Introducción a las políticas y la regulación climáticas en el contexto de las aplicaciones de IA

Vaibhav Chugh
Pallavi Das

5 de agosto de 2026

© Council on Energy, Environment and Water, 2026

Estructura de la clase

(15 min) Parte 1: comprensión básica, alcance e implicaciones

- por qué existen las políticas, qué buscan, la disputa por la equidad, los compromisos recurrentes

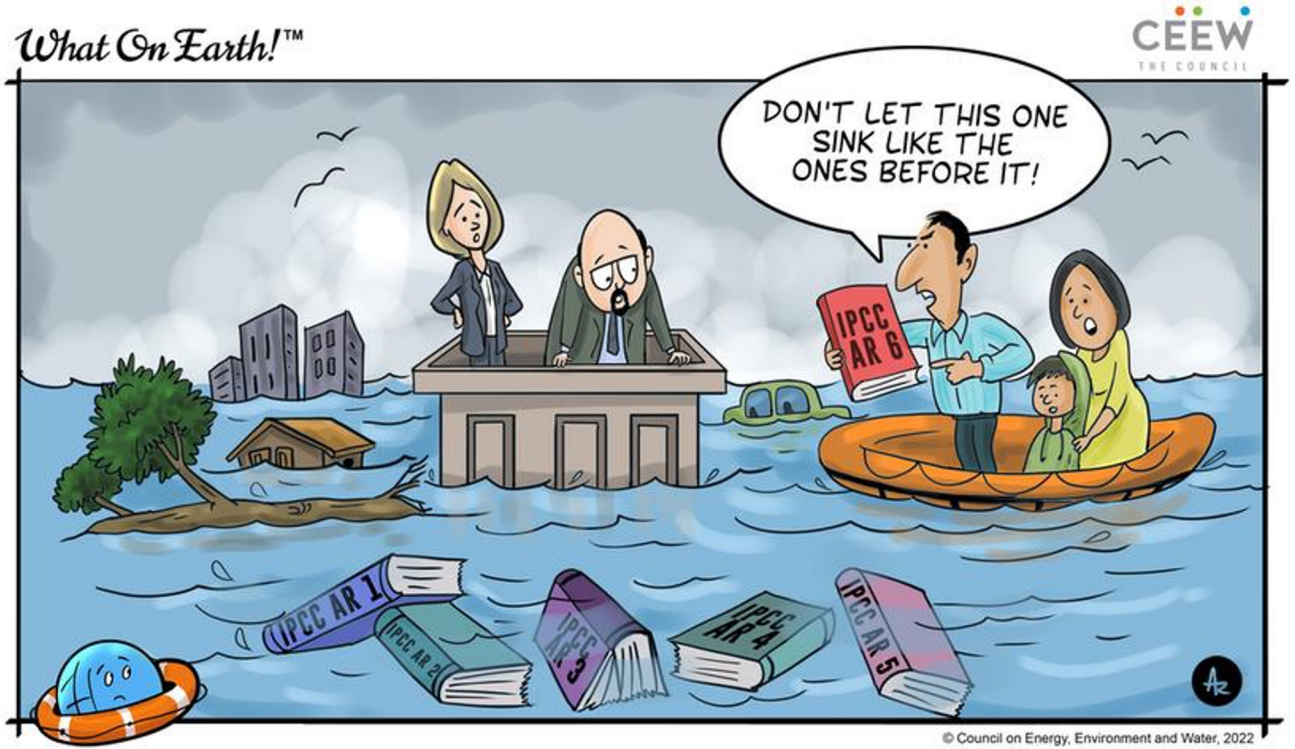
(10 min) Parte 2: panorama, actores, novedades y marcos en distintos contextos mundiales.

- Grandes pactos mundiales, instituciones multilaterales y mecanismos de financiación y ejecución
- Políticas climáticas nacionales en la India

(25 min) Parte 3: implicaciones para la innovación, el despliegue y la toma de decisiones

- Entender cómo las políticas y la regulación climáticas moldean la innovación, el despliegue y la toma de decisiones, en la teoría y en la práctica, sobre todo en el ámbito de la IA y el clima.

Parte 1: un modelo mental de la política climática



¿Por qué existen las políticas?

Para proteger un bien público mundial
Un clima estable es un bien público mundial. Nadie puede quedar excluido y el beneficio de un país no reduce el de los demás.



Poner precio a una externalidad negativa
Las emisiones de un contaminador dañan a otros (calor, pérdida de cosechas), pero ese coste recae en terceros y no en el contaminador, así que nunca entra en su decisión.

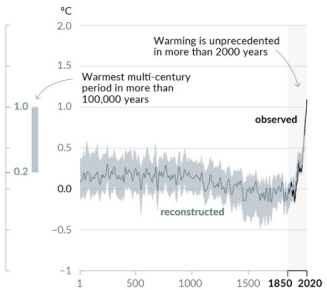


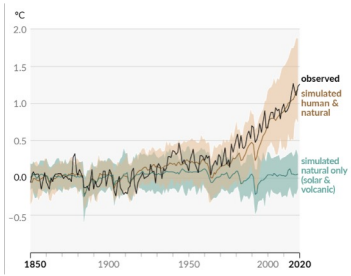
Acción colectiva / problema del polizón
todos ganan cuando otros actúan, así que todos esperan a que actúe otro.



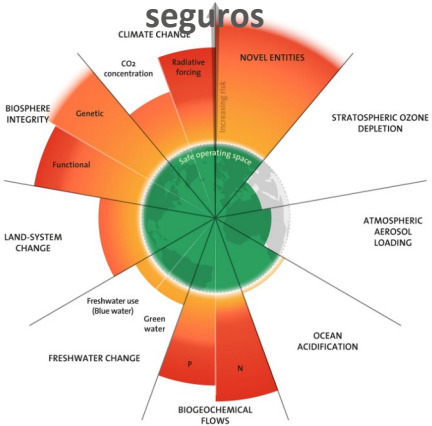
¿Por qué necesitamos políticas climáticas?

Cambios observados

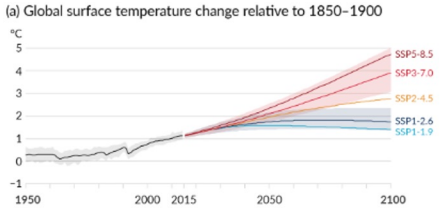


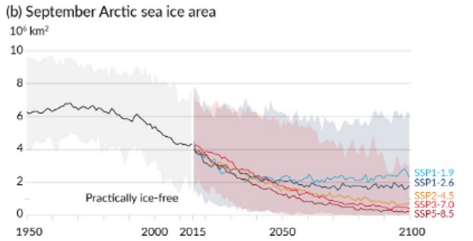


Límites seguros



Cambios proyectados





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

¿Qué buscan las políticas frente al cambio climático?

Mitigación

Reducir/evitar emisiones

Renovables, eficiencia, precio del carbono

Históricamente el marco por defecto del Norte Global

Adaptación

Gestionar impactos inevitables como el aumento de la temperatura y los fenómenos extremos

Soluciones basadas en la naturaleza; seguros paramétricos; plan de acción contra el calor

Una cuestión existencial para el Sur expuesto

Medios de implementación e instrumentos de política

Financiación

Tecnología

Desarrollo de capacidades

Instrumentos de política

- **Basados en el mercado/precios** — impuestos al carbono, sistemas de comercio de emisiones (ETS/límites y comercio), eliminación de subsidios a los combustibles fósiles.
- **Regulatorios (ordeno y mando)** — normas de emisiones, normas de eficiencia, prohibiciones/eliminación gradual (p. ej. carbón, vehículos de combustión), códigos de edificación.
- **Fiscales/financieros** — subvenciones, créditos fiscales, bonos verdes, financiación combinada, tarifas de inyección, incentivos vinculados a la producción.
- **Informativos/voluntarios** — etiquetado, divulgación (p. ej. riesgos climáticos), compromisos empresariales de cero neto.

