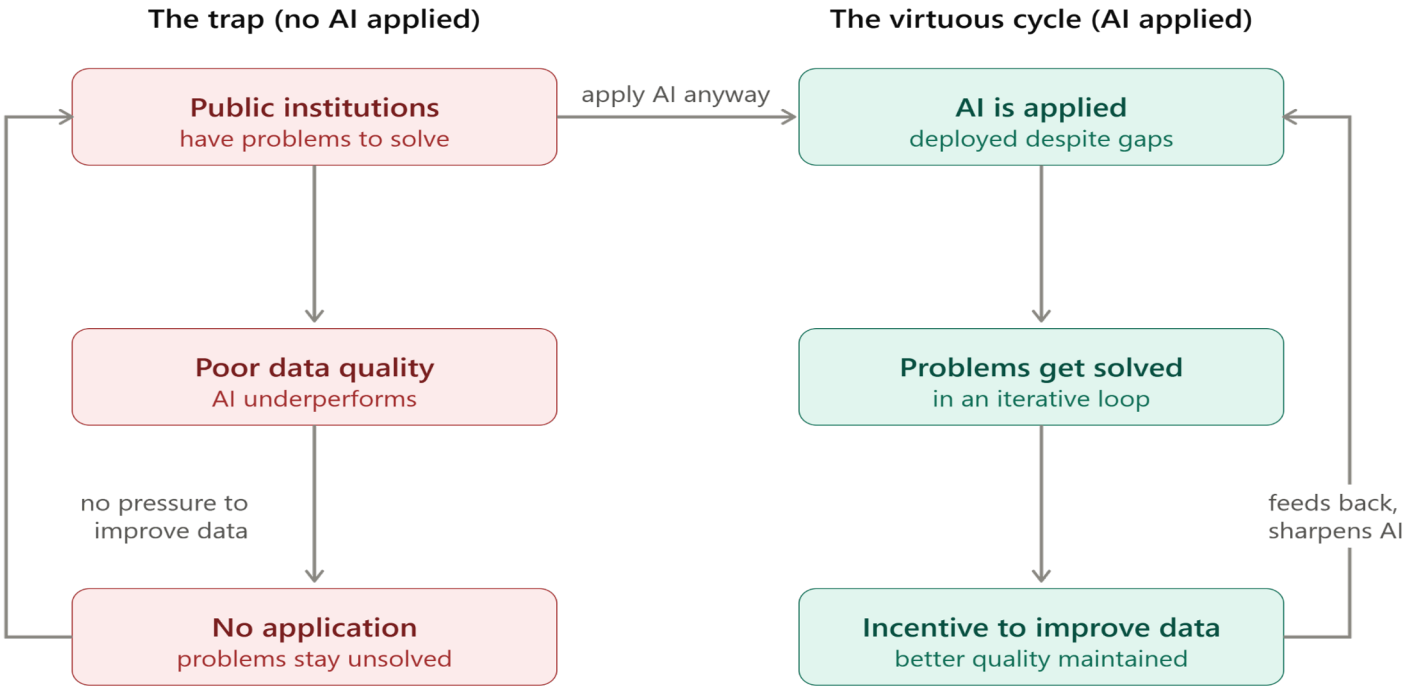
PLANO DE AÇÃO CONTRA O CALOR DE AHMEDABAD

Comunicar a incerteza do modelo é tão importante quanto o resultado

RAIOS - ESTUDO DE CASO DE ODISHA

15 CEEW THE COUNCIL

A qualidade dos dados não é um pré-requisito a esperar: é um produto do uso



Caso 1: dados representativos

O aparelho em que todos confiavam não enxergava a pele escura

24,504

pacientes estudados

JAMA Internal Medicine, 2022



Contexto

- Durante a **COVID-19, os oxímetros de pulso** tornaram-se a ferramenta de linha de frente para monitorar o oxigênio no sangue.
- **Confiáveis** sem questionamento

Complicação

- Calibrados desde 1989 em populações predominantemente de pele clara
- em pacientes de pele mais escura, superestimavam sistematicamente o oxigênio, fazendo-os parecer bem quando não estavam

Ações

- A FDA reconhece o problema e pede padrões atualizados.
- Os aparelhos continuam iguais: estão arraigados demais nos fluxos clínicos.

O paralelo climático: uma IA treinada com dados do Norte Global interpreta mal a realidade local da mesma forma. Dados representativos e soberanos não são um extra: são a condição para a confiança.

Caso 2: apropriação institucional dos dados e resultados

O INPE do Brasil (PRODES / DETER): dados soberanos, verificados em campo, de propriedade da instituição responsável

~95%

acurácia do registro oficial PRODES do INPE



Contexto

- Projeções estrangeiras de desmatamento levaram o Banco Mundial a congelar empréstimos ao Brasil, em meio a disputas constantes entre órgãos sobre os números reais.

