# IA para la contabilidad de carbono

Dan Cusworth

Escuela de verano virtual CCAI

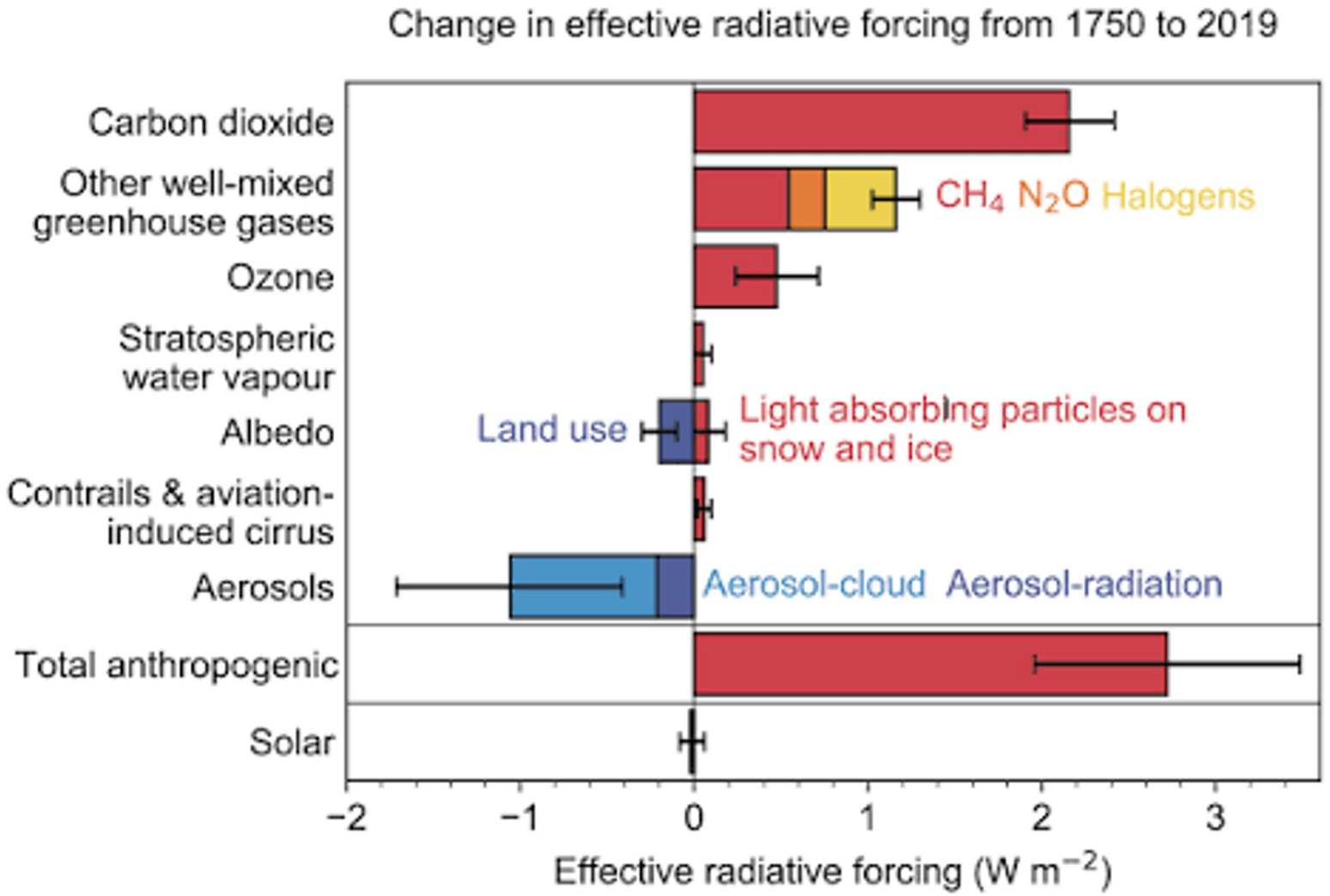
Agosto de 2026

# Hoja de ruta de la clase

| | |
|---|---|
| 0:00–0:30 | **Parte 1** Fundamentos de la contabilidad de carbono |
| 0:30–0:35 | Momento de participación |
| 0:35–1:05 | **Parte 2** Teledetección para la contabilidad de carbono |
| 1:05–1:15 | Pausa + momento de participación |
| 1:15–1:45 | **Parte 3** Usar la IA para mejorar la contabilidad de carbono |
| 1:45–2:00 | Debate y cierre |

# Parte 1 Fundamentos de la contabilidad de carbono

¿Por qué se quiere contabilizar el carbono?




Emisiones de dos moléculas de carbono

**Dióxido de carbono (CO2)**

**Metano (CH4)**

Responsables de la mayor parte del calentamiento desde la era preindustrial

Fuente: IPCC

Por qué se quiere contabilizar el carbono:

- Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
- Seguir las existencias de carbono y otros GEI
- Cuantificar las incertidumbres

Tema de la clase de hoy

- Mejorar la contabilidad empresarial
- Reforzar el análisis del ciclo de vida
- Apoyar los procesos de verificación y auditoría

# Una taxonomía: ¿dónde interviene la IA en la contabilidad de carbono?

*Usa este mapa como guía: cada nodo se trata más adelante en la clase*

| Datos de actividad | Estimación de emisiones | Notificación y agregación | Verificación y auditoría |
|---|---|---|---|
| ¿Qué actividades ocurren y a qué escala? | ¿Cuántos GEI se emiten por unidad de actividad? | Combinar fuentes en inventarios | Comprobaciones cruzadas independientes de datos autodeclarados |
| Imágenes: detección de objetos (granjas, pozos de petróleo, acerías, árboles) | Detección y segmentación de penachos | Homogeneización/organización automatizada de los datos de actividad | Validación cruzada por satélite |
| Imágenes: detección de deforestación/cambio de uso del suelo | Inversión atmosférica (flujo descendente) | Escalado del análisis del ciclo de vida a todos los tipos de producto | Señalización de anomalías/superemisores |
| Indicadores indirectos: extracción de datos públicos (p. ej., concesiones de operadores) | Mejora de los factores de emisión | Estimación del alcance 3 de la cadena de suministro | Cuantificación de la incertidumbre |

Esta clase profundiza en la estimación de emisiones (detección de penachos) y en los datos de actividad, con conexiones constantes con la verificación.

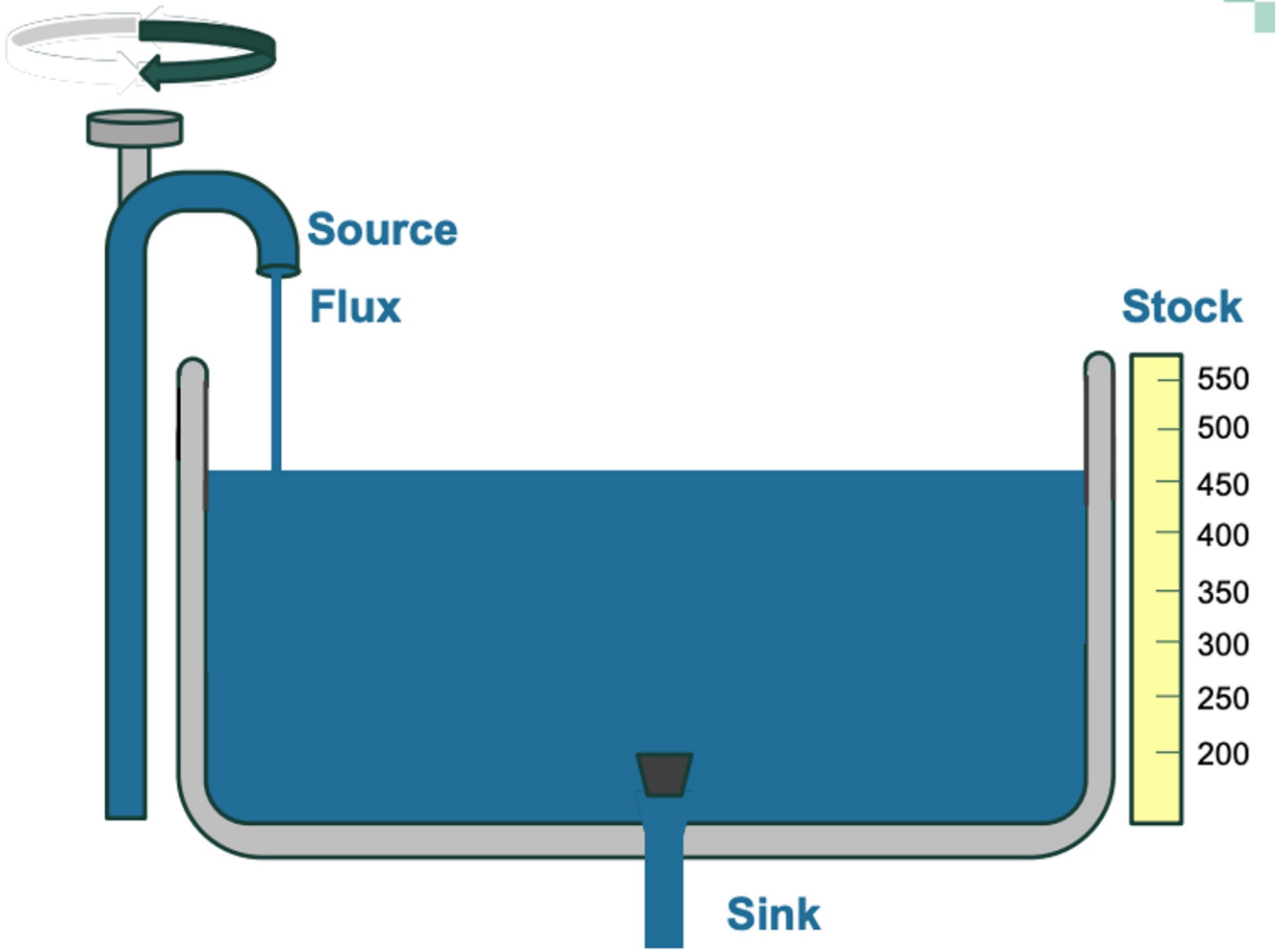
# Relación entre fuentes, sumideros y existencias

Imagina un lavabo con un grifo y un tapón en el fondo.

- **Existencias**: el agua del lavabo
- **Fuente**: añadir agua al lavabo
- **Sumidero**: sacar agua del lavabo

- La tasa de aumento de las existencias en el lavabo se denomina flujo.