Compromisos de las políticas

- **Coste vs. velocidad**
  - Impuesto al carbono = acción rápida, regresiva, políticamente frágil.
  - Normas = más lentas, duraderas, ligadas a calendarios

- **Alcance vs. profundidad**
  - París incluye a todos los países, pero su cumplimiento es débil.
  - Los mandatos locales (ciudades, empresas) tienen fuerza, pero no escalan

- ***Por qué importa**:* los países eligen instrumentos distintos porque parten de condiciones distintas. No hay una única política «correcta»

Gobernanza de las políticas

Internacional
Los tratados y las normas marcan el rumbo

Nacional
Los gobiernos asumen compromisos vinculantes y diseñan políticas nacionales

Subnacional
Estados, provincias y ciudades suelen avanzar más rápido y aplicar sobre el terreno

Actores no estatales
Empresas, inversores y sociedad civil moldean y aplican las políticas

Un presupuesto de carbono finito, y quién puede usarlo

~876 $GtCO_2$

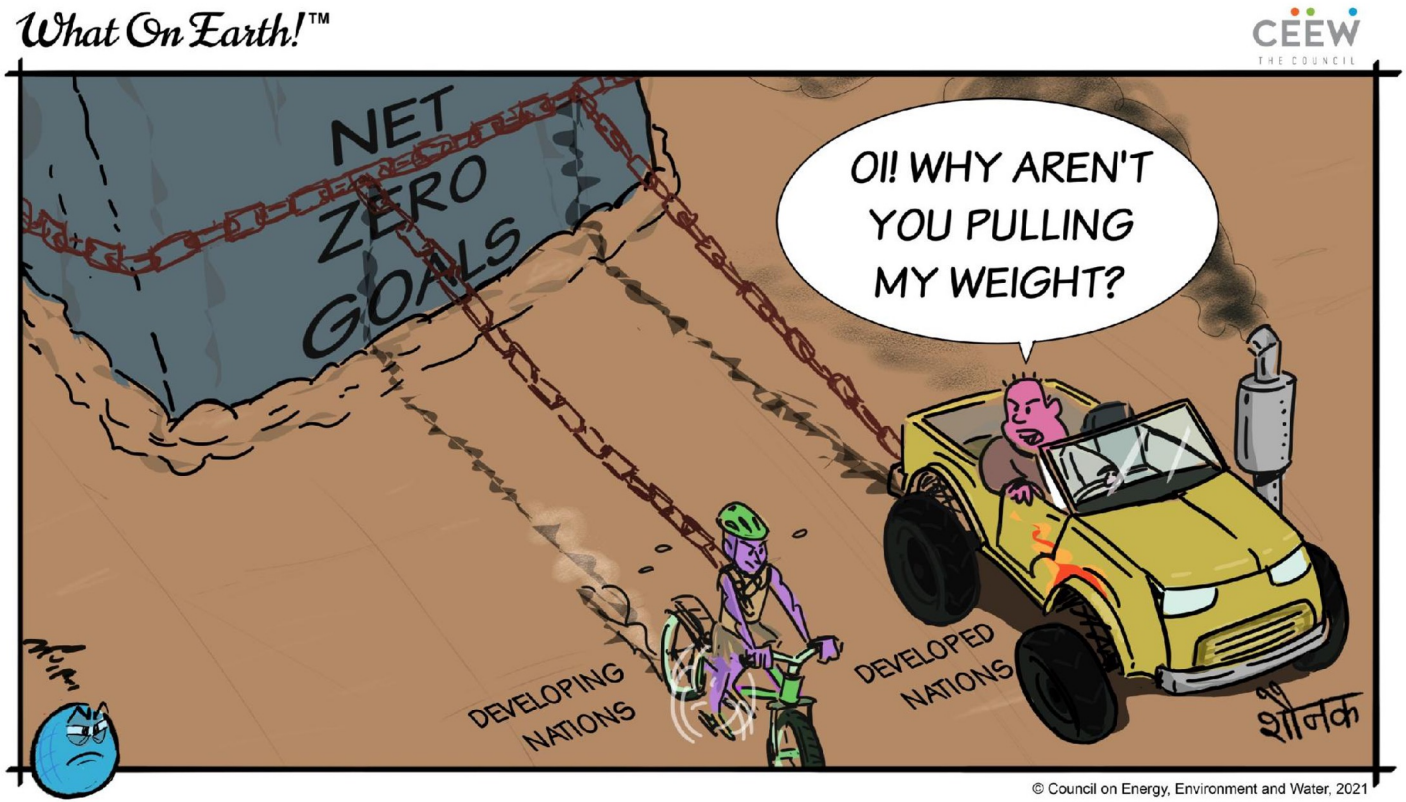
Presupuesto de carbono finito para mantenerse por debajo de 2 °C

Quién puede usar este espacio restante es LA disputa distributiva de la política climática

- **RCPD-CR:** responsabilidades comunes pero diferenciadas y capacidades respectivas (CMNUCC, 1992): problema compartido, deberes diferenciados según responsabilidad y capacidad
- **Responsabilidad histórica:** las emisiones acumuladas importan. EE. UU., la UE y los países en desarrollo tienen emisiones históricas muy altas
- **Espacio de carbono:** ¿repartir el presupuesto según emisiones actuales? ¿per cápita? ¿acumuladas? Cada respuesta implica obligaciones radicalmente distintas

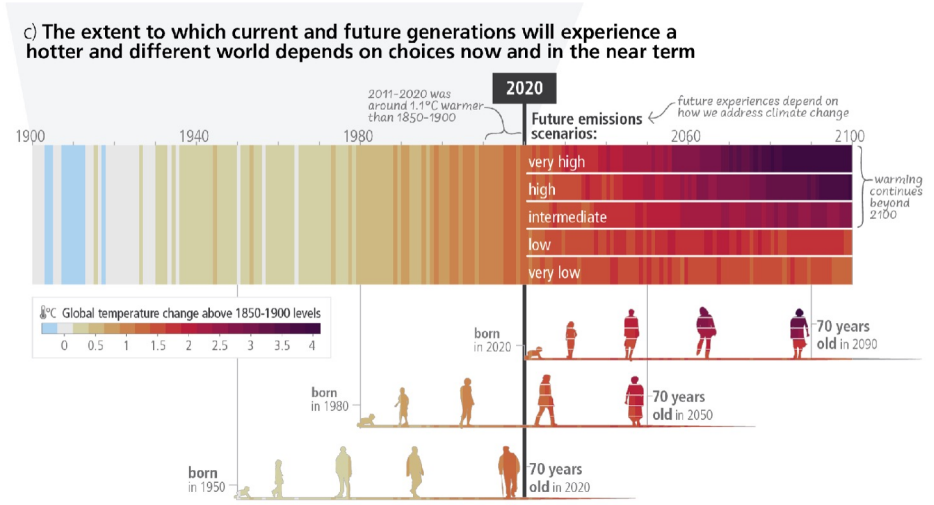
https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-economics-and-policy/carbon-clock/remaining-carbon-budget Consultado el 24 de julio de 2026

Parte 2: el panorama de las políticas climáticas



El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: mantener la ciencia por delante

- **Evalúa, no investiga**. El IPCC no produce ciencia nueva: revisa y sintetiza miles de estudios publicados para establecer qué se sabe, con qué grado de confianza y dónde están las incertidumbres.
- **Gobiernos y científicos juntos**. Los informes los redactan cientos de autores expertos voluntarios, y el Resumen para responsables de políticas lo aprueban línea por línea todos los gobiernos miembros.
- **Tres grupos de trabajo.** GT1 (ciencia física), GT2 (impactos, adaptación, vulnerabilidad), GT3 (mitigación). Los ciclos de evaluación duran unos 6–7 años; el Séptimo Informe de Evaluación (AR7) está en curso



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

La CMNUCC existe para romper ese punto muerto logrando que todos se comprometan juntos, en público y de forma repetida

Función de la **CMNUCC** (y del Acuerdo de París bajo ella):

- Reúne a **casi todos los países en la mesa,** para que nadie reduzca solo mientras otros se aprovechan
- Hace que los **compromisos sean visibles y públicos** (NDC), lo que da certidumbre a la industria y responsabiliza a los países
- Convoca **reuniones periódicas** (las COP anuales y Bonn a mitad de año) para mantener el diálogo, desbloquear las negociaciones y exigir cuentas sobre los compromisos



Grupos de negociación

- **Grupo Africano** – uno de los cinco grupos regionales de negociación de la ONU, con 54 Estados miembros
- **Grupo Árabe** – formalmente la Liga de Estados Árabes, organización regional creada en 1945
- **BASIC (Brasil, Sudáfrica, India y China)** – una coalición de cuatro grandes economías emergentes
- **Unión Europea (UE)** – los 28 Estados miembros de la UE, con negociaciones dirigidas por la DG Acción por el Clima
- **Grupo de los 77 + China (G77 + China)** – una gran alianza de 134 países en desarrollo
- **Países menos adelantados (PMA)** – un grupo de los países más pobres del mundo, que cambia según evolucionan las economías
- **Países en desarrollo afines (LMDC)** – un grupo de países en desarrollo que representa a 3500 millones de personas, centrado en que los países ricos asuman la mayor responsabilidad frente al cambio climático
- **Alianza de los Pequeños Estados Insulares (AOSIS)** – un grupo de 44 pequeñas islas y Estados costeros de baja altitud
- **Grupo Paraguas** – un grupo transcontinental de países, muchos considerados poco entusiastas con el clima en el pasado reciente, aunque en muchos casos esas posturas están cambiando

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

Arquitectura internacional: el cambio de régimen (de la coerción a la presión de los pares)

1992 CMNUCC

El marco. Fija principios, incluido el de RCPD-CR, pero no objetivos vinculantes

1997 KIOTO

Descendente: objetivos vinculantes solo para los países del anexo I (ricos).