Ação

- o governo encarregou seu próprio instituto espacial de produzir números oficiais de desmatamento a partir de observações reais de satélite.
- O PRODES fornece a taxa anual oficial (~95% de acurácia); o DETER emite alertas diários que o órgão de fiscalização usa para planejar inspeções e operações contra o desmatamento ilegal

Resultado

- Com a fiscalização retomada a partir de 2023, a participação do Brasil na perda global de floresta tropical primária caiu de 43% para 30%, a menor desde 2015

O paralelo climático: a inteligência de risco só é acionável quando a instituição responsável detém a verdade de campo

Caso 4: uma previsão não é um resultado; alguém ainda precisa agir

Derna, Líbia · tempestade Daniel · setembro de 2023

4,300+

mortes, apesar de um alerta com 3 dias de antecedência



Contexto

- Um alerta meteorológico foi emitido três dias antes da tempestade Daniel, e a previsão se mostrou correta.
- Uma falha de barragem havia sido apontada em um estudo de 2022, mas nenhum sistema operacional acompanhava ou agia sobre esse risco

Ação

- Quando as barragens ruíram de madrugada, as autoridades tinham dado ordens contraditórias e um toque de recolher que manteve os moradores em casa, no caminho da água.
- Sabia-se que as velhas barragens estavam deterioradas, mas não receberam manutenção.

Resultado

- Mais de 4.300 pessoas morreram. A previsão estava certa; o sistema ao redor falhou: sem mandato claro, sem evacuação, sem resposta na ponta.

O paralelo climático: um sistema de alerta precoce com IA preciso não vale nada sem os meios para agir: mandatos claros, logística de evacuação e comunicação que chegue às pessoas. A previsão é a parte fácil.

Caso 5: acurácia dos modelos de IA em cenários reais de implantação

Triagem de retinopatia diabética · Tailândia, 2019

>90%

acurácia em laboratório · Beede et al., 2020



Contexto

- A Tailândia queria **triar 60% de seus 4,5 milhões de pacientes diabéticos**, mas tinha apenas **~200 especialistas em retina, uma proporção de 1:3.000.**
- Uma ferramenta de aprendizado profundo prometia **leituras de nível especialista em minutos em vez de semanas**.

Complicação

- Nas clínicas, a pouca iluminação fez o sistema **rejeitar 21% das imagens** captadas.
- **A internet lenta** tornava os envios instáveis, de 60 a 90 segundos por imagem. As enfermeiras que faziam a triagem nunca participaram do desenho.

Consequência

- As enfermeiras só c**onseguiam triar ~10 pacientes por sessão de duas horas; a ferramenta criou gargalos,** não rapidez.
- Ela deixou o **trabalho mais difícil**: disseram que era pior do que o que substituiu.

O paralelo climático: um modelo que brilha nos benchmarks pode falhar em campo: eventos extremos reais e alertas precoces testam a IA climática nas condições e fluxos reais em que ela precisa funcionar.

Caso 6: apropriação institucional para impacto de longo prazo

Plano de ação contra o calor de Ahmedabad · institucionalizando uma medida eficaz

46,8 °C

Pico de maio de 2010 em Ahmedabad



Contexto

- A onda de calor de maio de 2010 causou 1.344 mortes em excesso em Ahmedabad em um único mês, um salto de 43% sobre o normal.
- O sensoriamento remoto mostra que assentamentos informais de baixa renda ficam 5–10 °C mais quentes que áreas mais ricas da mesma cidade.

Ação

- Correlacionar a mortalidade diária com a temperatura revelou um limiar (~41 °C) a partir do qual as mortes disparavam, base de um sistema de alerta em níveis.
- Ahmedabad criou o primeiro plano de ação contra o calor do Sul da Ásia: alertas precoces, programa de telhados frescos e horas de descanso obrigatórias para trabalhadores ao ar livre.

Resultado

- Um estudo de acompanhamento mostrou que o plano evita ~1.190 mortes por ano (2.380 nos verões de 2014–2015 estudados).
- A NDMA o adotou como modelo nacional: planos de ação contra o calor existem hoje em mais de 20 estados indianos.

O paralelo climático: o impacto de longo prazo vem quando uma instituição responsável assume e financia a ferramenta além do piloto. O plano de Ahmedabad perdurou porque a NDMA o tornou política nacional

CEEW THE COUNCIL

Caso 7: depender de modelos de IA que precisam de humano no circuito

PrevisIA (Imazon, com o Ministério Público do Estado do Pará)

~70%

acurácia para a supervisão humana



Contexto

- **Perda de floresta na Amazônia: a fiscalização reage devagar**, pois o monitoramento convencional só mostra o dano já feito
- O PrevisIA usa **IA em imagens de satélite para prever** onde o desmatamento ilegal vai ocorrer, sobretudo **detectando primeiro as estradas abertas**, já que 95% do desmatamento ocorre a até 5,5 km de uma estrada

Ação

- **Alertas de risco** em um painel público, mas sem multas nem embargos
- O Ministério Público analisa as previsões e cria protocolos de ação: **a IA prevê → humanos decidem → a ação segue**

Resultado

- Apontou cerca de 5.000 km² de floresta em alto risco para 2024
- Com ~30% de falsos positivos, **a acurácia sozinha não basta.** A supervisão humana e a apropriação institucional permitem que a IA fortaleça a governança, em vez de substituí-la.