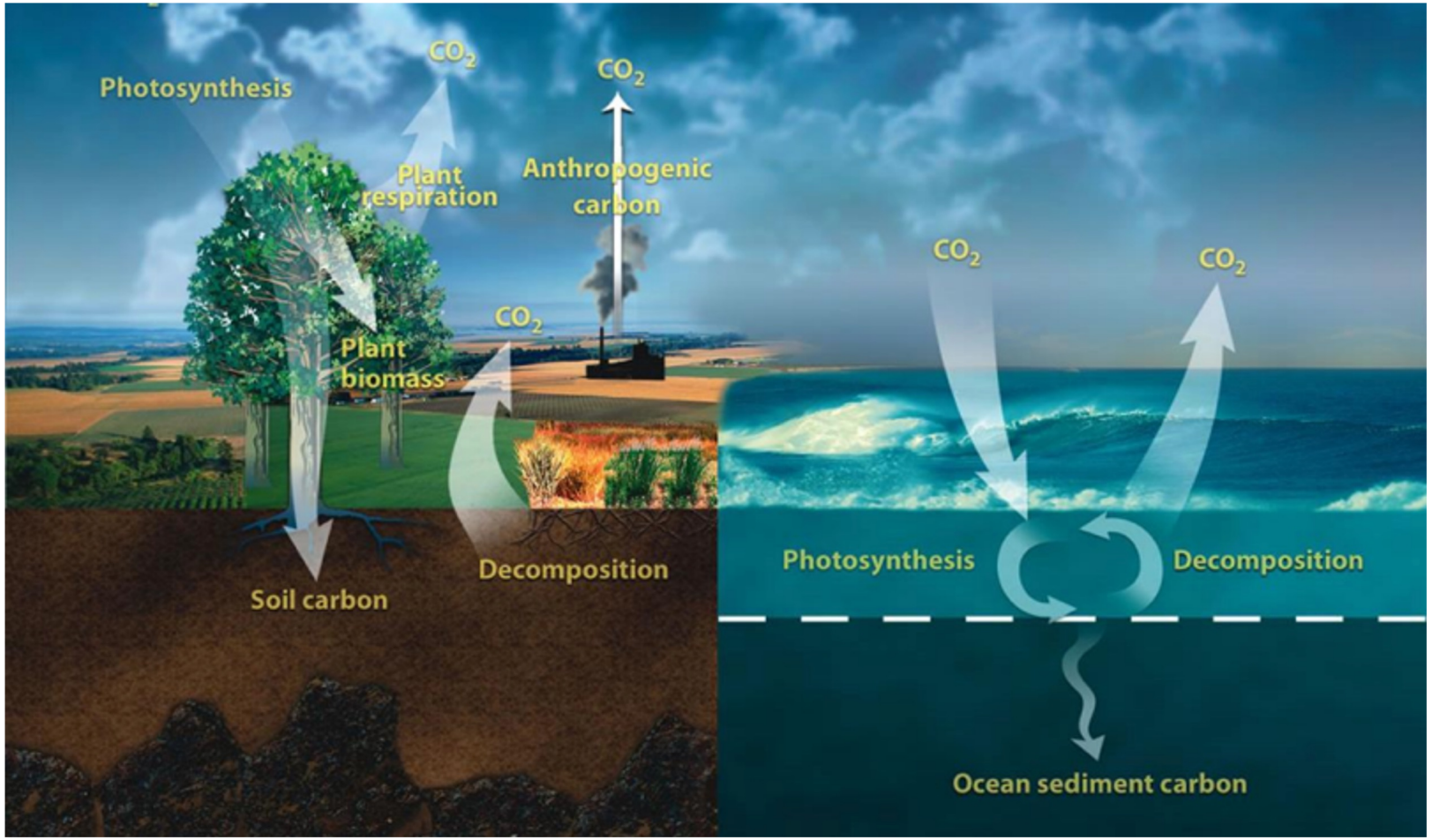
– Las fuentes generan flujos positivos.
– Los sumideros generan flujos negativos.




Fuente: NASA ARSET

¿Cuáles son las principales fuentes y sumideros de carbono?

Fuentes y sumideros de carbono




Contabilizar el carbono/CO2 requiere comprender

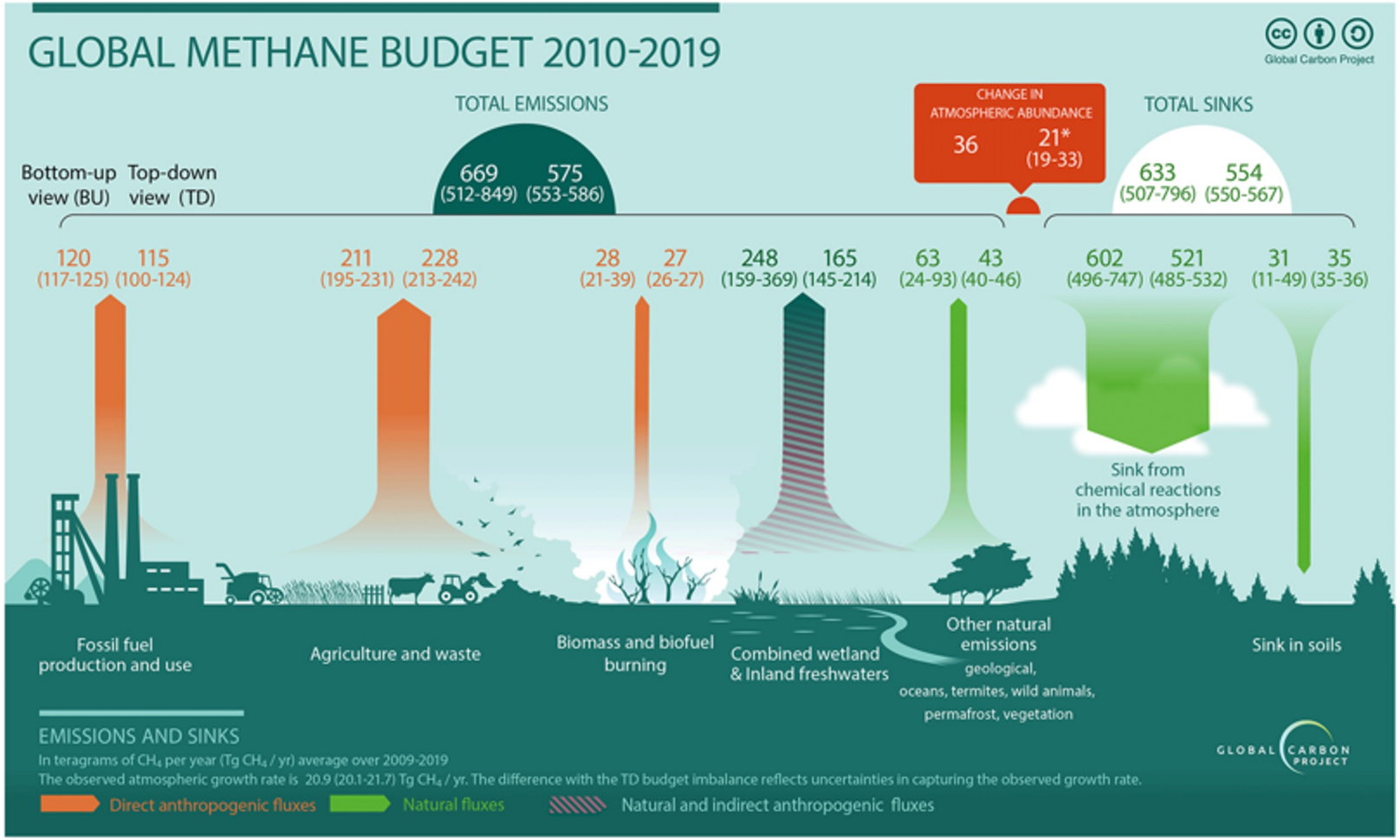
- El tamaño de las existencias de carbono en los distintos «reservorios»

- Los procesos que modifican esas existencias (p. ej., ciclos y emisiones)

Fuente: ORNL

¿Cuáles son las principales fuentes y sumideros de carbono?

Fuentes y sumideros de metano (CH4)




El metano es diferente del CO2:

- Su principal sumidero es la atmósfera, por oxidación
- Vida corta (~10 años frente a cientos de años)
- GEI 80 veces más potente que el CO2 (por unidad emitida) en un horizonte de 20 años

Fuente: Sanuois et al. (2020)

**Acuerdo de París:** tratado internacional jurídicamente vinculante cuyo objetivo es mantener el calentamiento muy por debajo de 2 °C




- **Contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC):** cada país debe presentar y actualizar progresivamente su propio plan de reducción de emisiones cada cinco años.

- **Transparencia y rendición de cuentas:** los miembros siguen e informan de sus avances hacia sus NDC mediante informes normalizados y revisión internacional.

- Un **balance mundial** periódico, en el que los países evalúan el progreso colectivo hacia objetivos como mantener el aumento de la temperatura mundial muy por debajo de 2 °C.

# ¿Qué métodos tradicionales se usan en la contabilidad de carbono?

1

**Datos de actividad**

¿Qué se hizo? Combustible quemado, cabezas de ganado, tierras desbrozadas

2

**Factores de emisión**

¿Cuántos GEI por unidad de actividad? Factores por defecto del IPCC o específicos del sector

3

**Autodeclaración**

Las entidades presentan inventarios a los reguladores o a normas voluntarias (GHG Protocol)

4

**Verificación y auditoría**

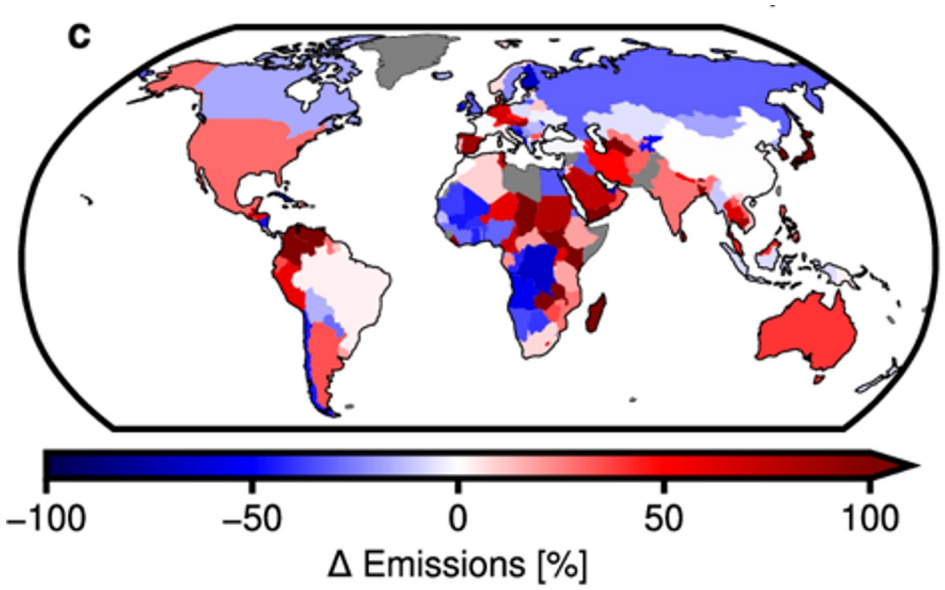
Comprobación por terceros; controles puntuales; validación cruzada por satélite

¿Dónde puede complicarse?

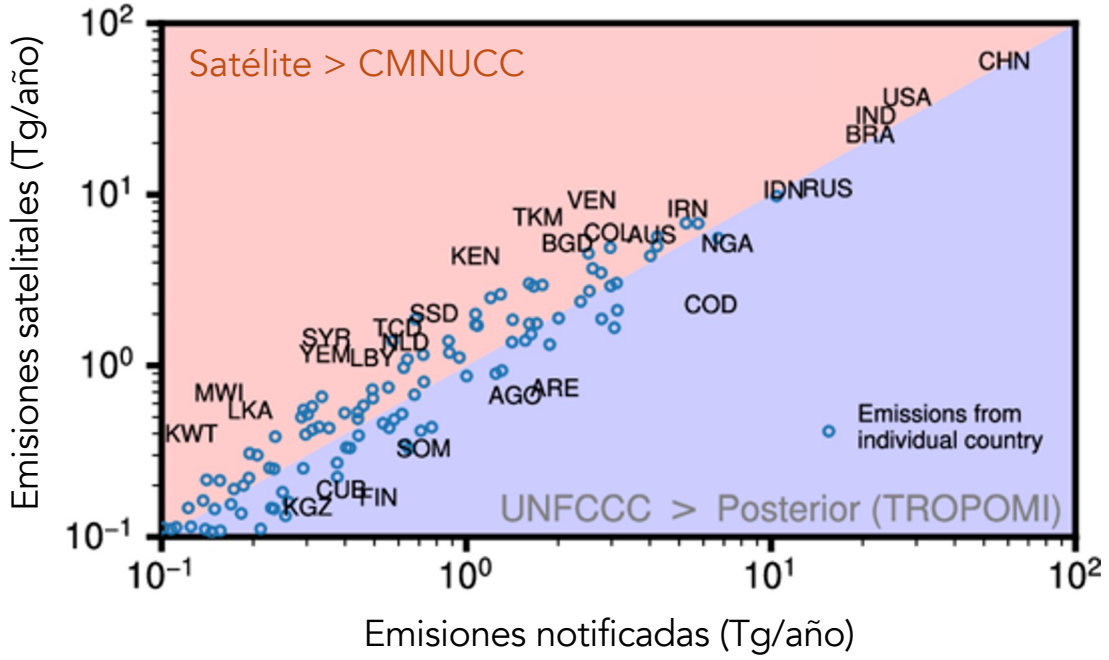
- Los datos autodeclarados pueden tener sesgos por incentivos
- Los factores de emisión pueden no reflejar las condiciones locales
- La verificación consume muchos recursos y a menudo es incompleta.