2015 PARÍS

Ascendente: cada país fija su propia NDC, revisada mediante un mecanismo de ambición creciente y un balance mundial quinquenal.

Cómo obliga el pacto a un país: la NDC de la India

- Reducción del 47 % de la intensidad de emisiones para 2035 respecto a 2005
- 60 % de capacidad eléctrica no fósil para 2035 respecto a 2005
- 3500 a 4000 millones de toneladas de CO_2 equivalente mediante cubierta forestal y arbórea para 2035 (respecto a 2005)

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

Nivel nacional: economías distintas, herramientas distintas

La idea clave: no existe una única «política climática». Lo que usa un país depende de su riqueza, de su perfil de emisiones y de su política.

El modelo «regular + poner precio» de los países de renta alta

- **UE** — regular + poner precio: Pacto Verde / Objetivo 55, RCDE UE (límites y comercio), MAFC (impuesto en frontera), taxonomía de la UE

El resto del Sur Global: la misma lógica, presiones distintas

- **China** — escala dirigida por el Estado: ETS nacional (2021, sector eléctrico), objetivos de «doble carbono» (pico antes de 2030, neutralidad antes de 2060) y dominio industrial en solar, baterías y VE
- **India** — subsidios + modo misión (primero desplegar, después poner precio): National Solar Mission, PM-KUSUM (bombas solares), PM Surya Ghar (tejados, 2024), FAME (VE), LT-LEDS.
- **Brasil** — el modelo de *uso del suelo*: su mitigación depende sobre todo de la deforestación amazónica, no de la energía; el éxito de las políticas = hacer cumplir la protección forestal. También gestiona uno de los programas de biocombustibles más antiguos del mundo (etanol).
- **Sudáfrica** — el modelo de *transición justa*: muy dependiente del carbón y caso de prueba de la **Asociación para una Transición Energética Justa (JET-P)**, un acuerdo con varios donantes para financiar una salida ordenada del carbón sin hundir los medios de vida de las regiones carboníferas.
- **Indonesia / Vietnam** — también receptores de **JET-P**: dependientes del carbón, de rápido crecimiento, negocian transiciones financiadas desde fuera, donde la financiación climática y la política nacional se encuentran en la práctica.
- **Kenia / Etiopía** — el modelo de *salto tecnológico / ricos en renovables*: redes ya casi totalmente renovables (geotermia, hidroeléctrica), por lo que su frontera es el acceso y la resiliencia, no descarbonizar una red sucia.

Regímenes transversales: la frontera que cruza fronteras

¿Qué hace el MAFC?

El mecanismo de ajuste en frontera por carbono de la UE grava el carbono incorporado en las importaciones: acero, aluminio, cemento, fertilizantes, electricidad, hidrógeno.

La fase definitiva (de pago) empezó el 1 de enero de 2026; sanción de 100 €/tonelada por incumplimiento. Se propone ampliarlo a ~180 productos derivados en 2028.

Objetivo: evitar la «fuga de carbono», es decir, que las empresas se trasladen para eludir el precio del RCDE UE.

El debate que genera…

Para los exportadores indios y del Sur Global, el MAFC es un coste directo en la frontera de la UE.

Visto desde Delhi:

«proteccionismo verde»: un bloque rico que traslada sus costes climáticos a productores más pobres.

Visto desde Bruselas:

una medida legítima contra la fuga que iguala las condiciones.

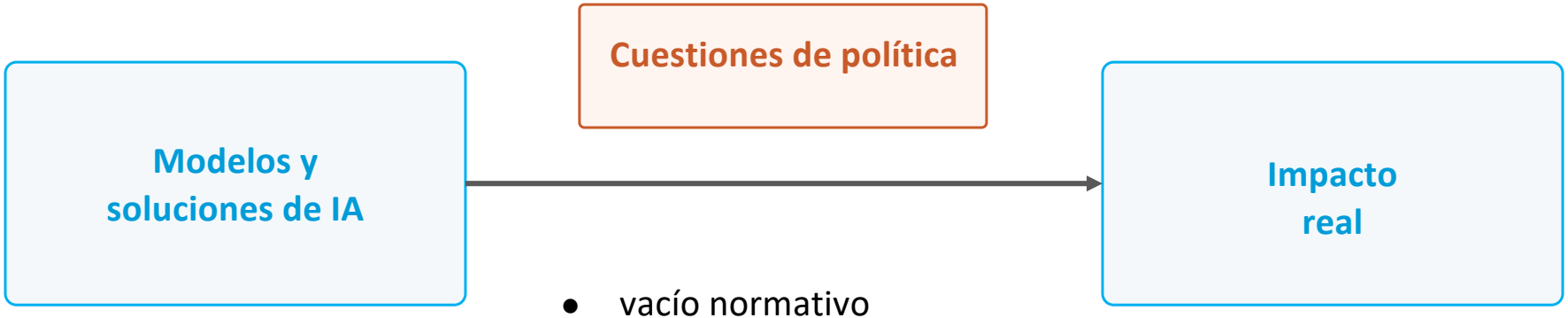
El mejor ejemplo de un instrumento occidental que reconfigura las decisiones del Sur Global, y ahora impugnado en la OMC.

Parte 3: implicaciones para la innovación, el despliegue y la toma de decisiones

¿Qué papel tienen las políticas en el clima y la IA?

Las políticas son estructuradas y formales, lentas pero responsables, y funcionan mejor con problemas bien entendidos y estables

La IA es exploratoria, iterativa y flexible, apta para retos ambiguos o cambiantes



- vacío normativo
- en la infraestructura de datos
- rendición de cuentas
- capacidad de actuar

La misma IA promocionada para reducir emisiones es en sí misma un emisor no regulado

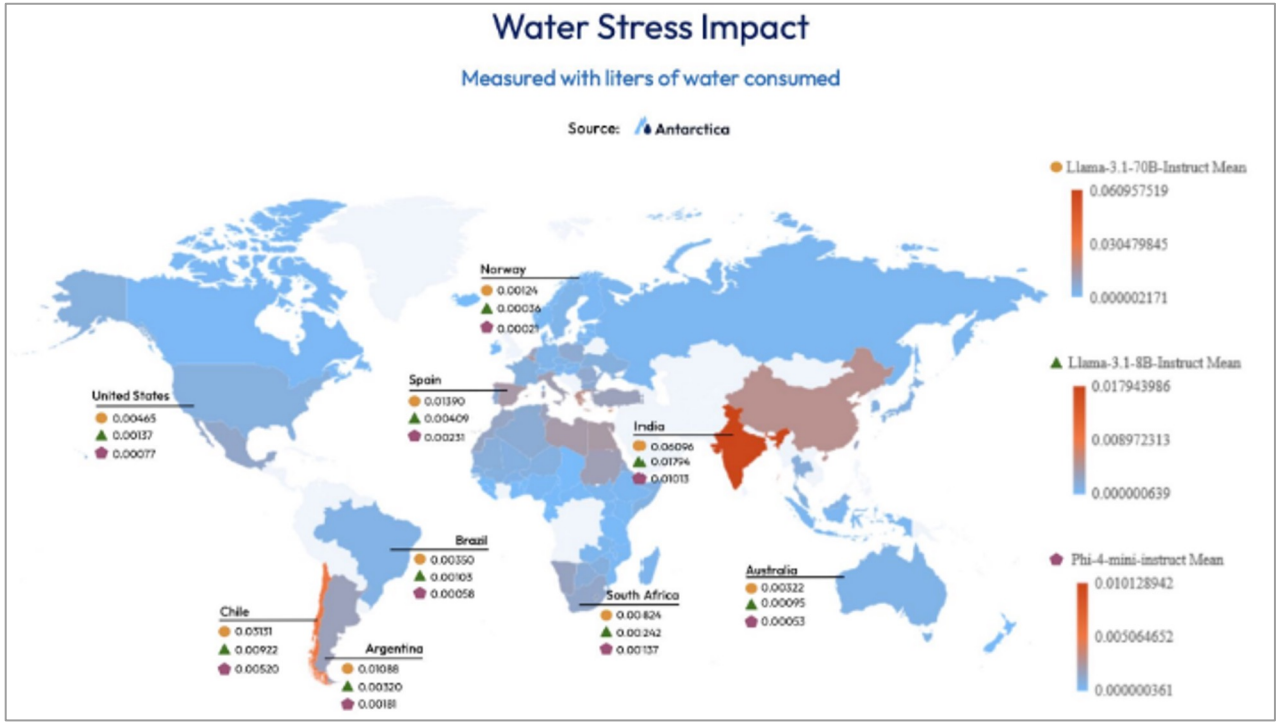
La IA en energía, transporte y alimentación podría reducir entre 3200 y 5400 millones de toneladas de CO_2e al año para 2035, reducciones superiores a las emisiones de los centros de datos y de la propia IA. (Nature*)