O paralelo climático: em decisões climáticas de alto risco, a acurácia é necessária, mas não suficiente. Mantenha uma instituição humana responsável no circuito: a IA deve fortalecer a governança, não tomar seu lugar.

As políticas não decidem se a IA acontece

Elas decidem

- **quais problemas vale a pena resolver**,
- **com quais dados é possível resolvê-los**, e
- **o que é preciso provar antes que alguém aja com base nos seus resultados**.

Caso para discussão: raios

O problema da "fadiga de alarmes" e dos falsos positivos (o desafio de modelagem)

Para cada 1 °C de aumento na temperatura ambiente global, as projeções estimam alta de 12% nos raios

A Índia registra aumento na frequência de raios, concentrado em alguns estados

- 96% das mortes por raios na Índia ocorrem exclusivamente em áreas rurais
- 77% dos mortos são trabalhadores rurais diaristas em arrozais abertos ou pastores em campos abertos
- O período mais letal vai das 14h às 19h

- A previsão imediata de raios lida com nuvens convectivas rápidas e muito instáveis. Como esses sistemas mudam rapidamente, os modelos geram com frequência "falsos positivos": preveem um raio localizado e intenso que acaba se dissipando ou mudando de rumo.
- Se o seu modelo de IA acionar três sirenes seguidas em uma aldeia sem que caia nenhum raio, a comunidade sofrerá forte "fadiga de alarmes" e ignorará o quarto alerta, potencialmente fatal.

Como cientistas de dados, como vocês ajustam o limiar de sensibilidade do modelo? É melhor tolerar alarmes falsos para maximizar a segurança, ou arriscar perder um raio para preservar a confiança da comunidade?

Caso de uso real: previsão de surtos de doenças transmitidas por vetores em Madhya Pradesh

Objetivo: **um modelo que prevê os casos semanais com 1 a 8 semanas de antecedência para 51 distritos de Madhya Pradesh, com dados de casos de 2017 a 2025.**

2 perguntas para cada distrito

ETAPA 1 — Haverá casos nas próximas semanas?

Alerta sim / não

▼

ETAPA 2 — Se sim, quantos?