**Ejemplo: estudio satelital «descendente» comparado con las notificaciones de CH4 al IPCC/a la CMNUCC**

Diferencia relativa entre satélite e informes a la CMNUCC




Satélite frente a informes de la CMNUCC




Fuente: East et al. (2025)

Preguntas para la clase

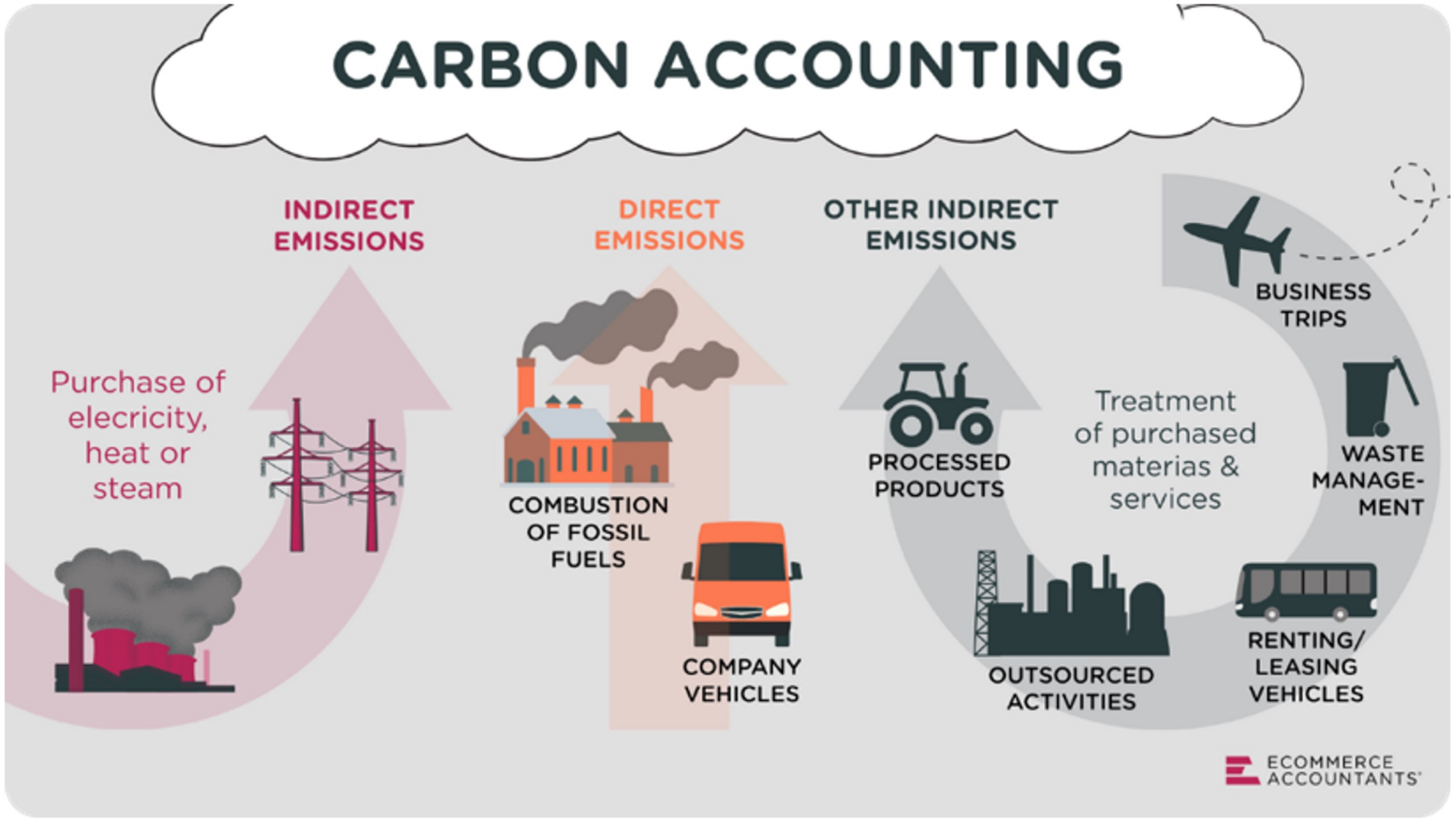
- En un momento profundizaremos en los métodos «descendentes» (basados en mediciones atmosféricas) de contabilidad de carbono. Pero según lo que sabes y has visto sobre las mediciones descendentes y ascendentes

  - Encuesta en directo: ¿en cuál tiendes a confiar más? ¿Por qué?
    - Vota: ¿en qué confías más, en lo descendente o en lo ascendente?

  - ¿Cómo generarías confianza en un método, o en ambos?

  - ¿Qué es «suficientemente bueno»?

# Breve repaso de otros usos de la contabilidad de carbono: contabilidad de carbono empresarial




Contabilidad:

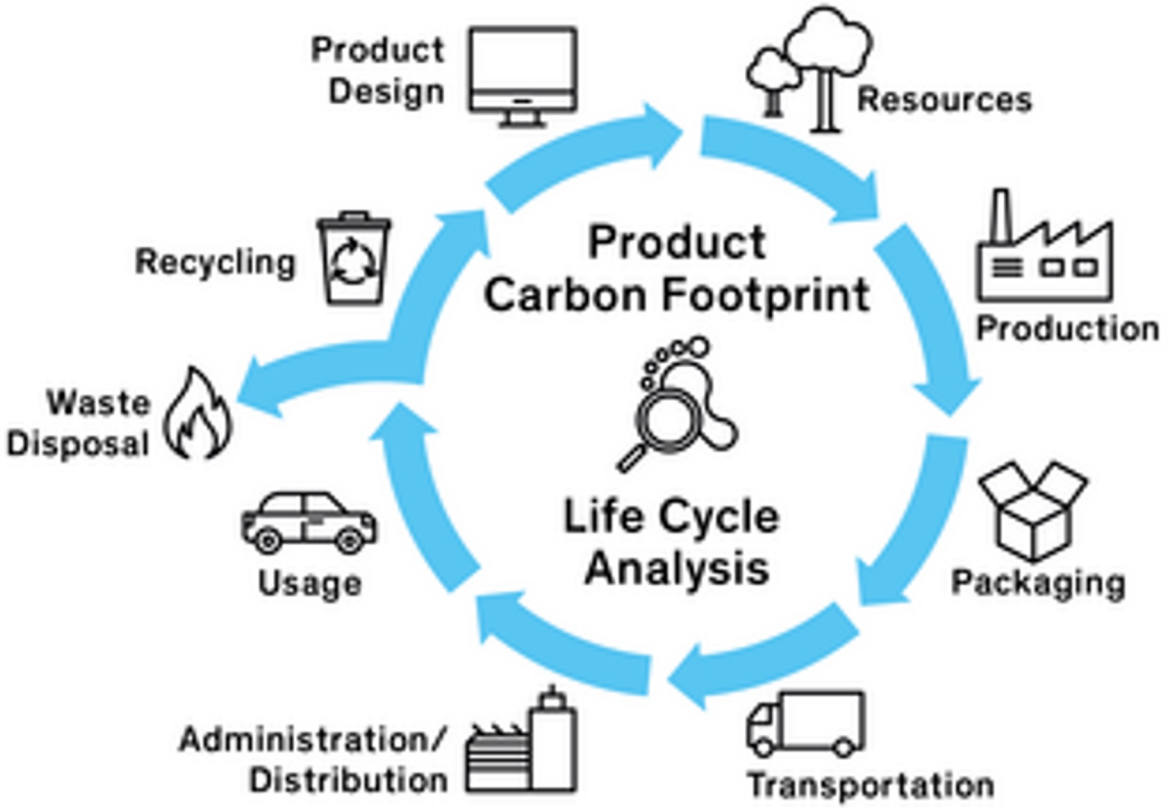
- Cuantificación de todas las fuentes de emisión, directas e indirectas

Mercados:

- Compra de créditos o derechos de emisión si/cuando las emisiones son excesivas:
  - Comercio de derechos (cumplimiento): compra de emisiones «sobrantes» a una entidad de bajas emisiones
  - Créditos de carbono (voluntarios): compra de créditos de proyectos verificados que eliminan o mitigan emisiones

Fuente: ecommerceaccountants.co.uk

# Análisis del ciclo de vida: desglosar el carbono de cada producto o proceso




Suele seguir procedimientos normalizados (p. ej., ISO 14040 y 14044) para contabilizar todos los materiales, la energía y el agua usados en un producto/proceso

Posibles aplicaciones de la IA:

- Extracción automatizada de datos
- Modelización predictiva (p. ej., si faltan datos de proveedores)
- Modelización predictiva de los posibles beneficios de carbono si se actualizan partes del proceso
- Escalado a todos los productos/procesos de una cartera (no solo a los productos estrella)

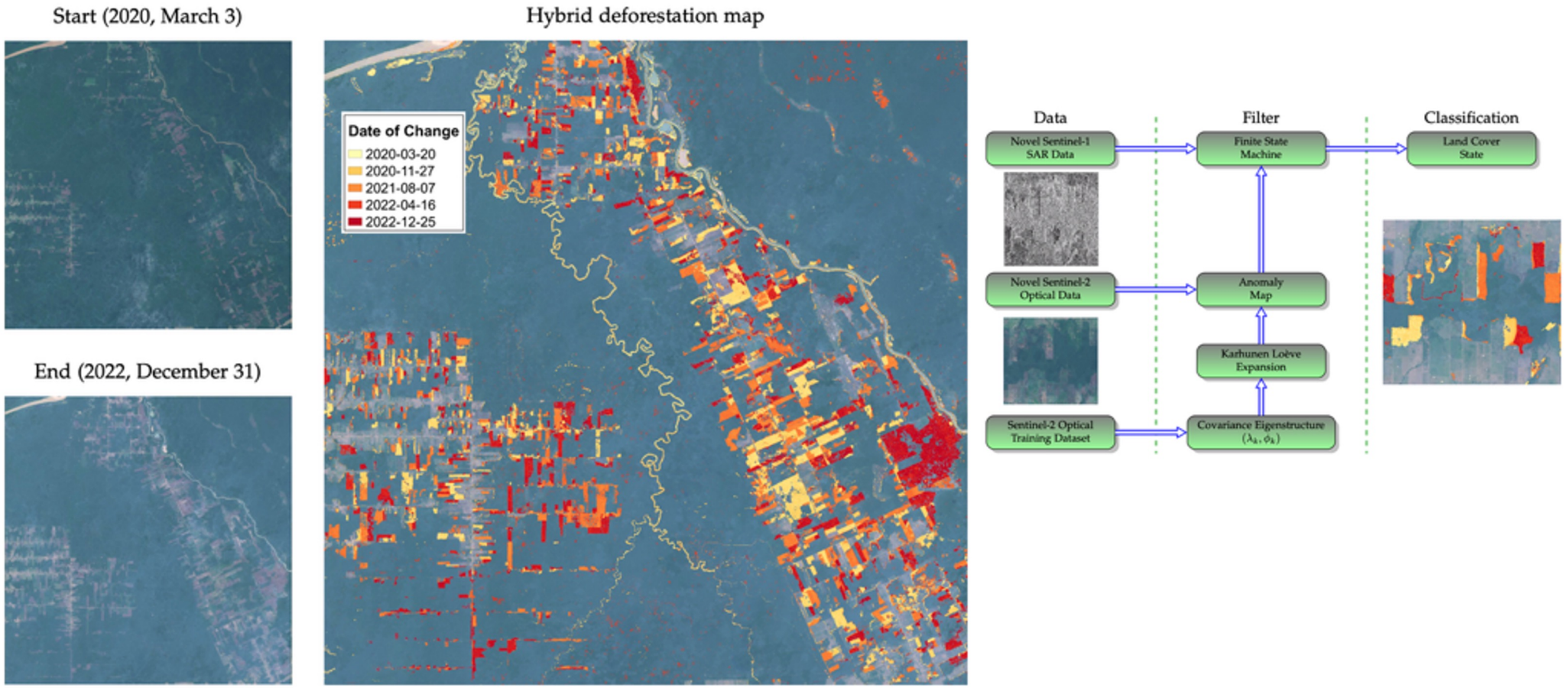
Fuente: myclimate.org

# Parte 2 Teledetección para la contabilidad de carbono

Volviendo a la cuantificación de emisiones: el papel de la teledetección satelital