Las políticas moldean la IA	**La moratoria de Singapur sobre centros de datos** - impuso una **moratoria sobre nuevos centros de datos en 2019** por la presión sobre la energía y el agua - La aprobación se hace ahora mediante una **asignación competitiva**: exige eficiencia de primer nivel y al menos un 50 % de energía verde. - ~30 % menos energía en equipos informáticos, trasladando **la carga de eficiencia del edificio a la capa de cómputo**
La IA moldea la aplicación de las políticas	**El CCTS de la India se lanzará en oct. de 2026** - El CCTS, primer mercado de carbono regulado de la India, arranca con el primer comercio de certificados **con ~490 entidades obligadas,** entre los mayores ETS del mundo - Los créditos se emiten según las **emisiones verificadas por unidad producida**, así que todo el mercado depende de la calidad del MRV. - **El MRV digital** (satélite + IA) sustituye las lentas auditorías manuales por datos continuos e inalterables, y los proveedores informan de hasta un **70 % menos de costes de verificación**

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

La misma consulta de IA enviada a un centro de datos en la India produce un impacto de estrés hídrico 21 veces mayor que en Alemania.

Mathieu François, director ejecutivo de Antartica (publicación de LinkedIn)

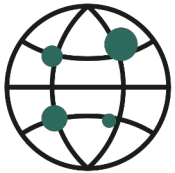


Una consulta de longitud media en **LLaMA 8B** consume **8,96 mL de agua en la India.** La misma consulta consume **3,26 mL en Alemania.** La diferencia en volumen es menor de 3 veces.

Pero ponderado por la escasez regional, el **impacto de estrés hídrico es 17,1 en la India y 0,8 en Alemania.** La diferencia pasa a ser de 21 veces.

Con el **modelo 70B** y un prompt largo, **el impacto de estrés en la India llega a 122, frente a 5,7 en Alemania.**

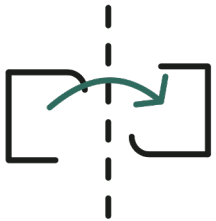
Los costes de carbono de la IA: tres lagunas de gobernanza



La distribución geográfica de los costes de carbono de la IA



Contabilidad de carbono obligatoria para el entrenamiento y la inferencia de IA



Rendición de cuentas transfronteriza cuando una IA creada en un país perjudica a personas de otro

Qué distingue a la IA en la acción climática

Construir soluciones de IA para la acción climática requiere un enfoque más amplio

	Convencional	Acción climática
Propósito y motivación	• Resultados de negocio: beneficio, cuota de mercado, PI	• Resolver problemas comunitarios o sistémicos: la IA es parte de un problema mayor
Quién define el problema Partes interesadas/participación	• Directivos de negocio, equipos operativos y de datos	• Comunidades afectadas, organismos públicos, ONG: talleres participativos, cuestionarios, sesiones de codiseño
Cuestiones sociales y éticas	• Más reactiva y orientada al cumplimiento (p. ej. RGPD)	• Integradas desde el inicio: equidad e inclusión, protección de la privacidad
Datos y métodos	• Datos estructurados, limpios, internos	• Datos a menudo incompletos y desordenados, que requieren interpretación, limpieza y comprensión del contexto
Rendición de cuentas y éxito	• KPI: ventas, reducción de costes, participación de usuarios	• Beneficios sociales, cambios sistémicos, rendición de cuentas ante las comunidades implicadas

Escapar de la trampa del «PILOTO» .

DATOS / PROBLEMA

qué se construye

Los datos deben ser **representativos de la población** y de las **condiciones** locales

PULSIOXÍMETRO

Datos verificados sobre el terreno, **en manos de las instituciones responsables** de actuar

BRASIL INPE (PRODES/DETER)

Identificar el **enunciado correcto del problema** desde el inicio

MODELO DE BROTES DE DENGUE / MP

DESPLIEGUE

si llega a alguien

Integrar la IA en los **flujos de trabajo existentes** junto con mecanismos de acción

INUNDACIÓN DE DERNA

La exactitud y las referencias deben establecerse en **escenarios de despliegue reales,** no en laboratorios

CRIBADO DE RD DE GOOGLE - TAILANDIA

TOMA DE DECISIONES

si se puede confiar en ello

En sistemas críticos, diseñar con **intervención humana**

PREVISIA - BRASIL

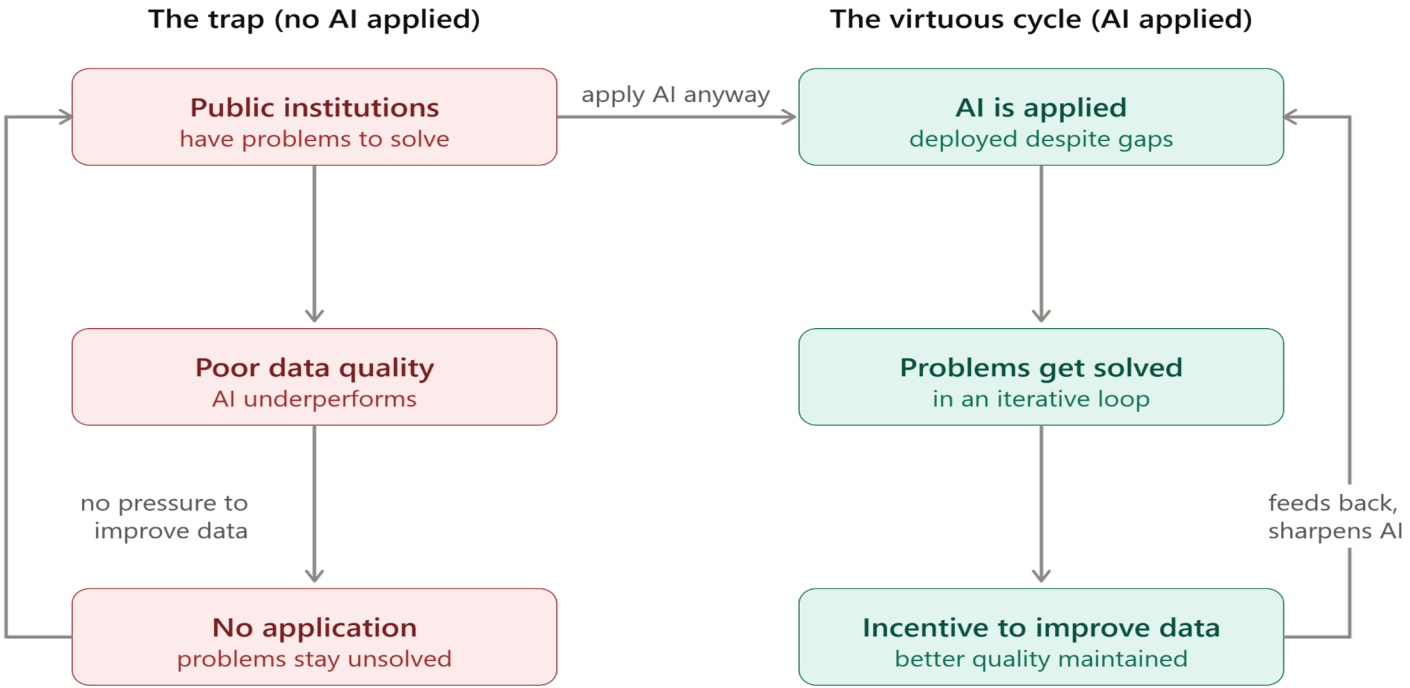
Apropiación institucional más allá de los pilotos y para mejoras iterativas que permitan una puesta en marcha progresiva

PLAN DE ACCIÓN CONTRA EL CALOR DE AHMEDABAD

Comunicar la incertidumbre del modelo es tan importante como el resultado

RAYOS - ESTUDIO DE CASO DE ODISHA

La calidad de los datos no es un requisito previo que se espera: es un resultado del uso



Caso 1: datos representativos

El dispositivo en el que todos confiaban no veía la piel oscura

24,504

pacientes estudiados

JAMA Internal Medicine, 2022



Contexto

- Durante la **COVID-19, los pulsioxímetros** se convirtieron en la herramienta de primera línea para vigilar el oxígeno en sangre.
- **Se confiaba en ellos** sin cuestionarlos

Complicación

- Calibrados desde 1989 con poblaciones mayoritariamente de piel clara
- en pacientes de piel oscura sobrestimaban sistemáticamente el oxígeno, haciéndolos parecer bien cuando no lo estaban

Acciones

- La FDA reconoce el problema y pide normas actualizadas.
- Los dispositivos no han cambiado: están demasiado integrados en la práctica clínica.