Classificar a semana por faixa de gravidade

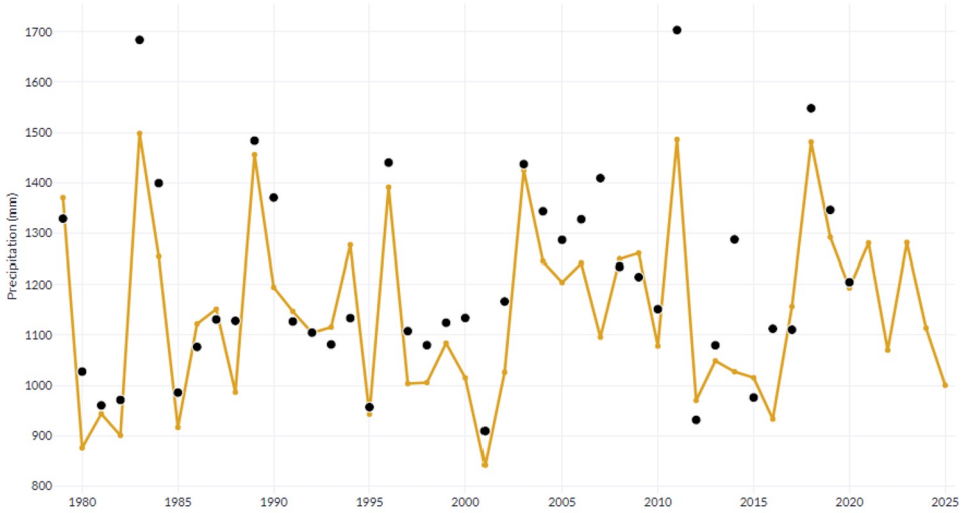
0	1–5	5–20	20+
Nenhum	Baixo	Médio	Alto

Dados climáticos: uma fonte que cubra todos os distritos e semanas

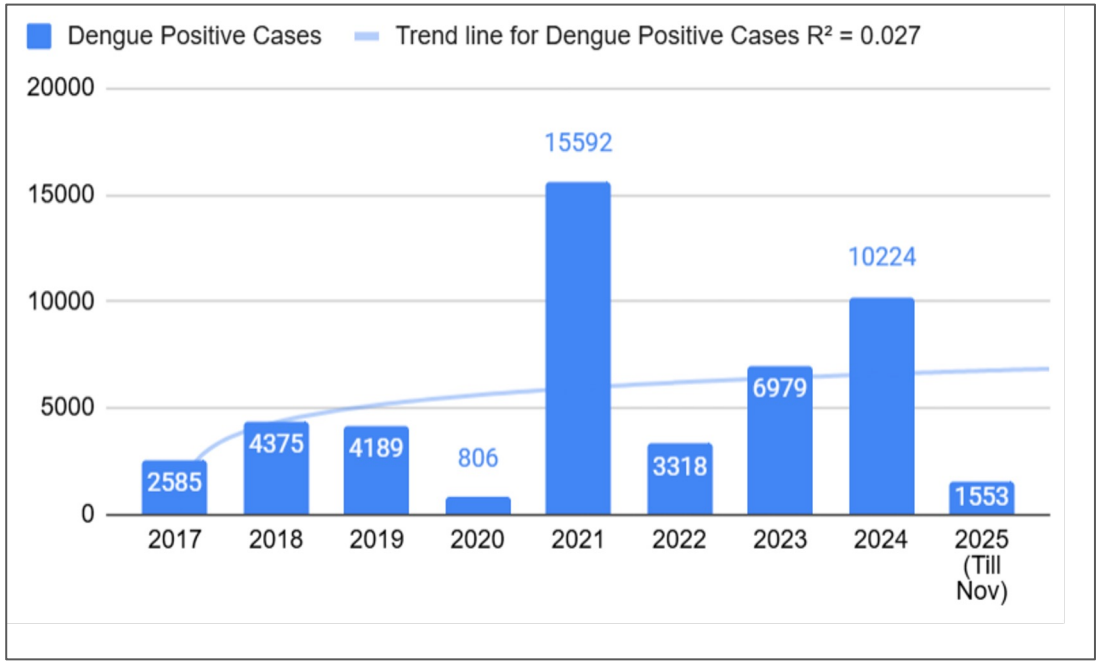
Os dados das estações são considerados
a verdade de campo

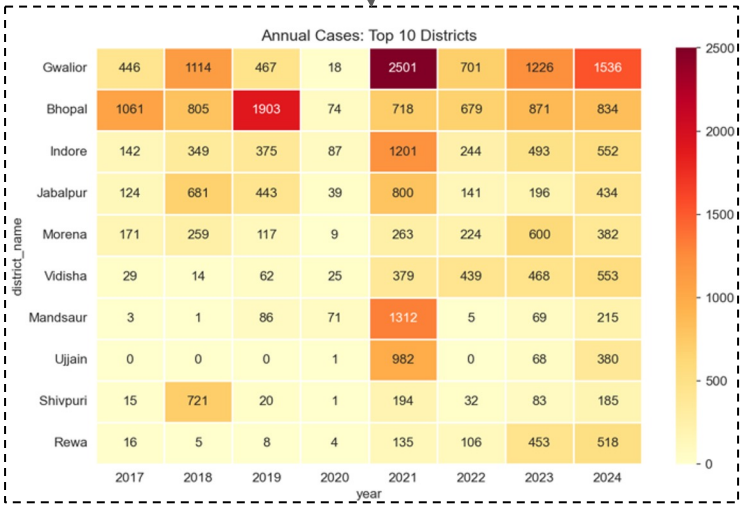


- Para ERA5 e os dados em grade do IMD com dados de estações
- Comparando temperatura e umidade de ambos com os dados diários das estações, são quase iguais
- A chuva tem melhor correlação no IMD