**Datos de actividad**: uso de imágenes de alta resolución (visible, infrarrojo, radar) para identificar equipos, procesos y cambios

**Ejemplo**: combinación de visible (RGB) y radar de apertura sintética (SAR) para seguir la deforestación




Fuente: Castrillon-Candas et al. 2026: https://arxiv.org/pdf/2510.14092´

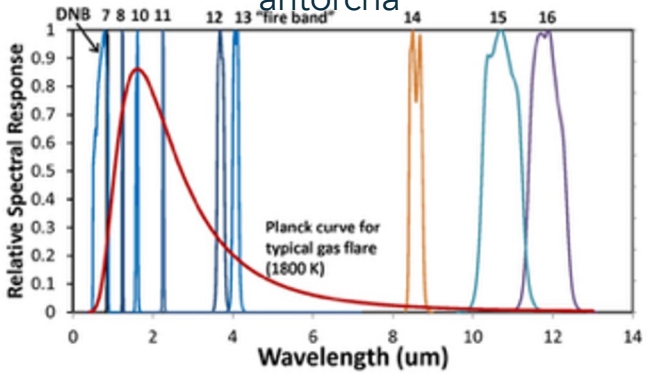
Volviendo a la cuantificación de emisiones: el papel de la teledetección satelital

**Datos de actividad**: detección de combustión térmica en sectores naturales y antropogénicos

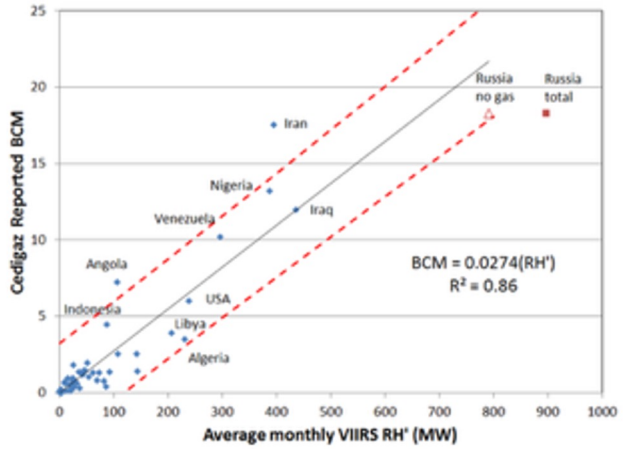
### Quema en antorcha (satélite VIIRS)




Ajustar una curva de Planck al espectro observado para estimar el calor de la antorcha




Relacionar la firma térmica con el volumen de gas quemado

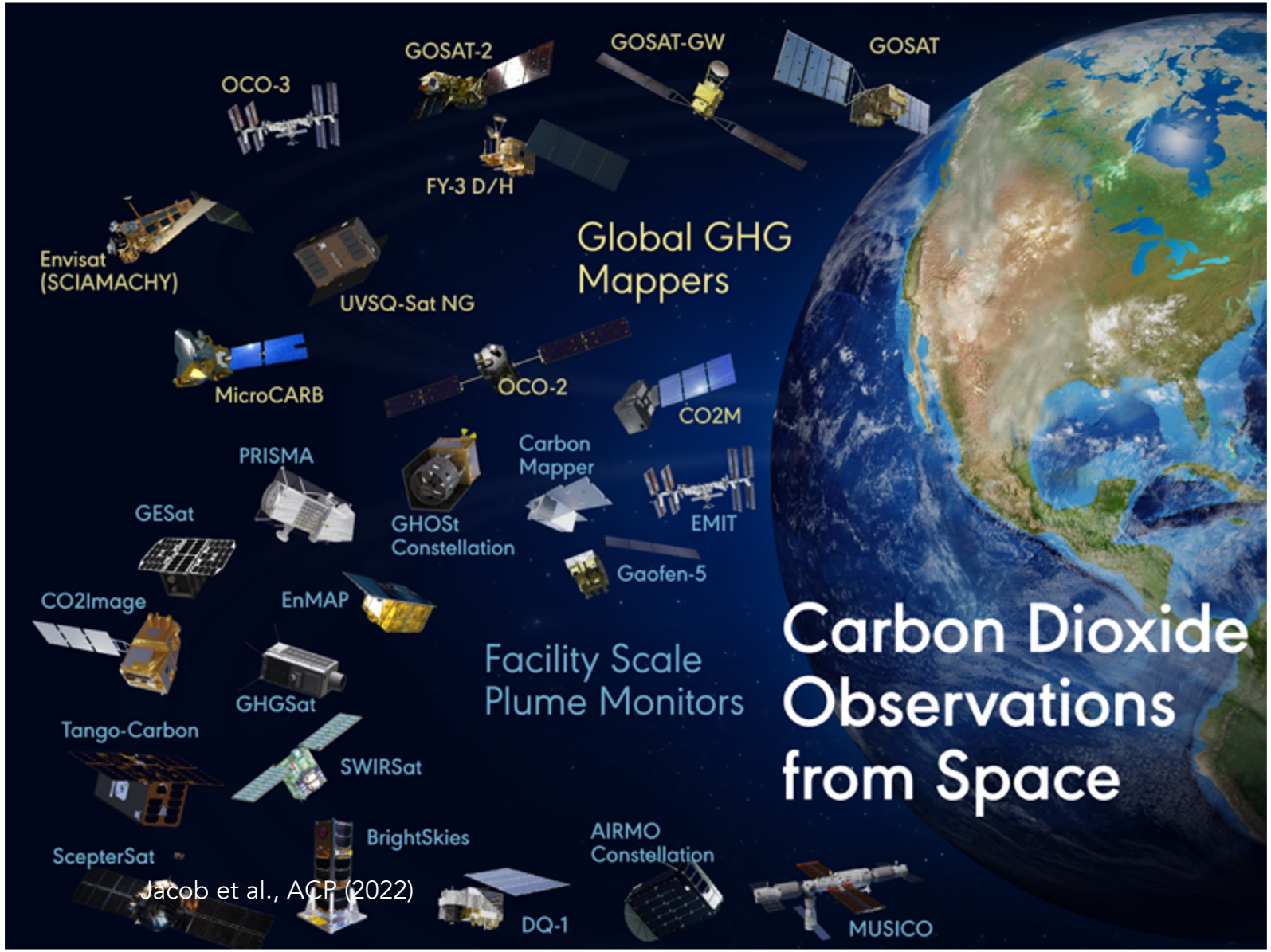



### Incendios (satélite VIIRS)




Fuente: Elvidge et al. (2016), NASA Worldview

# Volviendo a la cuantificación de emisiones: el papel de la teledetección satelital



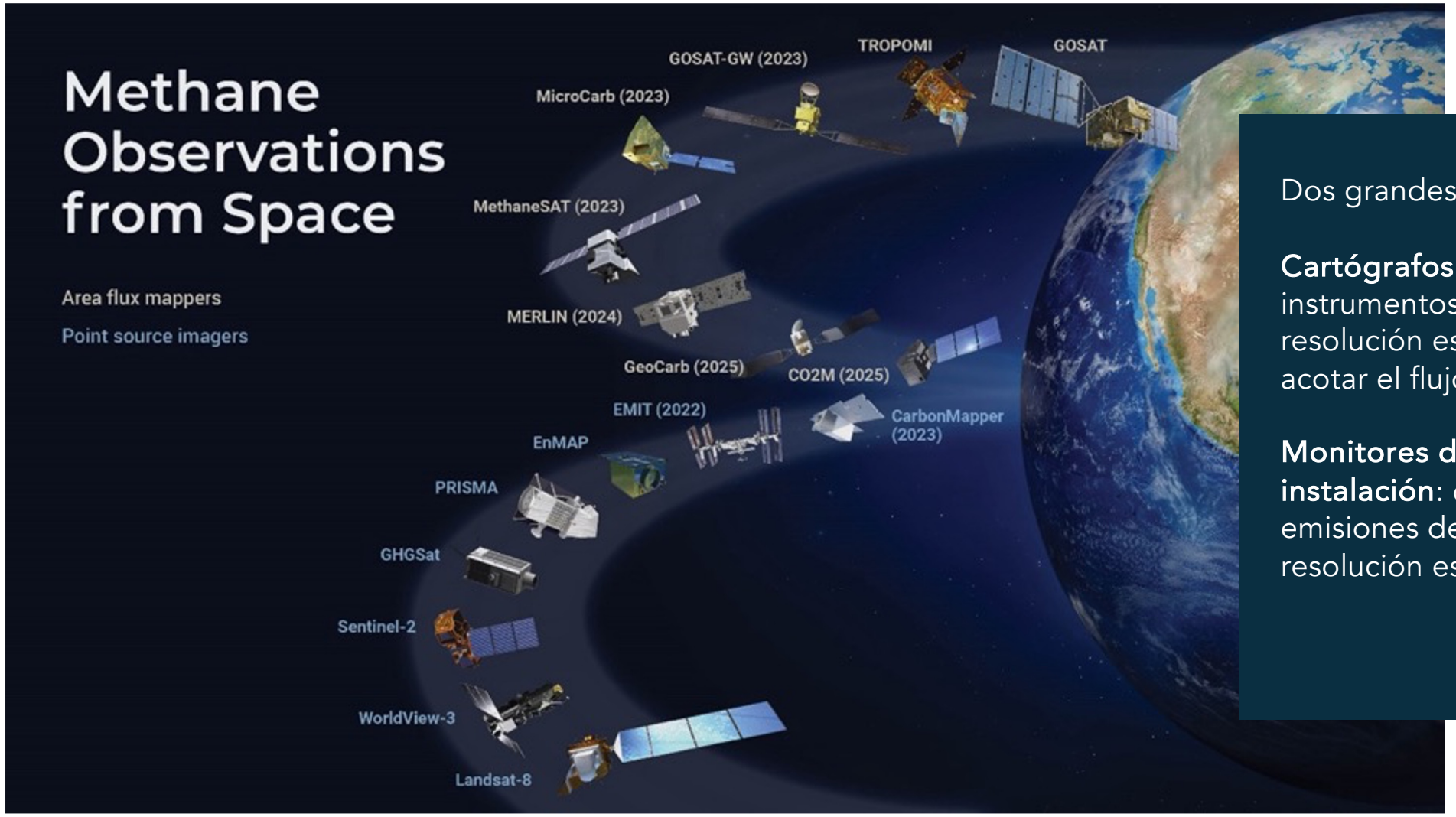

Jacob et al., ACP (2022)

Dos grandes categorías:

**Cartógrafos mundiales de GEI**: instrumentos de barrido amplio y resolución espacial gruesa, diseñados para acotar el flujo neto regional y mundial.