El paralelismo climático: una IA entrenada con datos del Norte Global interpreta mal la realidad local de la misma forma. Los datos representativos y soberanos no son un extra: son la condición para la confianza.

Caso 2: apropiación institucional de los datos y los resultados

El INPE de Brasil (PRODES / DETER): datos soberanos, verificados sobre el terreno, en manos de la institución responsable

~95%

exactitud del registro oficial PRODES del INPE



Contexto

- Proyecciones extranjeras de deforestación llevaron al Banco Mundial a congelar préstamos a Brasil, entre disputas constantes entre organismos sobre las cifras reales.

Acción

- el gobierno encargó a su propio instituto espacial elaborar cifras oficiales de deforestación a partir de observaciones satelitales reales.
- PRODES proporciona la tasa anual oficial (~95 % de exactitud); DETER emite alertas diarias con las que la agencia de control planifica inspecciones y operaciones contra la tala ilegal

Resultado

- Con el refuerzo del control desde 2023, la cuota de Brasil en la pérdida mundial de bosque tropical primario bajó del 43 % al 30 %, la más baja desde 2015

El paralelismo climático: la información sobre riesgos solo es útil si la institución responsable controla la realidad del terreno

Caso 4: una previsión no es un resultado; alguien tiene que actuar

Derna, Libia · tormenta Daniel · septiembre de 2023

4,300+

muertes, pese a un aviso con 3 días de antelación



Contexto

- Se emitió un aviso meteorológico tres días antes de la tormenta Daniel, y la previsión fue acertada.
- Un estudio de 2022 había advertido del riesgo de rotura de una presa, pero ningún sistema operativo seguía ese riesgo ni actuaba sobre él

Acción

- Cuando las presas se rompieron de madrugada, las autoridades habían dado órdenes contradictorias y un toque de queda que mantuvo a los vecinos en casa, en el camino del agua.
- Se sabía que las viejas presas estaban en mal estado, pero no se repararon.

Resultado

- Murieron más de 4300 personas. La previsión fue correcta; falló el sistema a su alrededor: sin mandato claro, sin evacuación, sin respuesta de última milla.

El paralelismo climático: un sistema de alerta temprana con IA exacto no vale nada sin los medios para actuar: mandatos claros, logística de evacuación y comunicación que llegue a la gente. La previsión es la parte fácil.

Caso 5: exactitud de los modelos de IA en despliegues reales

Cribado de retinopatía diabética · Tailandia, 2019

>90%

exactitud en laboratorio · Beede et al., 2020



Contexto

- Tailandia quería **cribar al 60 % de sus 4,5 millones de pacientes diabéticos**, pero solo tenía **~200 especialistas en retina, una proporción de 1 por cada 3000.**
- Una herramienta de aprendizaje profundo prometía **lecturas de nivel especialista en minutos en lugar de semanas**.

Complicación

- En las clínicas, la poca luz hizo que el sistema **rechazara el 21 % de las imágenes** tomadas.
- **La conexión lenta a internet** hacía poco fiables las subidas, de 60 a 90 segundos por imagen. Las enfermeras que hacían el cribado nunca participaron en el diseño.

Consecuencia

- Las enfermeras solo p**odían cribar a unos 10 pacientes por sesión de dos horas; la herramienta creó cuellos de botella,** no rapidez.
- Les hizo el **trabajo más difícil**: dijeron que era peor que lo que sustituía.

El paralelismo climático: un modelo que brilla en los benchmarks puede fallar sobre el terreno: los fenómenos extremos reales y las alertas tempranas ponen a prueba la IA climática en las condiciones y flujos reales donde debe funcionar.

Caso 6: apropiación institucional para un impacto a largo plazo

Plan de acción contra el calor de Ahmedabad · institucionalizar una medida eficaz

46,8 °C

Pico de mayo de 2010 en Ahmedabad



Contexto

- La ola de calor de mayo de 2010 causó 1344 muertes adicionales en Ahmedabad en un solo mes, un 43 % más de lo normal.
- La teledetección muestra que los asentamientos informales de bajos ingresos están entre 5 y 10 °C más calientes que las zonas acomodadas de la misma ciudad.

Acción

- Correlacionar la mortalidad diaria con la temperatura reveló un umbral (~41 °C) a partir del cual se disparaban las muertes, base de un sistema de alerta por niveles.
- Ahmedabad creó el primer plan de acción contra el calor del sur de Asia: alertas tempranas, un programa de techos frescos y horas de descanso obligatorias para los trabajadores al aire libre.

Resultado

- Un estudio posterior halló que el plan evita ~1190 muertes al año (2380 en los veranos de 2014–2015 estudiados).
- La NDMA lo adoptó como modelo nacional: hoy hay planes de acción contra el calor en más de 20 estados indios.

El paralelismo climático: el impacto a largo plazo llega cuando una institución responsable asume y financia la herramienta más allá del piloto. El plan de Ahmedabad perduró porque la NDMA lo convirtió en política nacional

CEEW THE COUNCIL

Caso 7: depender de modelos de IA que necesitan intervención humana

PrevisIA (Imazon, con la Fiscalía del Estado de Pará)

~70%

exactitud para la supervisión humana



Contexto

- **Pérdida de bosque en la Amazonia: el control reacciona con lentitud**, ya que la vigilancia convencional solo muestra el daño ya hecho
- PrevisIA usa **IA sobre imágenes satelitales para prever** dónde golpeará la deforestación ilegal, sobre todo **detectando primero las carreteras abiertas**, ya que el 95 % de la tala ocurre a menos de 5,5 km de una carretera

Acción

- **Alertas de riesgo** en un panel público, pero sin multas ni embargos
- La Fiscalía revisa las previsiones y elabora protocolos de actuación: **la IA predice → las personas deciden → se actúa**

Resultado

- Señaló unos 5000 km² de bosque en alto riesgo para 2024
- Con ~30 % de falsos positivos, **la exactitud sola no basta.** La supervisión humana y la apropiación institucional permiten que la IA refuerce la gobernanza en lugar de sustituirla.

El paralelismo climático: en decisiones climáticas de alto riesgo, la exactitud es necesaria pero no suficiente. Mantenga una institución humana responsable en el circuito: la IA debe reforzar la gobernanza, no reemplazarla.

Las políticas no deciden si la IA ocurre

Deciden

- **qué problemas merece la pena resolver**,
- **con qué datos se cuenta para resolverlos**, y
- **qué hay que demostrar antes de que alguien actúe según sus resultados**.

Caso para debatir: los rayos

El problema de la «fatiga de alarmas» y los falsos positivos (el reto de modelización)

Por cada 1 °C de aumento de la temperatura ambiente mundial, las proyecciones estiman un 12 % más de rayos

La India registra un aumento de la frecuencia de los rayos, concentrado en algunos estados

- El 96 % de las muertes por rayos en la India ocurre exclusivamente en zonas rurales
- El 77 % de los fallecidos son jornaleros agrícolas que trabajan en arrozales abiertos o pastores en pastos abiertos
- La franja de mayor mortalidad va de las 14:00 a las 19:00

- La predicción inmediata de rayos trabaja con nubes convectivas rápidas y muy volátiles. Como estos sistemas cambian deprisa, los modelos suelen generar «falsos positivos»: predicen un rayo localizado e intenso que acaba disipándose o desviándose.
- Si su modelo de IA activa tres sirenas seguidas en una aldea y no cae ningún rayo, la comunidad sufrirá una fuerte «fatiga de alarmas» e ignorará la cuarta alerta, que podría ser mortal.

Como científicos de datos, ¿cómo ajusta el umbral de sensibilidad del modelo? ¿Es mejor tolerar falsas alarmas para maximizar la seguridad, o arriesgarse a no detectar un rayo para preservar la confianza de la comunidad?

Caso de uso real: predicción de brotes de enfermedades transmitidas por vectores en Madhya Pradesh

Objetivo: **un modelo que prevé los casos semanales con 1 a 8 semanas de antelación en 51 distritos de Madhya Pradesh, con datos de casos de 2017 a 2025.**

2 preguntas para cada distrito

FASE 1 — ¿Habrá casos en las próximas semanas?

Alerta sí / no

▼

FASE 2 — Si es así, ¿cuántos?