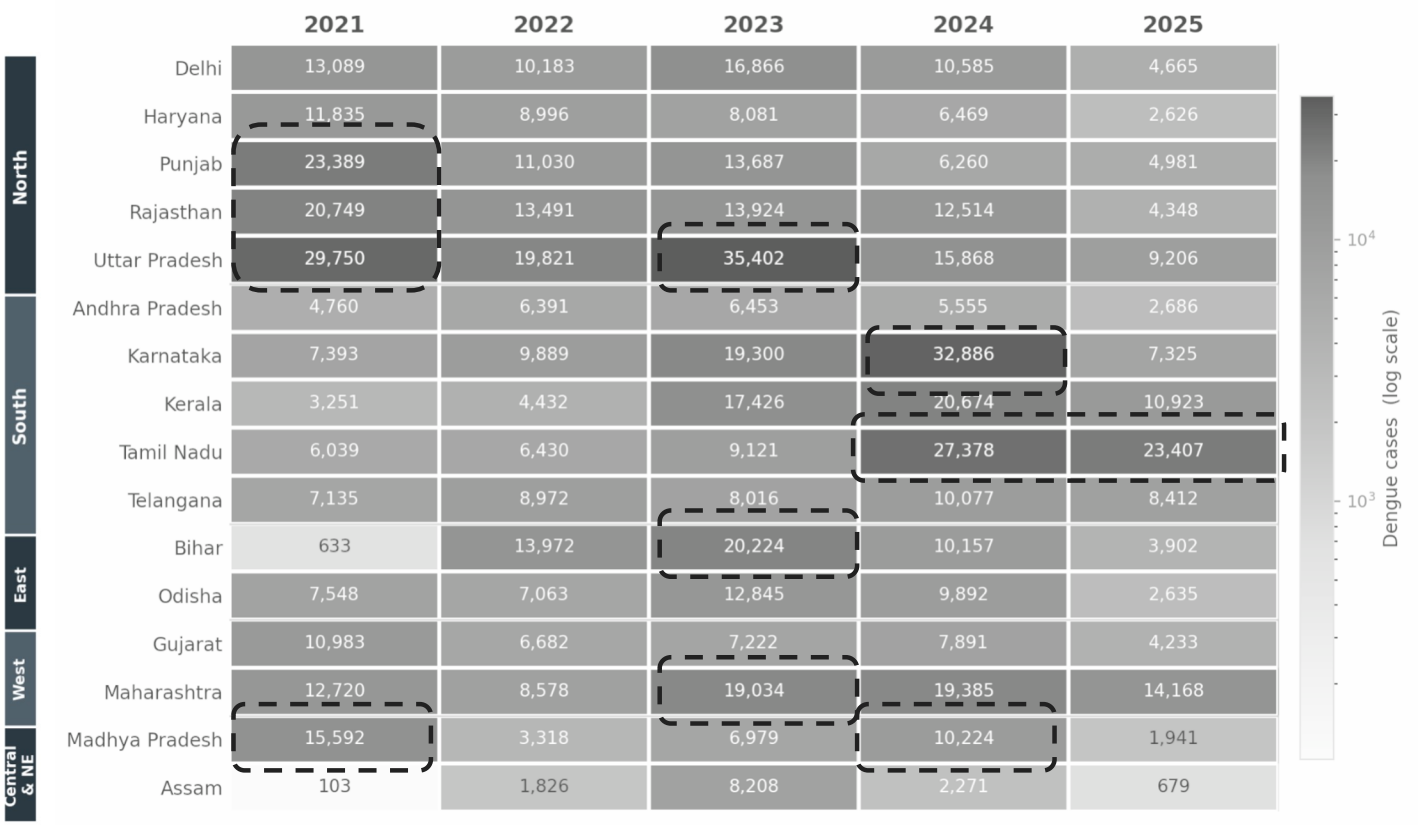


Análise exploratória dos dados de MP: picos em regiões e anos que exigiram investigação





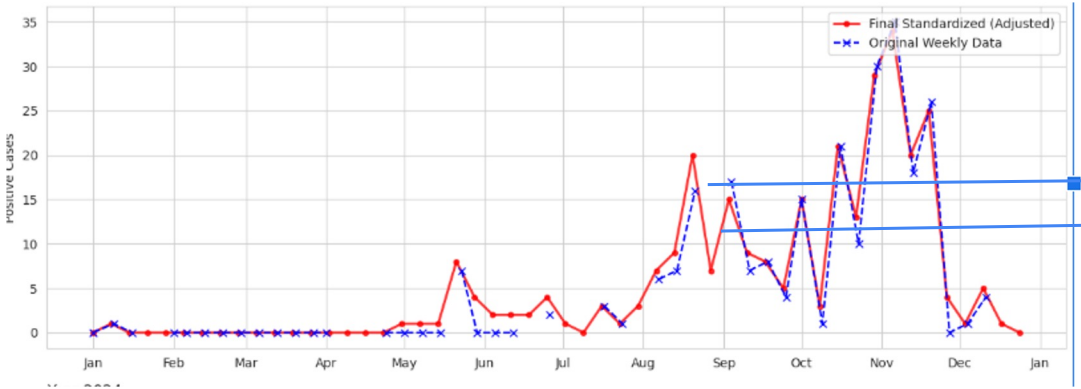
Na Índia, regiões diferentes têm picos em anos diferentes



- Isso significa que os picos dependem de fatores muito ligados ao espaço, como entomologia e sorotipos
- Contradiz a ideia de que os picos se devem apenas ao pós-pandemia ou à migração

Na prática (em campo): os dados de casos são incompletos e subnotificados e precisam de correção antes da modelagem