**Monitores de penachos a escala de instalación**: detección y cuantificación de emisiones de superemisores con fina resolución espacial

Volviendo a la cuantificación de emisiones: el papel de la teledetección satelital



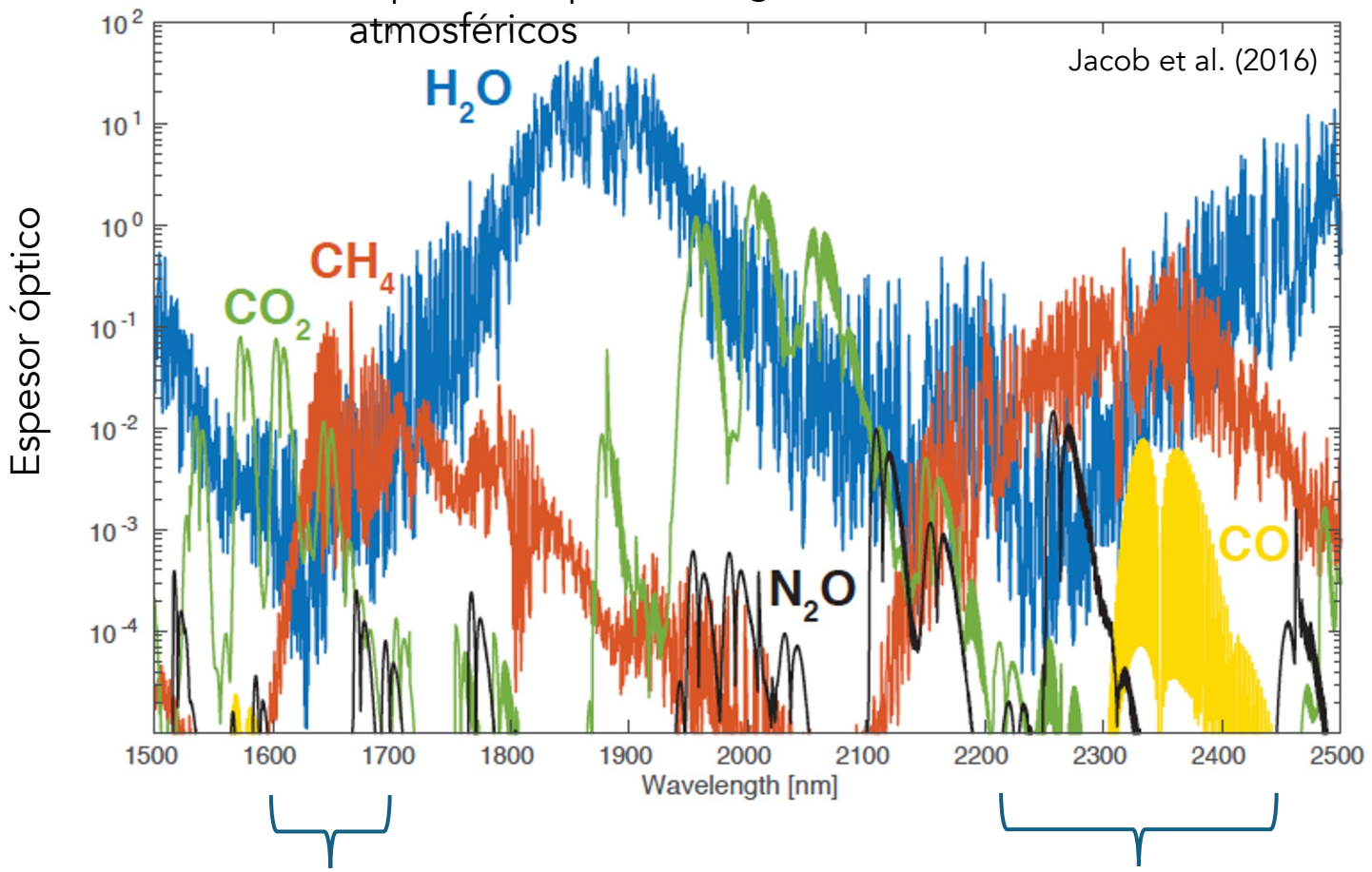

Dos grandes categorías:

**Cartógrafos mundiales de GEI**: instrumentos de barrido amplio y resolución espacial gruesa, diseñados para acotar el flujo neto regional y mundial.

**Monitores de penachos a escala de instalación**: detección y cuantificación de emisiones de superemisores con fina resolución espacial

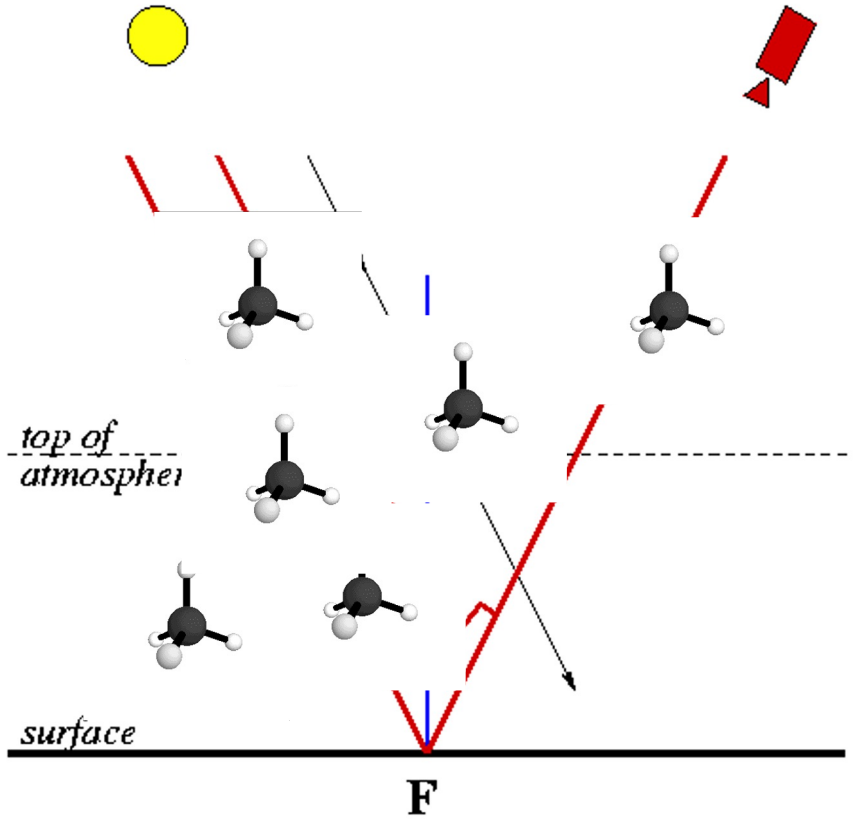
La teledetección del CH4 se basa en observar la radiancia cerca de las bandas de absorción rovibracionales del CH4.

Espesores ópticos de gases traza atmosféricos




Banda SWIR 1

Banda SWIR 2



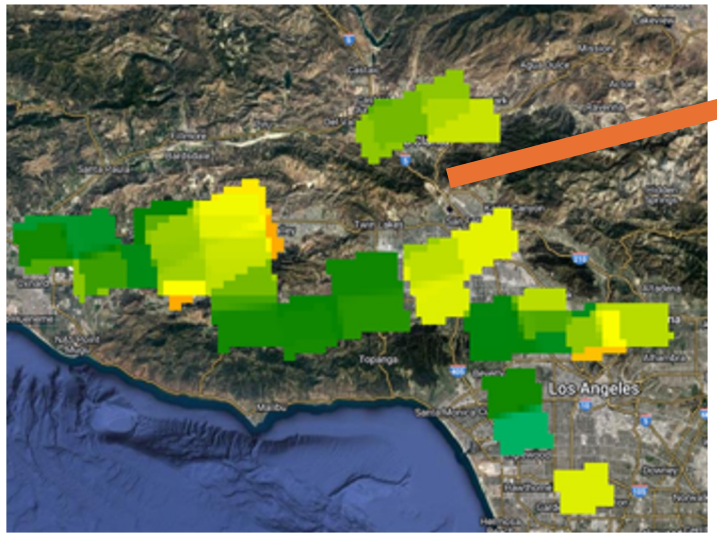

Transmitancia atmosférica:

$$T = \frac{\Phi_e^t}{\Phi_e^i} = e^{-\tau} = 10^{-A}$$

Espesor óptico (depende de la absorción del gas)

La separación entre cartógrafo mundial de GEI y monitor a escala de instalación depende del compromiso entre resolución espacial y espectral.

TROPOMI sobre Los Ángeles/Aliso Canyon (15/09/2020)



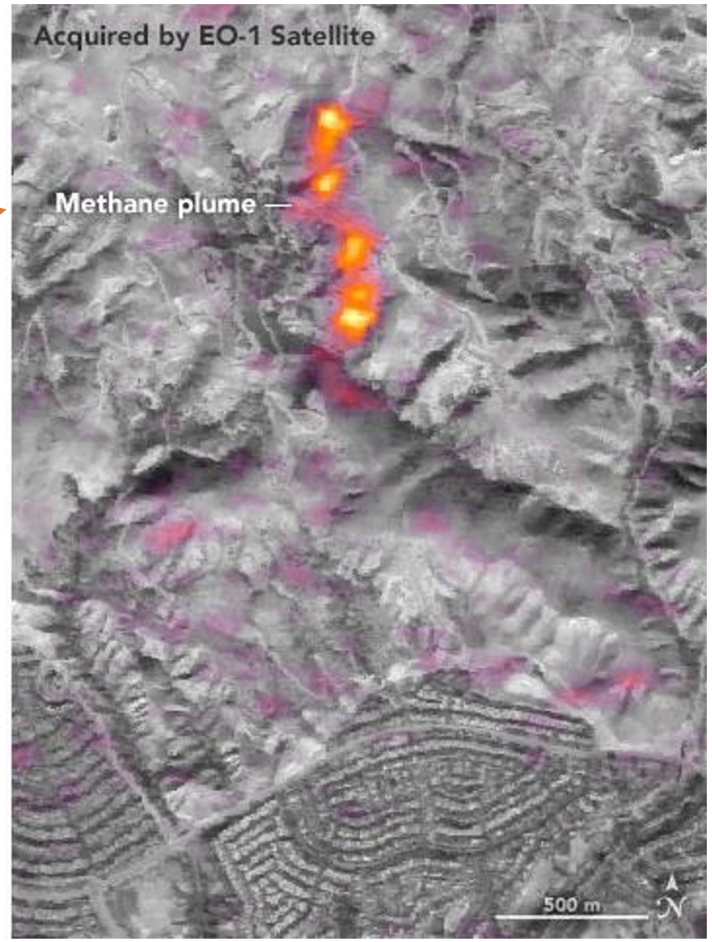

Google Earth Engine







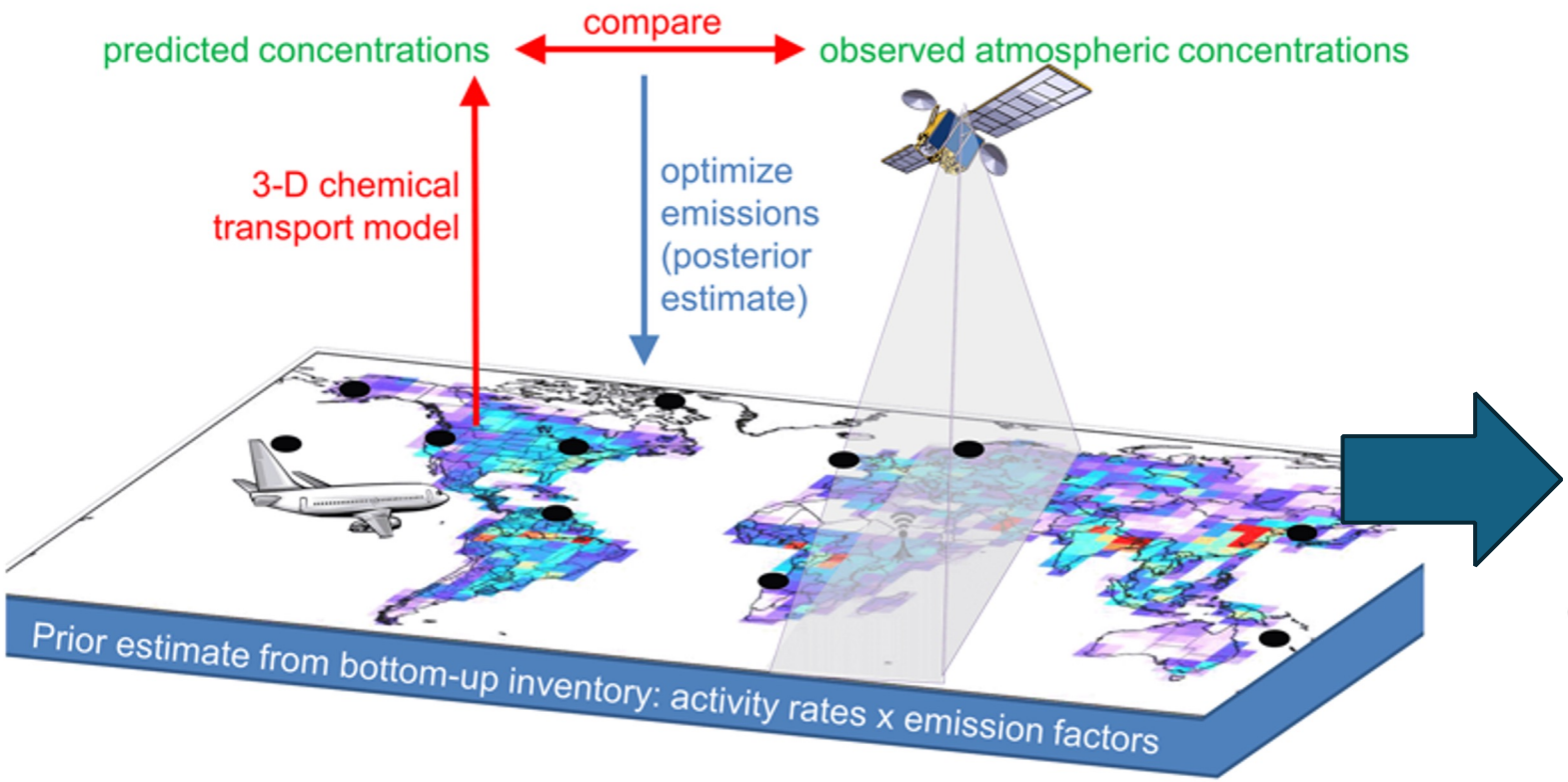
Instrumento Hyperion del EO-1: reventón de Aliso Canyon (2016)