Clasificar la semana por nivel de gravedad

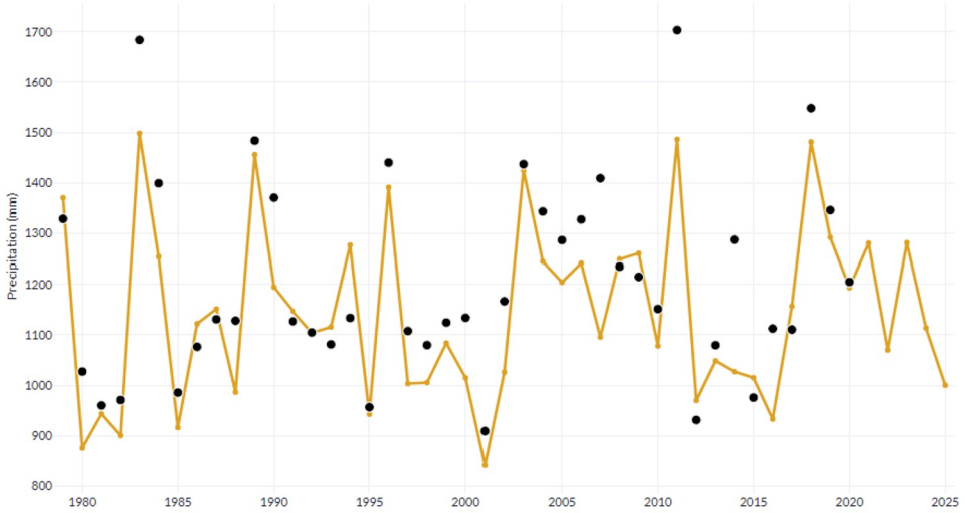
0	1–5	5–20	20+
Ninguno	Bajo	Medio	Alto

Datos climáticos: una fuente que cubra todos los distritos y semanas

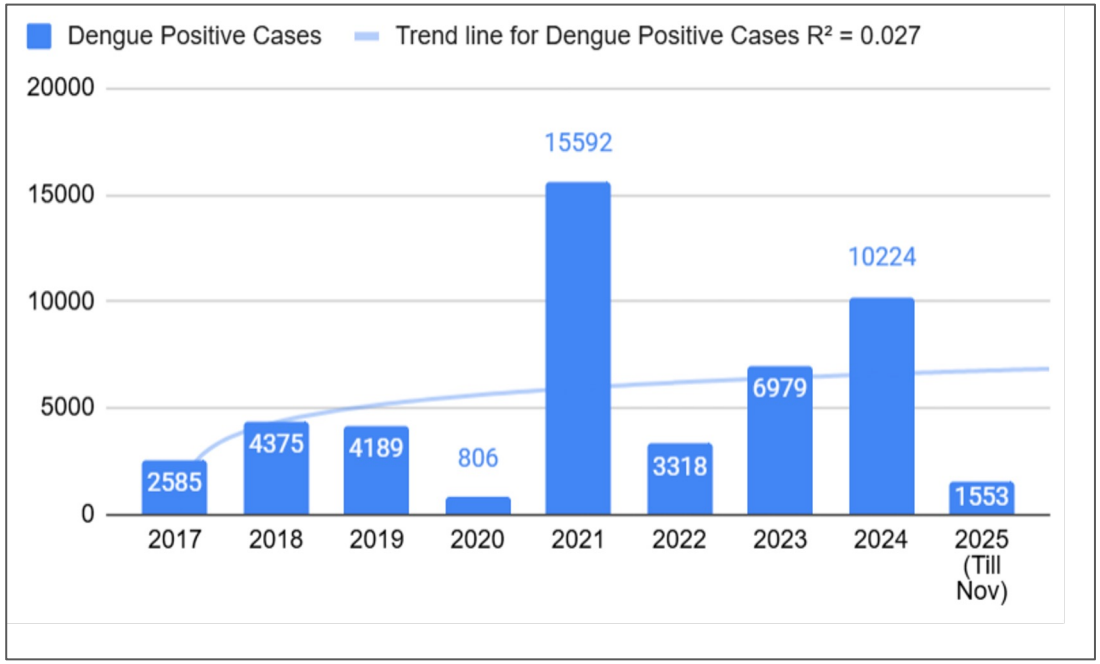
Los datos de estaciones se consideran la verdad sobre el terreno

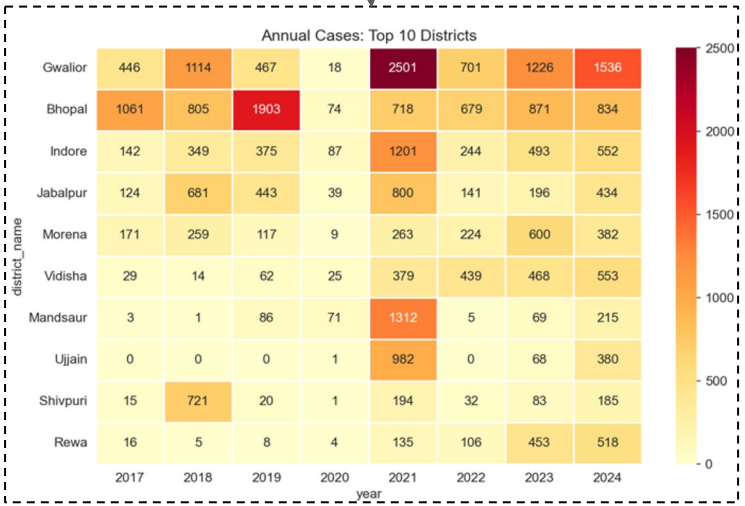


- Para ERA5 y los datos en rejilla del IMD con datos de estaciones
- Al comparar temperatura y humedad de ambos con los datos diarios de estaciones, son casi iguales
- La precipitación se correlaciona mejor en el IMD

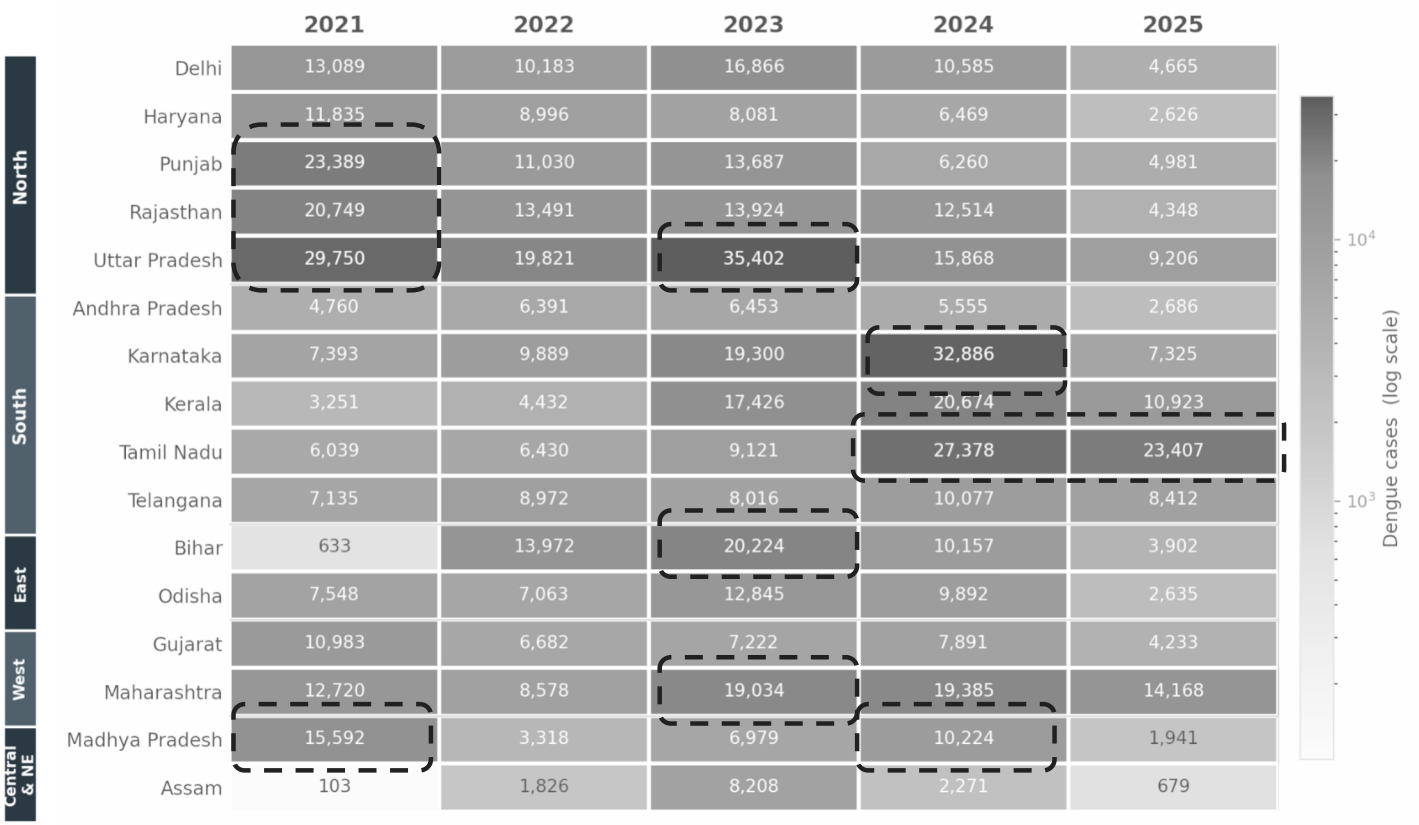


Análisis exploratorio de datos de MP: picos según regiones y años, que requerían más investigación