Dados de casos ausentes



Casos ajustados com totais mensais

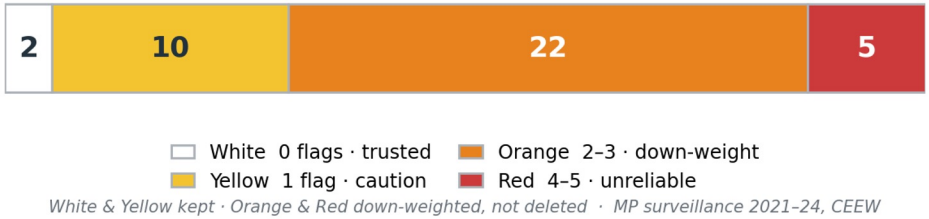
Casos semanais notificados

Dados de casos subnotificados

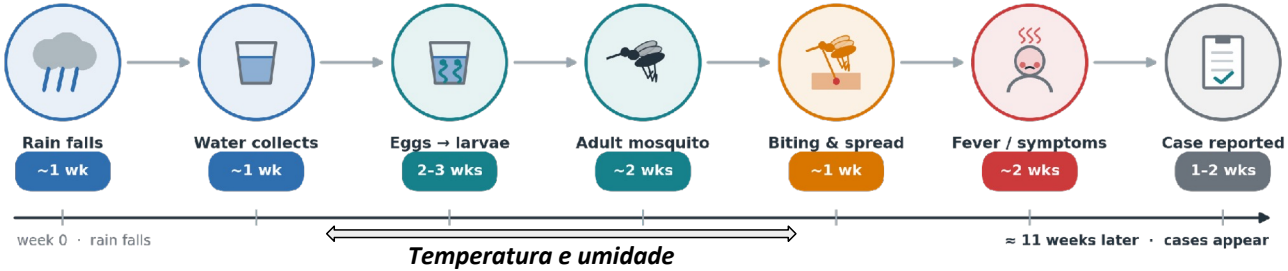
Cada distrito-ano passa por 4 verificações de qualidade:

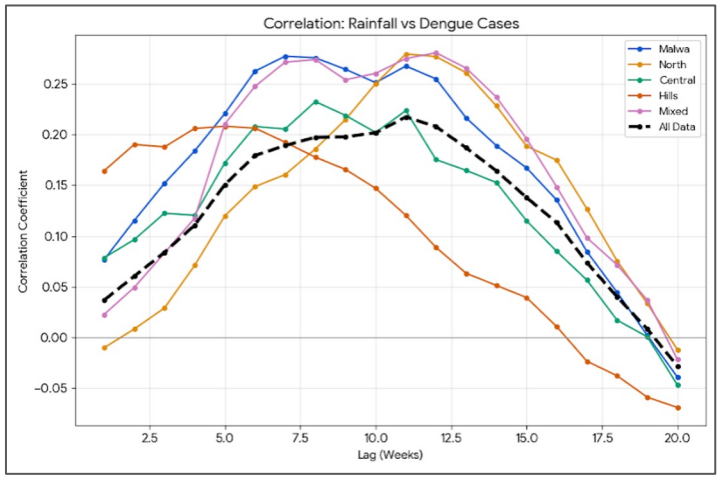
1. Número de amostras zero / implausivelmente baixo
2. Semanas ausentes (nenhuma notificação)
3. **Quedas e picos repentinos sem explicação**
4. Inconsistências internas (p. ex. positivos > amostras)

39 distritos ativos: e semanas-distrito



Variáveis defasadas em aprendizado de máquina: os parâmetros climáticos antecedem os casos em cerca de 8–12 semanas, conforme a assinatura de cada região





Regiões	Pico de chuva Defasagens
Planalto de Malwa: (p. ex. Indore, Ujjain)	**8 semanas**
Norte/Gird: (p. ex. Gwalior, Morena)	**11 semanas**
Centro/Narmada: (p. ex. Jabalpur, Hoshangabad)	**8 semanas**
Colinas/Satpura: (p. ex. Balaghat, Chhindwara)	**9 semanas**
Misto/Bundelkhand: (p. ex. Sagar, Rewa)	**12 semanas**

Modelo de aprendizado de máquina em duas etapas: a etapa 1 sinaliza semanas com casos (ajustada para recall); a etapa 2 estima quantos

O QUE ENTRA — 56 variáveis (M6)

Chuva e precipitação · 15
chuva na defasagem ótima, dias úmidos e de chuva forte; somas de 4/8 sem., extremos

Temperatura e umidade · 11
temperatura e umidade em 3 blocos; máx./mín. de 12 sem.; semanas na faixa de 25–32 °C

Histórico de casos e referências · 12
incidência com defasagens 9–12; 7 referências por distrito; âncora SARIMA

Exames laboratoriais e vigilância · 8
log de amostras e positividade, defasagens 5–8; médias móveis de 4 sem.

Vegetação e interações · 10
habitat NDVI; chuva×temperatura; adequação a mosquitos; indicador de COVID

Sinais do calendário sazonal removidos: os picos vêm do clima, não da data.

Como são as contagens de casos · 5.616 semanas-distrito, 2021–24

Contagem	Faixa	Parcela das semanas
0 casos	Semana tranquila	3,243 · 57.7%
1–5	Esporádico	1,139 · 20.3%
6–20	Elevado	795 · 14.2%
>20	Surto	439 · 7.8%

ETAPA 1 — Haverá casos?