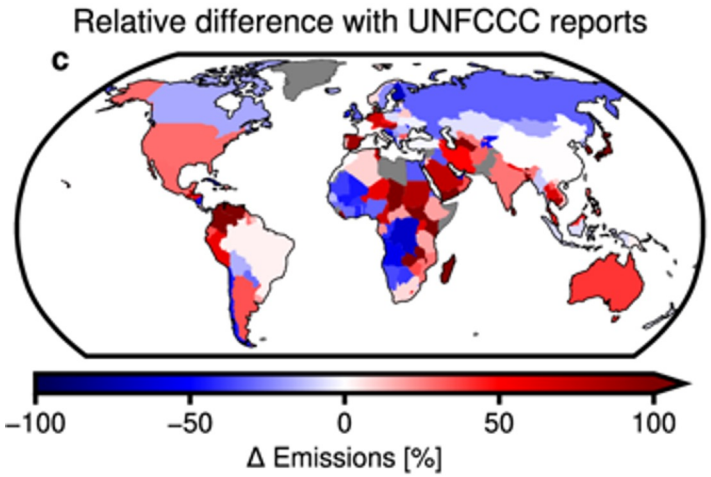


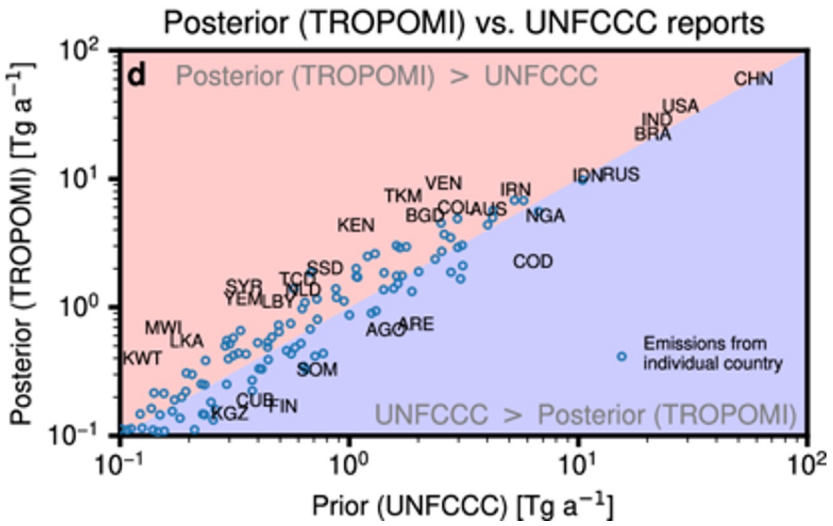

Thompson et al., GRL (2016)

Menor resolución espectral -> mayor resolución espacial. Capacidad de resolver grandes penachos a escala de instalación.

Los satélites de cartografía mundial de GEI estiman las emisiones regionales «invirtiendo» las concentraciones atmosféricas observadas para obtener flujos de emisión



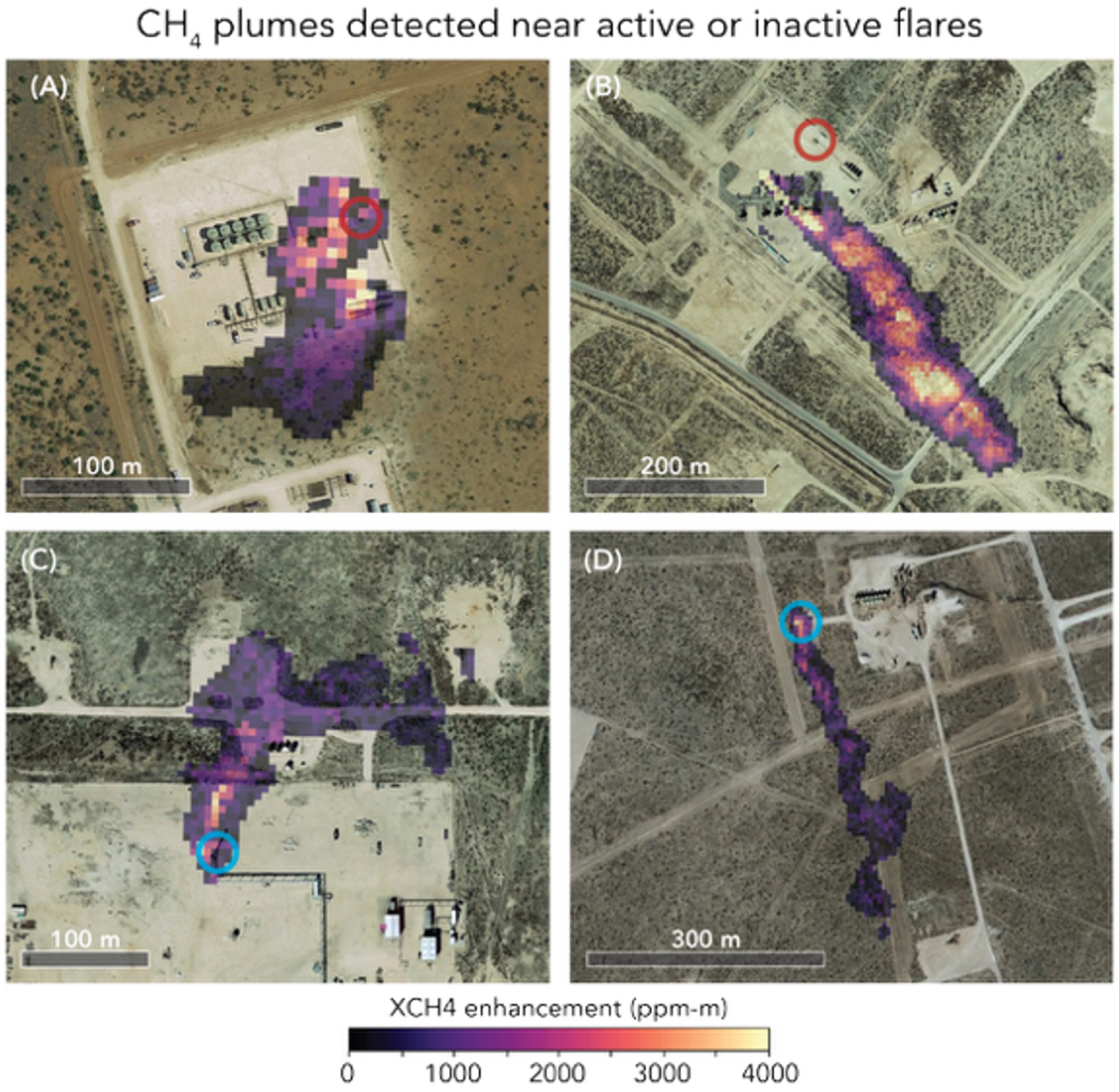




$$\hat{\mathbf{x}} = \arg\min \left\{ \|\boldsymbol{y} - \mathbf{H}\boldsymbol{x}\|_{S_o} + \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_A\|_{S_A} \right\}$$

Aquí, **x** representa las emisiones, **y** las concentraciones y **H** un modelo de transporte.

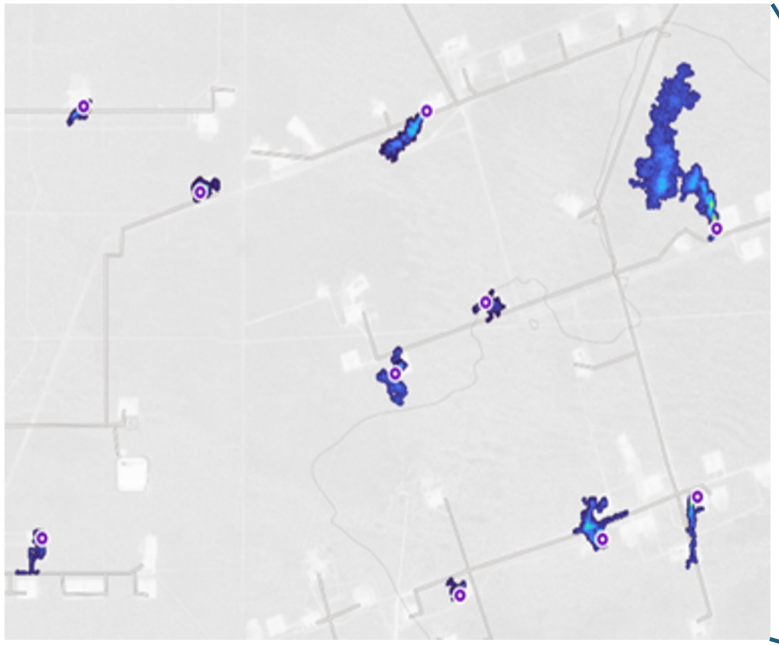
Worden et al., ACP (2022); East et al. (2025)

Los satélites a escala de instalación solo detectan una fracción de las fuentes, pero permiten atribuir las emisiones a cada instalación

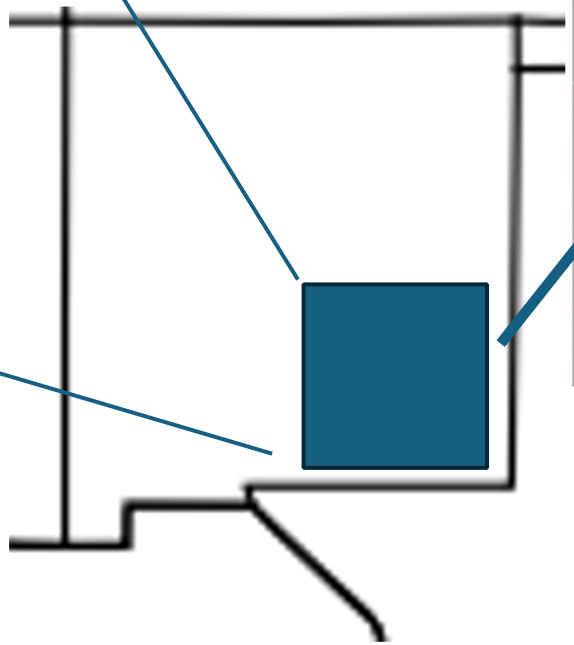


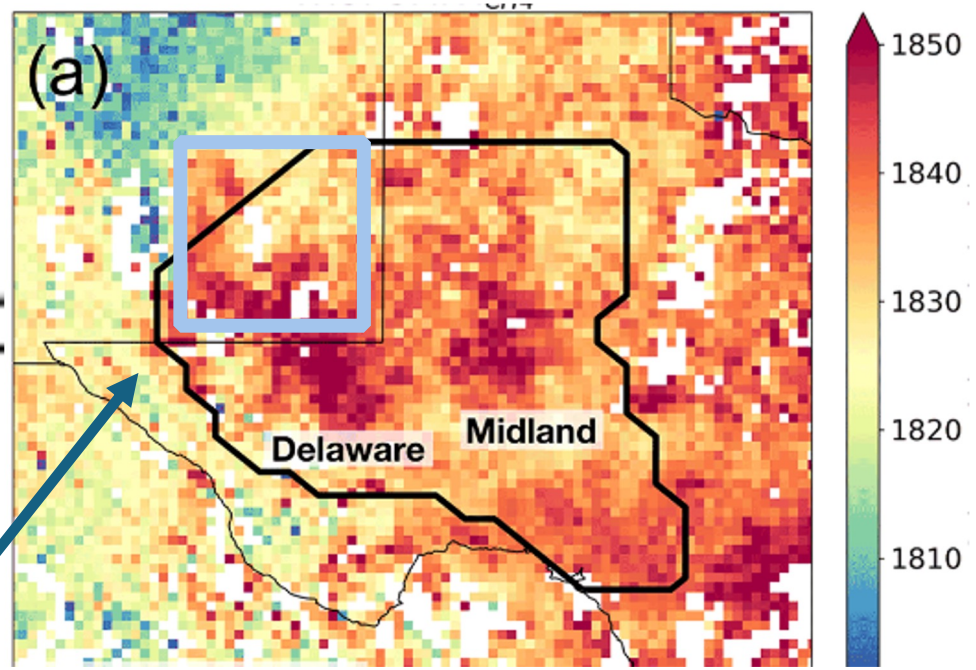
Entender las emisiones a escala de cuenca:
flujo total, superemisores, conjuntos de datos atribuidos