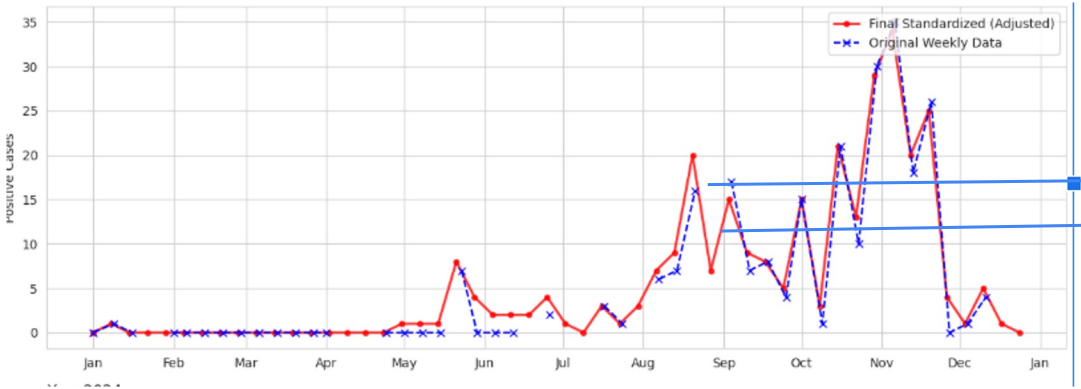
En la India, distintas regiones tienen picos en años distintos



- Esto significa que los picos dependen de factores muy ligados al espacio, como la entomología o los serotipos
- Contradice la idea de que los picos se deban solo a la pospandemia o a la migración

En la práctica (sobre el terreno): los datos de casos son incompletos y están infradeclarados, y hay que corregirlos antes de modelizar

Datos de casos faltantes

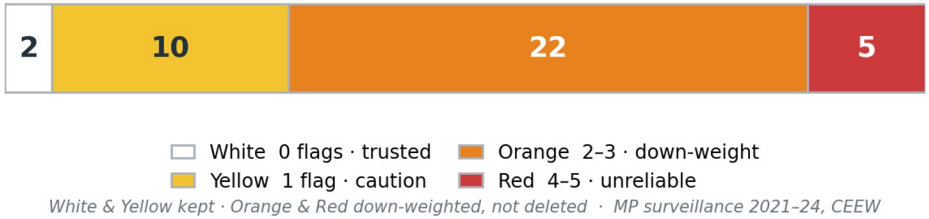


Casos ajustados con totales mensuales

Casos semanales notificados

Datos de casos infradeclarados

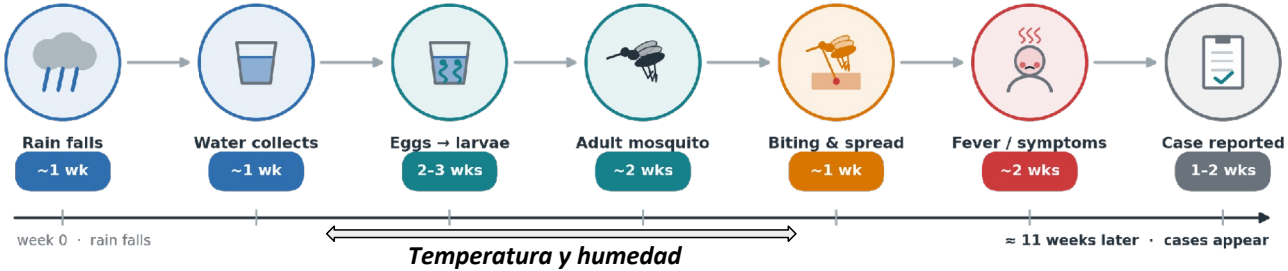
39 distritos activos: y semanas-distrito

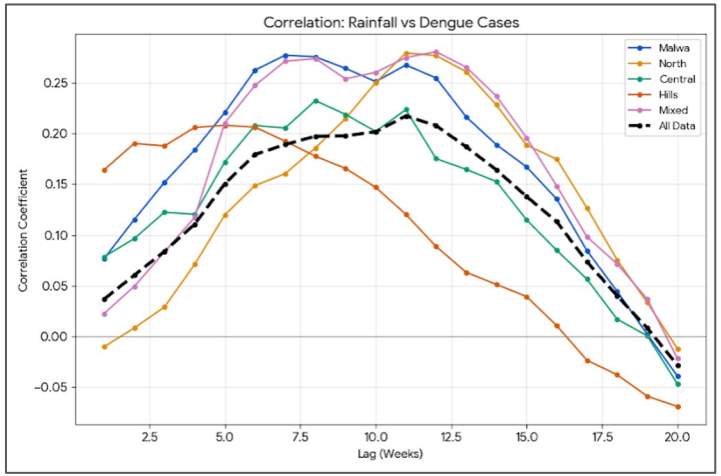


Cada año-distrito pasa 4 controles de calidad:

1. Número de muestras nulo / inverosímilmente bajo
2. Semanas sin datos (sin ninguna notificación)
3. **Caídas y picos repentinos sin explicación**
4. Incoherencias internas (p. ej. positivos > muestras)

Variables retardadas en aprendizaje automático: los parámetros climáticos preceden a los casos en unas 8–12 semanas, según la firma de cada región





Regiones	Pico de lluvias Retardos
Meseta de Malwa: (p. ej. Indore, Ujjain)	**8 semanas**
Norte/Gird: (p. ej. Gwalior, Morena)	**11 semanas**
Centro/Narmada: (p. ej. Jabalpur, Hoshangabad)	**8 semanas**
Colinas/Satpura: (p. ej. Balaghat, Chhindwara)	**9 semanas**
Mixta/Bundelkhand: (p. ej. Sagar, Rewa)	**12 semanas**

Modelo de aprendizaje automático en dos fases: la fase 1 señala las semanas con casos (ajustada para el recall); la fase 2 estima cuántos

QUÉ ENTRA — 56 variables (M6)

Lluvia y precipitación · 15
lluvia con retardo óptimo, días húmedos y de lluvia intensa; sumas de 4/8 sem., extremos

Temperatura y humedad · 11
temperatura y humedad en 3 bloques; máx./mín. de 12 sem.; semanas en la banda 25–32 °C

Historial de casos y referencias · 12
incidencia con retardos 9–12; 7 referencias por distrito; ancla SARIMA

Pruebas de laboratorio y vigilancia · 8
log de muestras y positividad, retardos 5–8; medias móviles de 4 sem.

Vegetación e interacciones · 10
hábitat NDVI; lluvia×temperatura; idoneidad para mosquitos; indicador COVID

Se eliminaron las señales del calendario estacional: los picos se explican por el clima, no por la fecha.

Cómo son los recuentos de casos · 5616 semanas-distrito, 2021–24

Recuento	Banda	Porcentaje de semanas
0 casos	Semana tranquila	3,243 · 57.7%
1–5	Esporádico	1,139 · 20.3%
6–20	Elevado	795 · 14.2%
>20	Brote	439 · 7.8%

FASE 1 — ¿Habrá casos?

- El clasificador analiza la tendencia de casos y el clima y emite una alerta sí / no por semana-distrito

→ **Umbral de alerta fijado en 0,35, no en 0,5: reacciona a señales débiles para que se escapen pocos brotes reales**

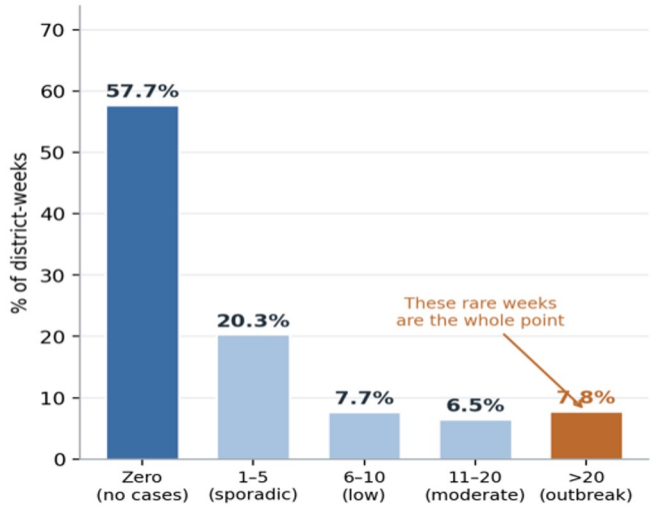
FASE 2 — ¿Cuántos casos?