- O classificador analisa a tendência de casos e o clima e emite um alerta sim / não para cada semana-distrito

→ **Limiar de alerta em 0,35, não 0,5: dispara com sinais fracos para que poucos surtos reais escapem**

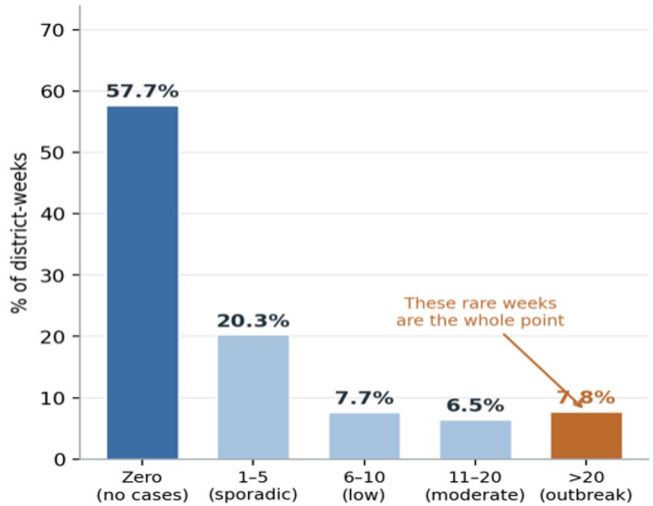
ETAPA 2 — Quantos casos?

- Só roda se a etapa 1 disser sim: um conjunto de 3 modelos estima o número de casos
- Perda de Tweedie: feita para contagens assimétricas com muitos zeros; as previsões nunca são negativas
  - Erro absoluto médio assimétrico

Dois acréscimos que melhoram a acurácia

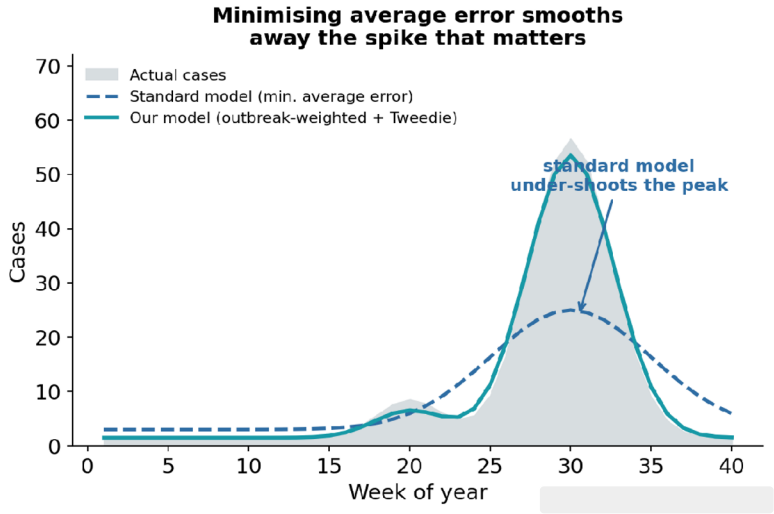
A distribuição de perda de Tweedie:

- Um modelo que trata todas as semanas igualmente aprende só o sinal dominante: “prever calmaria”.
- Usamos uma perda de Tweedie, feita para contagens com muitos zeros e assimétricas à direita, para que as previsões não fiquem negativas e a perda se concentre na cauda perigosa



Erro absoluto médio assimétrico (AsymMAE):

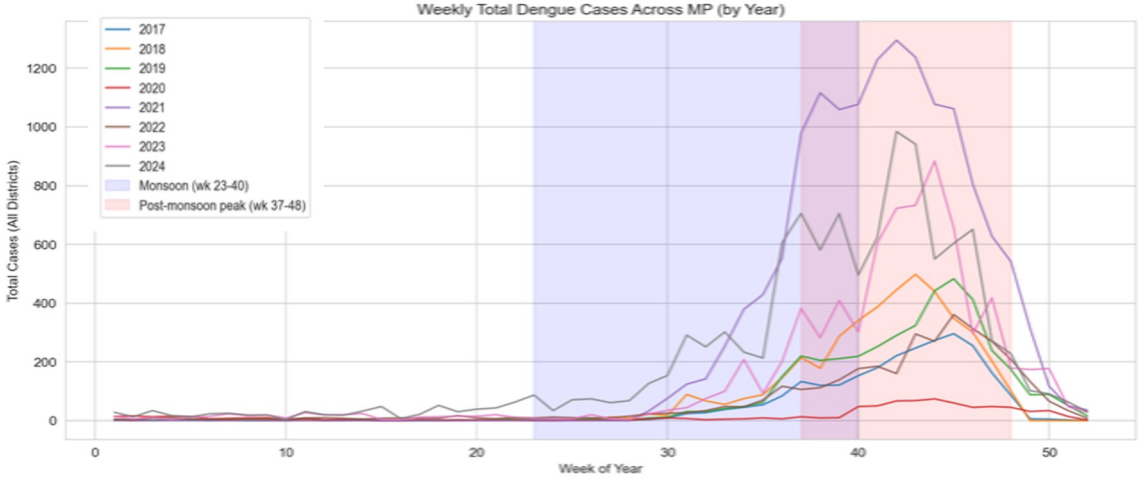
- Prever “a média” parece certo na maior parte do tempo, embora saibamos que não é.
- Uma função de perda assimétrica que penaliza muito mais deixar passar um surto do que superestimar uma semana tranquila: o modelo é forçado a perseguir o pico, não a média.
- As semanas de surto também recebem peso 2–6× maior no treinamento, para que o modelo pratique mais com os eventos raros que de fato disparam alertas de saúde.