Estudio aéreo + satelital de 2024 en el Pérmico de Nuevo México



Cartografía aérea completa de todas las infraestructuras del Pérmico de Nuevo México: más de 200 000 visitas a emplazamientos en 3 semanas

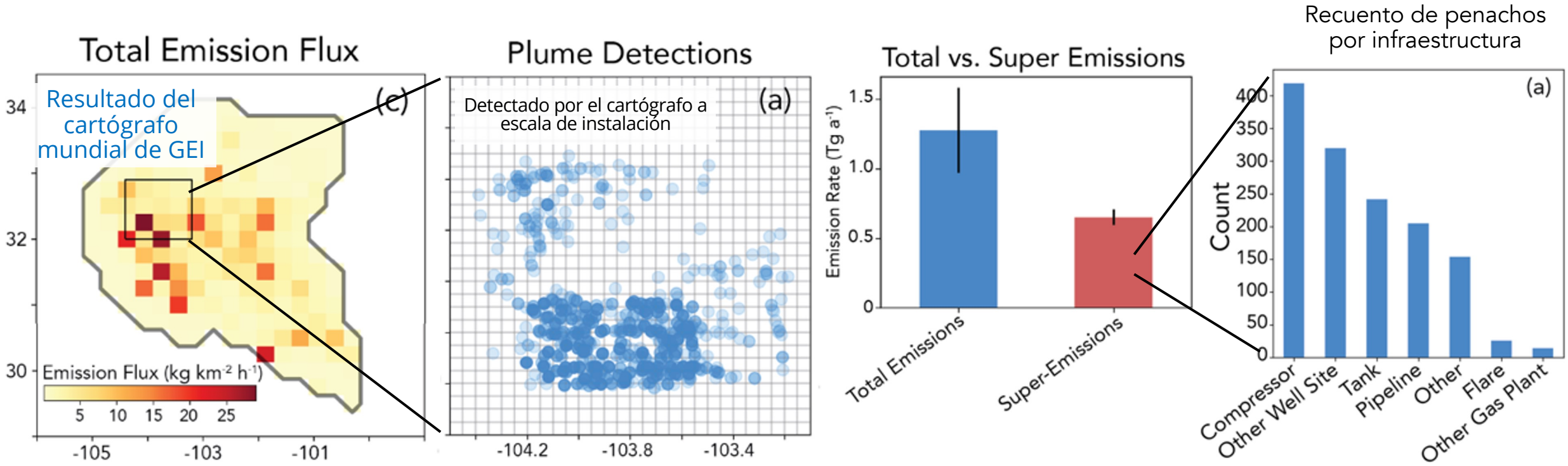





Estimación del flujo de la cuenca con observaciones del satélite TROPOMI

Entender las emisiones a escala de cuenca:
flujo total, superemisores, conjuntos de datos atribuidos

## Estudio aéreo + satelital de 2024 en el Pérmico de Nuevo México

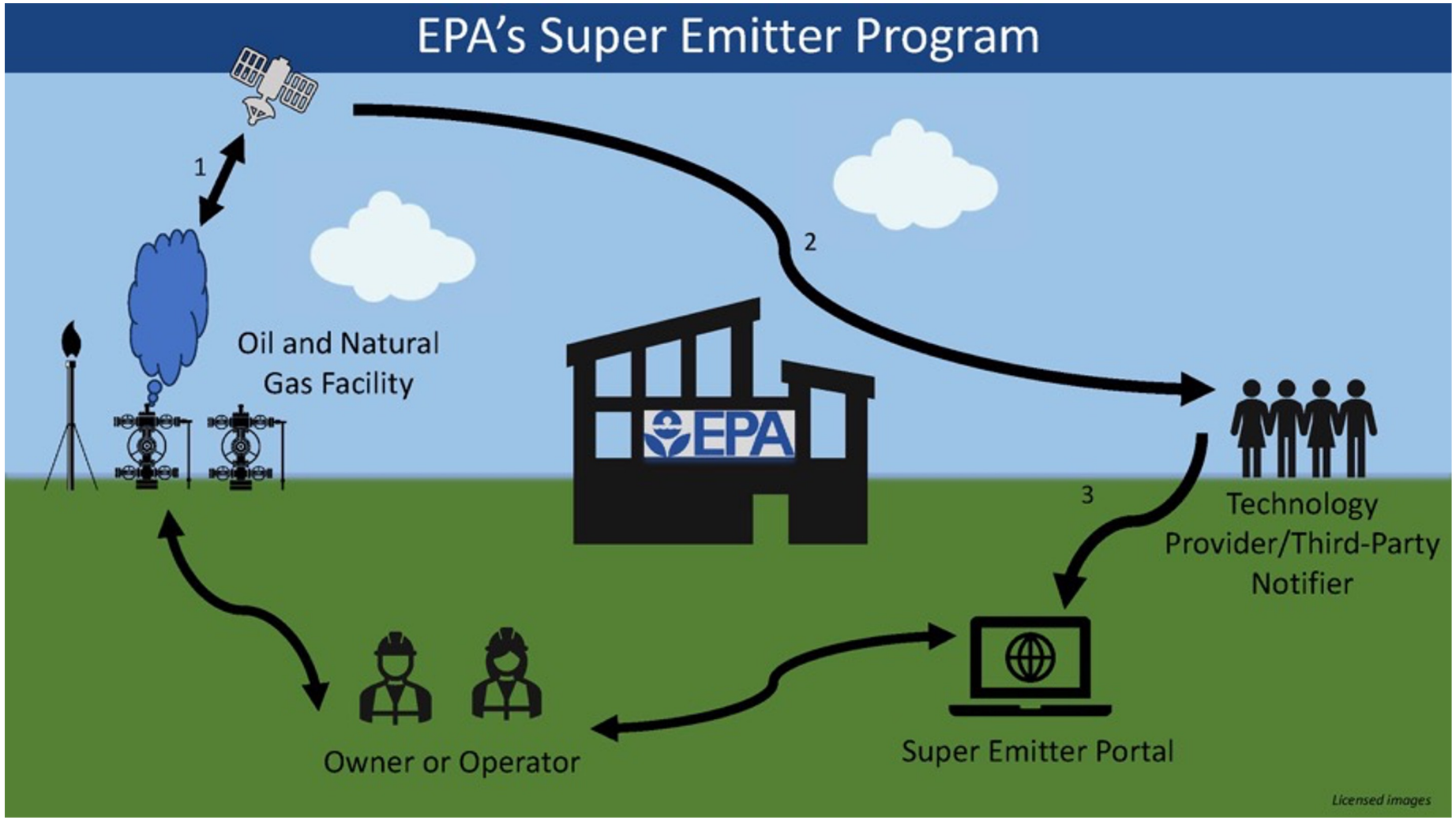



Cusworth et al. (en revisión)

Intensidad + infraestructura + atribución al operador: una vía hacia la mitigación

Cusworth et al. (2026)

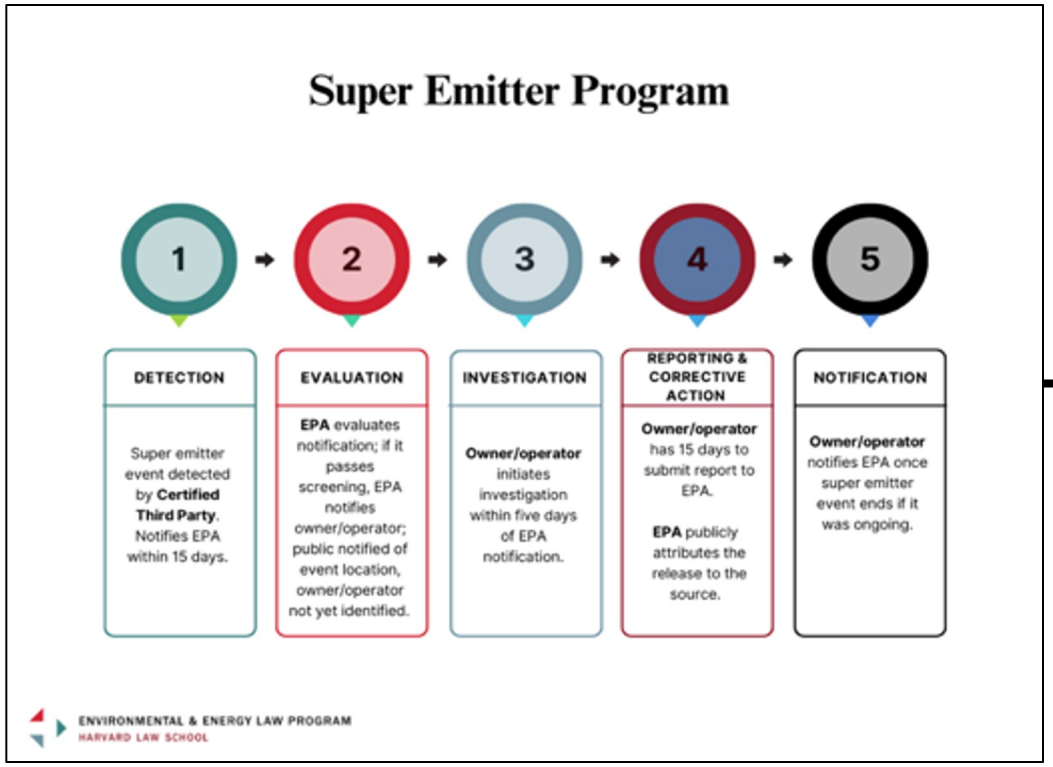
Volviendo a los programas de notificación:




Nueva norma en EE. UU.: las detecciones satelitales de superemisores realizadas por terceros pueden notificarse a la EPA (por notificadores autorizados), lo que obliga a los operadores a responder

Fuente: epa.gov

Se esperaba que los operadores notificaran después toda detección de superemisores en el programa obligatorio de notificación (Greenhouse Gas Reporting Program)




Anualmente: el operador debe notificar toda emisión > 100 kg/h independientemente de su duración

Anualmente: los operadores pagan la tasa por emisiones residuales que superen 1000 tCH4/año

EPA GHGRP (subparte W)* emisiones totales de metano para cualquier operación de más de 1000 tCH4/año