- Solo se ejecuta si la fase 1 dice sí: un conjunto de 3 modelos estima el número de casos
- Pérdida de Tweedie: pensada para recuentos sesgados con muchos ceros; las predicciones nunca son negativas
  - Error absoluto medio asimétrico

Dos añadidos que mejoran la exactitud

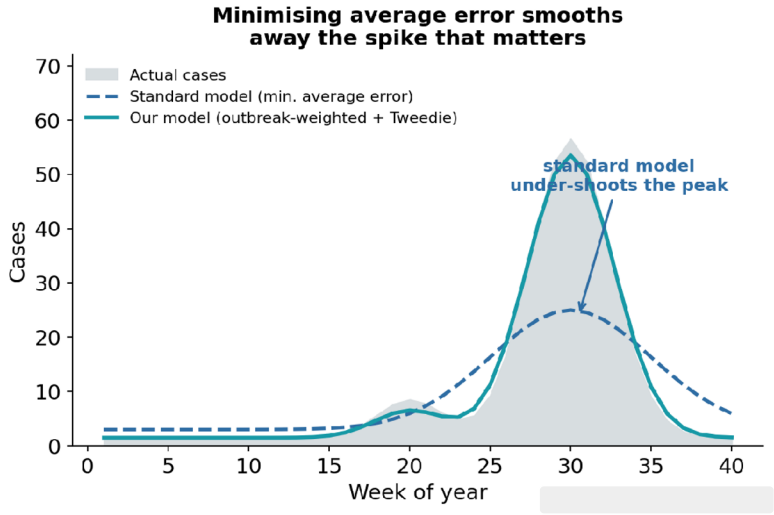
La distribución de pérdida de Tweedie:

- Un modelo que trata todas las semanas por igual aprende simplemente la señal dominante: «predecir tranquilidad».
- Usamos una pérdida de Tweedie, diseñada para recuentos con muchos ceros y sesgados a la derecha, de modo que las predicciones no sean negativas y la pérdida se concentre en la cola peligrosa



Error absoluto medio asimétrico (AsymMAE):

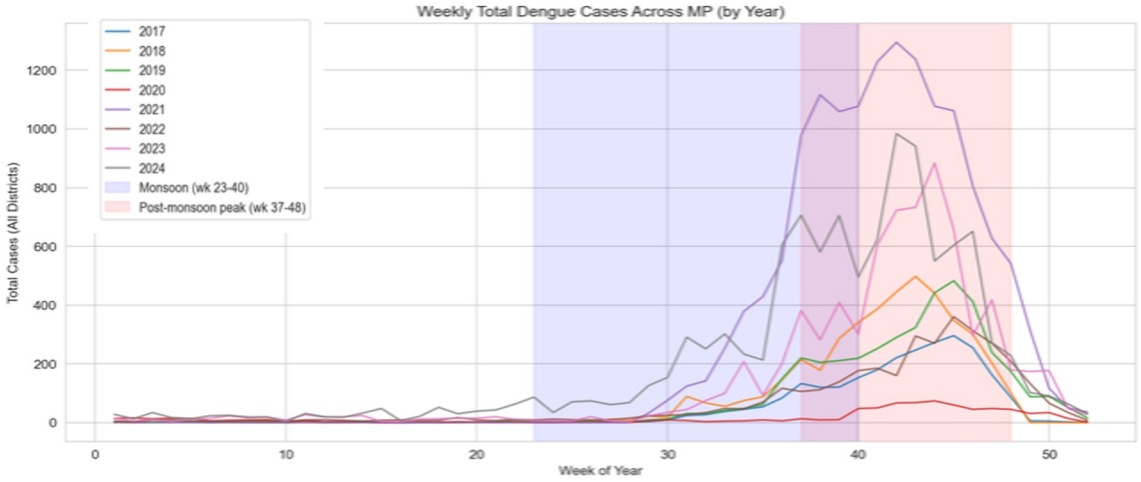
- Predecir «la media» parece correcto casi siempre, aunque sabemos que no lo es.
- Una función de pérdida asimétrica que penaliza mucho más no detectar un brote que sobrestimar una semana tranquila: el modelo se ve obligado a perseguir el pico, no la media.
- Además, las semanas de brote se sobreponderan de 2 a 6 veces en el entrenamiento, para que el modelo practique más con los eventos raros que realmente activan las alertas sanitarias.

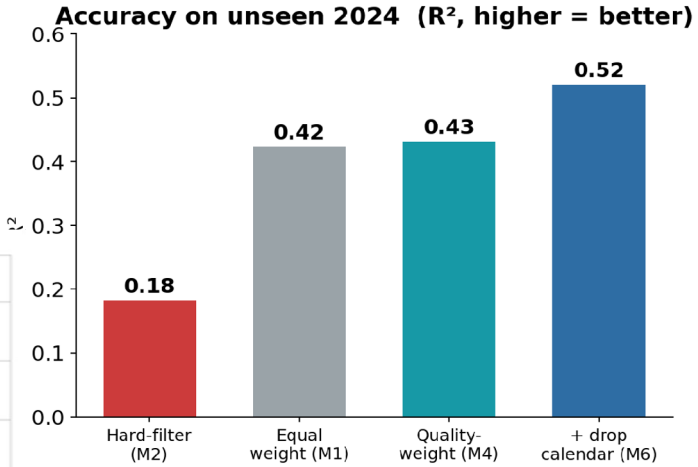


El dengue es estacional, pero ¿y si el monzón llega antes o después?

La forma de la temporada es fija; solo cambia su tamaño, así que comprobamos si el modelo simplemente memoriza la fecha

- La temporada **tiene forma fija**: **~78 % de los casos de sept. a nov.**, pico en octubre, cada año. Solo cambian **el tamaño** (≈8×) y **la duración** (≈8 vs. ≈4 meses).
- Eso convierte el calendario en un atajo tentador: «predecir un pico en septiembre porque es septiembre».
- Por eso **eliminamos todas las variables de calendario** (semana del año, indicadores de monzón) y volvimos a ejecutar:
  - **modelo ponderado por calidad → mejoró** (R^2 0,43 → **0,52**): aprende el «porqué» climático.
  - **modelo sin ponderar → empeoró** (0,32 → 0,26): necesitaba la muleta.
- Esto ayuda al modelo a identificar los verdaderos predictores de los casos de dengue, es decir, los cambios climáticos.





M1 — Referencia: datos completos, sin filtro de calidad, mayor recall (0,85).
M2 — «White-only»: entrenado con datos limpios, elimina sesgos, el más débil
M4 — Ponderado por calidad: sobrepondera los datos limpios, sólido y poco complejo
M6 — El mejor: ponderado por calidad, sin calendario, aprende el clima

Experimentos: comparación de seis modelos (2024 reservado, distritos limpios)

Qué cuenta como brote

- Semana de brote = más de 5 casos en un distrito en una semana
- M6 se evalúa con este umbral sobre los datos reservados de 2024.

Modelo	Variables	Temporada	MAE	RMSE	R^2	F1	Precisión	Recall
M1: se conservan todos los datos (sin filtrar)	60	Sí	4.28	9.85	0.42	0.85	0.85	0.85
M2: se excluyen las semanas infradeclaradas	25	Sí	4.85	11.73	0.18	0.80	0.80	0.81
M3: retardos por distrito incluidos	69	Sí	4.38	10.69	0.32	0.81	0.89	0.74
M4: semanas infradeclaradas ponderadas	60	Sí	4.07	9.77	0.43	0.84	0.88	0.81
M5: retardos por distrito incluidos + n.º de semana eliminado	65	No	4.64	11.16	0.26	0.84	0.87	0.81
M6: M4+M5	**56**	**No**	**4.03**	**8.97**	**0.52**	**0.85**	**0.87**	**0.84**

Nuestros próximos pasos en el proyecto

➔ **Aumentar la granularidad:** pasar del nivel de distrito al subdistrital (barrio/centro de salud primaria) con datos y análisis geoespacial

➔ **Cambios de serotipo:** qué cepa circula (DEN-1/2/3/4). Un cambio, p. ej. un aumento de DEN-2, puede convertir un año tranquilo en uno de brote.

➔ **Vigilancia de mosquitos:** entomología sobre el terreno, encuestas larvarias y densidad de vectores adultos (dónde y cuántos).

➔ **Despliegue piloto en MP y Tamil Nadu:** ejecutar el sistema en dos estados para probarlo con distintos climas y sistemas de notificación.

Lecciones para quienes desarrollan…

1. **Las políticas no condicionan si se construye: deciden qué merece la pena construir**
2. **Su propio cómputo es ahora un objeto de política pública**
3. **Los datos representativos y soberanos son una condición para la confianza, no un extra**
4. **La exactitud en laboratorio no es exactitud sobre el terreno**
5. **Una previsión no es un resultado; la apropiación institucional es la estrategia de despliegue**
6. **Optimice el capital de confianza, no solo la función de pérdida**

Gracias