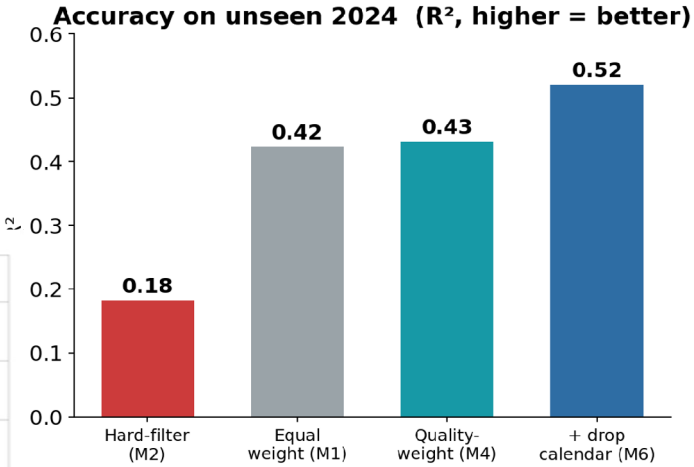


A dengue é sazonal, mas e se a monção vier mais cedo ou mais tarde?

A forma da estação é fixa; só o tamanho muda, então testamos se o modelo apenas memoriza a data

- A estação **tem forma fixa**: **~78% dos casos de set. a nov.**, pico em outubro, todo ano. Só mudam **o tamanho** (≈8×) e **a duração** (≈8 vs. ≈4 meses).
- Isso torna o calendário um atalho tentador: "prever um pico em setembro porque é setembro".
- Por isso **removemos todas as variáveis de calendário** (semana do ano, indicadores de monção) e rodamos de novo:
  - **modelo ponderado por qualidade → melhorou** (R^2 0,43 → **0,52**): aprende o "porquê" climático.
  - **modelo sem ponderação → piorou** (0,32 → 0,26): precisava da muleta.
- Isso ajuda o modelo a identificar os verdadeiros preditores dos casos de dengue, isto é, as mudanças climáticas





M1 — Referência: dados completos, sem filtro de qualidade, maior recall (0,85).
M2 — "White-only": treinado com dados limpos, remove vieses, o mais fraco
M4 — Ponderado por qualidade: dá mais peso aos dados limpos, robusto e pouco complexo
M6 — Melhor: ponderado por qualidade, sem calendário, aprende o clima

Experimentos: comparação de seis modelos (2024 reservado, distritos limpos)

O que conta como surto

- Semana de surto = mais de 5 casos em um distrito em uma semana
- O M6 é avaliado com esse limiar nos dados reservados de 2024.

Modelo	Variáveis	Estação	MAE	RMSE	R^2	F1	Precisão	Recall
M1: todos os dados mantidos (sem filtro)	60	Sim	4.28	9.85	0.42	0.85	0.85	0.85
M2: semanas subnotificadas removidas	25	Sim	4.85	11.73	0.18	0.80	0.80	0.81
M3: defasagens por distrito incluídas	69	Sim	4.38	10.69	0.32	0.81	0.89	0.74
M4: semanas subnotificadas ponderadas	60	Sim	4.07	9.77	0.43	0.84	0.88	0.81
M5: defasagens por distrito incluídas + nº da semana removido	65	Não	4.64	11.16	0.26	0.84	0.87	0.81
M6: M4+M5	**56**	**Não**	**4.03**	**8.97**	**0.52**	**0.85**	**0.87**	**0.84**

Nossos próximos passos no projeto

➔ **Aumentar a granularidade:** passar do nível distrital ao subdistrital (bairro/UBS) com dados e análise geoespacial

➔ **Mudanças de sorotipo:** qual cepa está circulando (DEN-1/2/3/4). Uma mudança, p. ex. alta de DEN-2, pode transformar um ano tranquilo em surto.

➔ **Vigilância de mosquitos:** entomologia em campo, levantamentos larvários e densidade de vetores adultos (onde e quantos).

➔ **Implantação piloto em MP e Tamil Nadu:** rodar o sistema em dois estados para testá-lo em climas e sistemas de notificação diferentes.

Lições para quem desenvolve…

1. **As políticas não condicionam se você constrói: decidem o que vale a pena construir**
2. **Sua própria computação agora é objeto de política**
3. **Dados representativos e soberanos são condição para a confiança, não um extra**
4. **Acurácia de laboratório não é acurácia de campo**
5. **Uma previsão não é um resultado; a apropriação institucional é a estratégia de implantação**
6. **Otimize o capital de confiança, não só a função de perda**

Obrigado