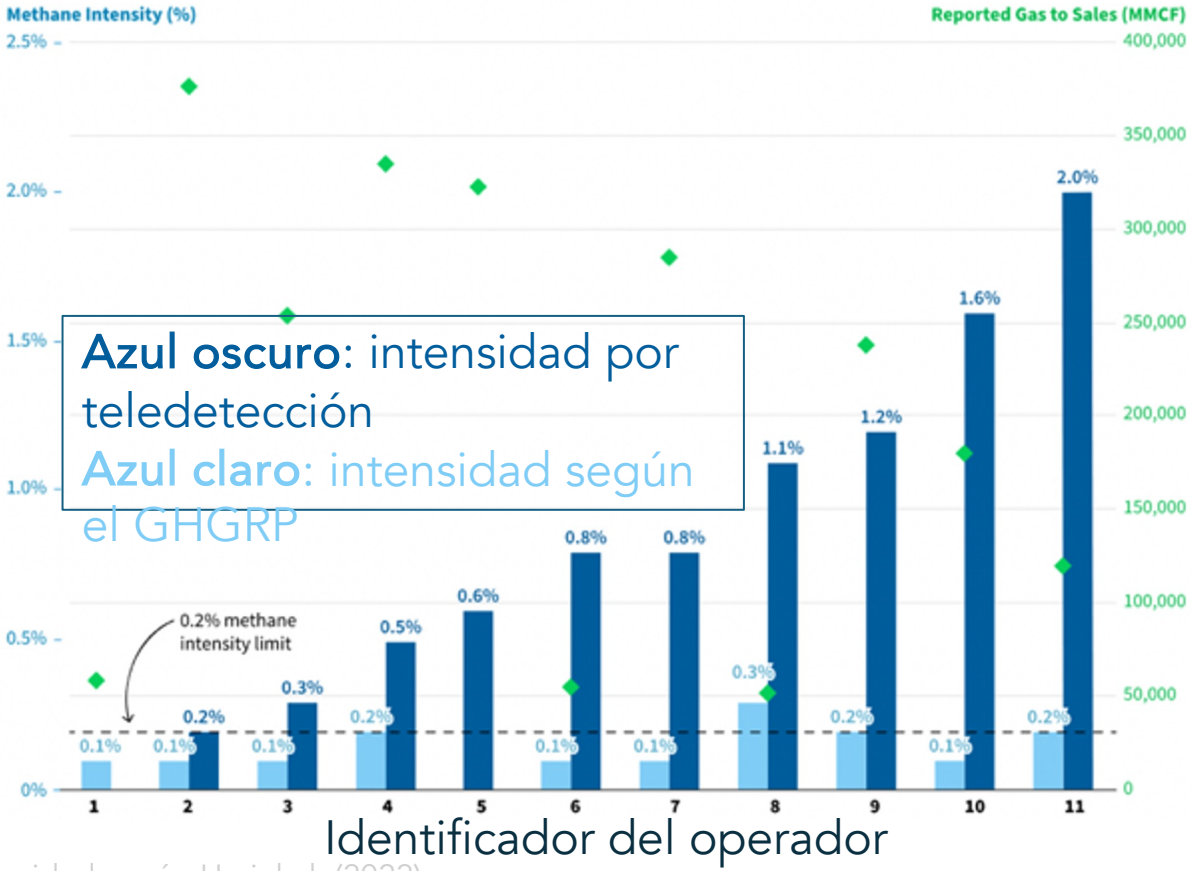
Programa de Reducción de Emisiones de Metano de la IRA (MERP)*

Otras mediciones empíricas de metano (no superemisores) y/o estimaciones ascendentes

**Otras notificaciones de detección única de superemisores (p. ej., cribado LDAR del operador)**

La Inflation Reduction Act (IRA) estableció que toda emisión residual daría lugar a una tasa (Waste Emissions Charge, WEC), calculada a partir de las notificaciones al GHGRP.

Intensidad observada por operador en campañas aéreas frente a los protocolos actuales del GHGRP




**Azul oscuro**: intensidad por teledetección
**Azul claro**: intensidad según el GHGRP

Intensidad según Hmiel al. (2022)

Análisis conservador de la subnotificación realizado por el RMI

**Waste emissions charge difference: Super-emitter observations vs. reported emissions for the Permian Basin in 2020**

| Operator | **Reported to EPA:** Tax payments at $900/ton | **Aerial measurements:** Tax payments at $900/ton | **Cumulative difference** between tax payments |
|---|---|---|---|
| 1 | $0 | $0 | $0 |
| 2 | $0 | $0 | $0 |
| 3 | $0 | $5,000,000 | $5,000,000 |
| 4 | $300,000 | $16,000,000 | $21,000,000 |
| 5 | $0 | $25,000,000 | $45,000,000 |
| 6 | $0 | $6,000,000 | $51,000,000 |
| 7 | $0 | $30,000,000 | $81,000,000 |
| 8 | $800,000 | $8,000,000 | $89,000,000 |
| 9 | $0 | $41,000,000 | $130,000,000 |
| 10 | $0 | $42,000,000 | $172,000,000 |
| 11 | $900,000 | $37,000,000 | $208,000,000 |

Relevancia para la IRA: la subnotificación no detectada en EE. UU. podría suponer más de 800 M$/año de tasas no pagadas

Pausa

Debate

¿Cómo podríamos/deberíamos basar los resultados descendentes en la verdad de campo, normas y validación?

¿Ha cambiado tu opinión sobre la fiabilidad de la contabilidad descendente frente a la ascendente?

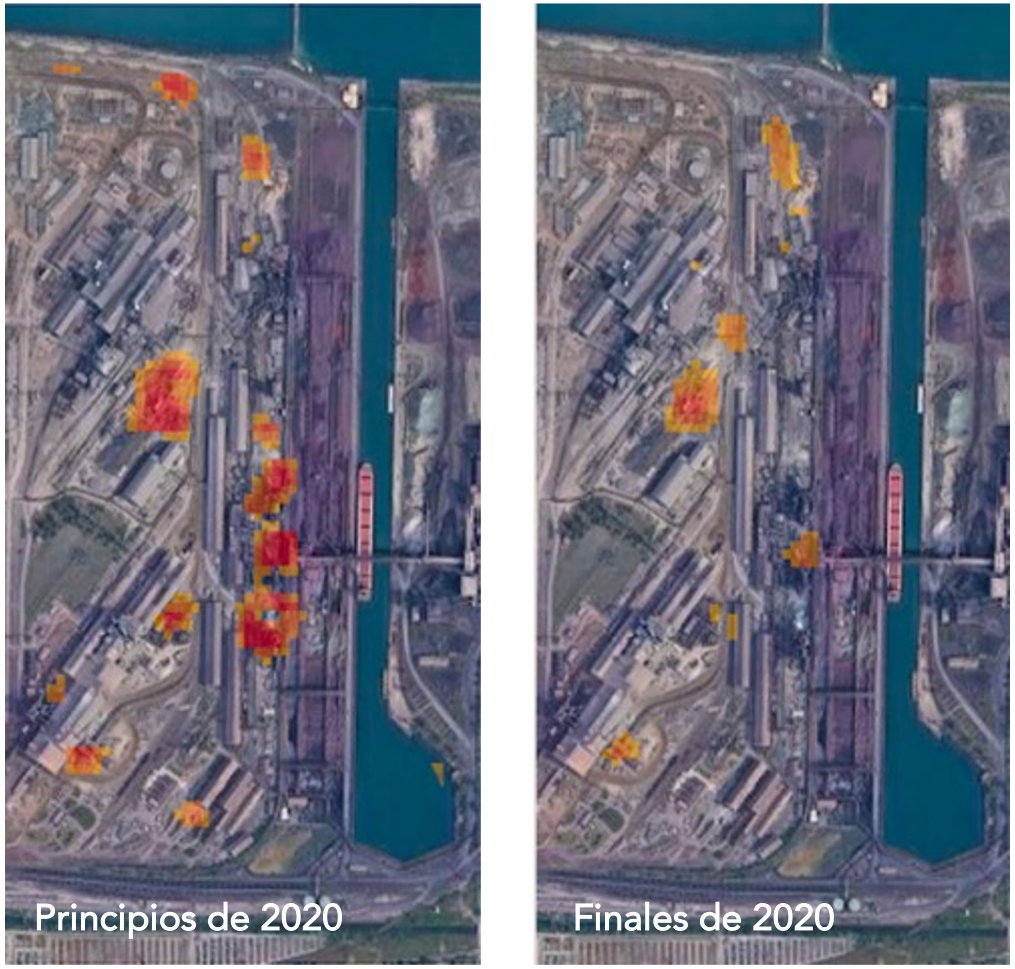
- Vota: ¿en qué confías más, en lo descendente o en lo ascendente?

¿Qué tipos de experimentos propondrías/harías para aumentar la confianza en las estimaciones descendentes/por teledetección?

## Parte 3 Usar la IA para mejorar la contabilidad de carbono

Datos de actividad: completar lagunas de producción

## Ejemplo: acería Gary Works



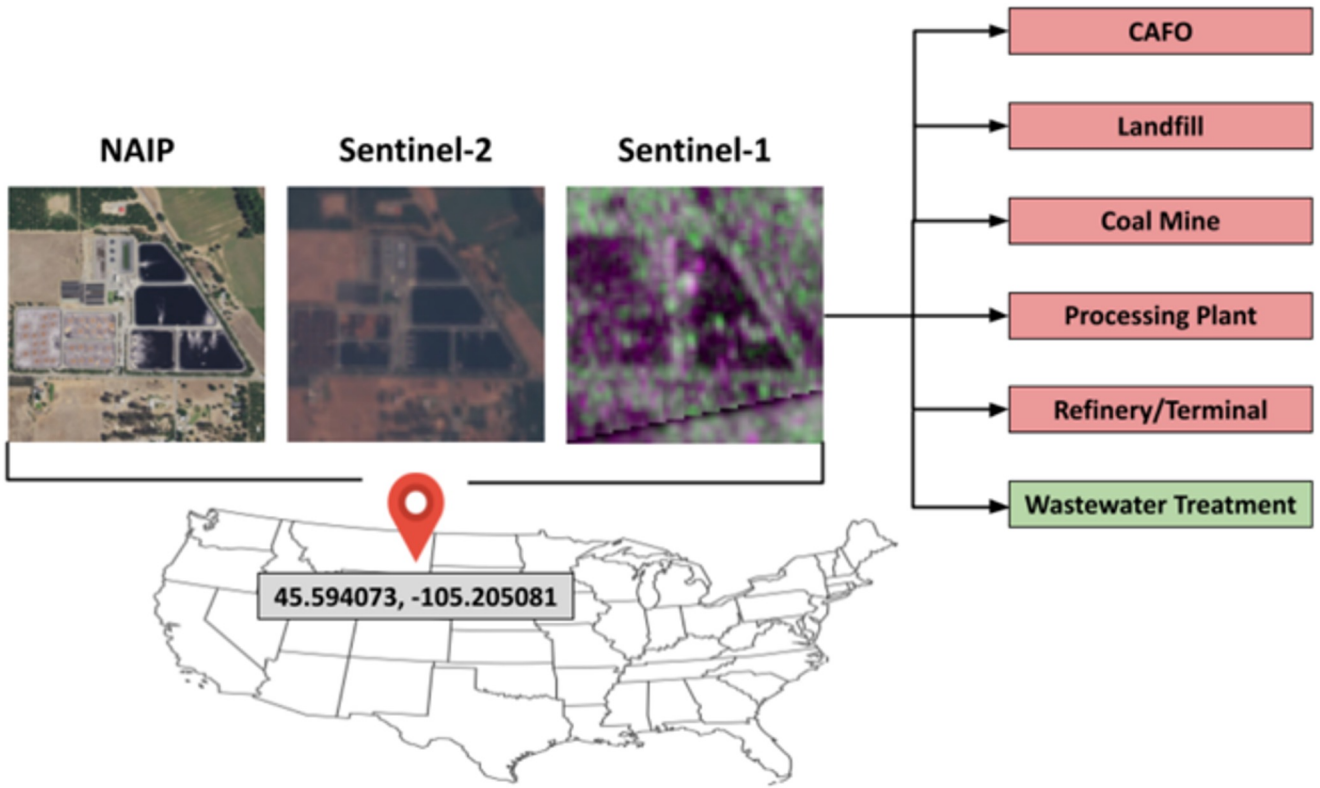

TransitionZERO

Cientos de acerías en el mundo no notifican sus emisiones.

Para crear una base de emisiones estimadas: entrenar un modelo de aprendizaje automático con las firmas térmicas detectadas en las bandas infrarrojas de Landsat-8 y Sentinel-2.

Fuente: TransitionZERO; Climate TRACE

Datos de actividad: detección de objetos

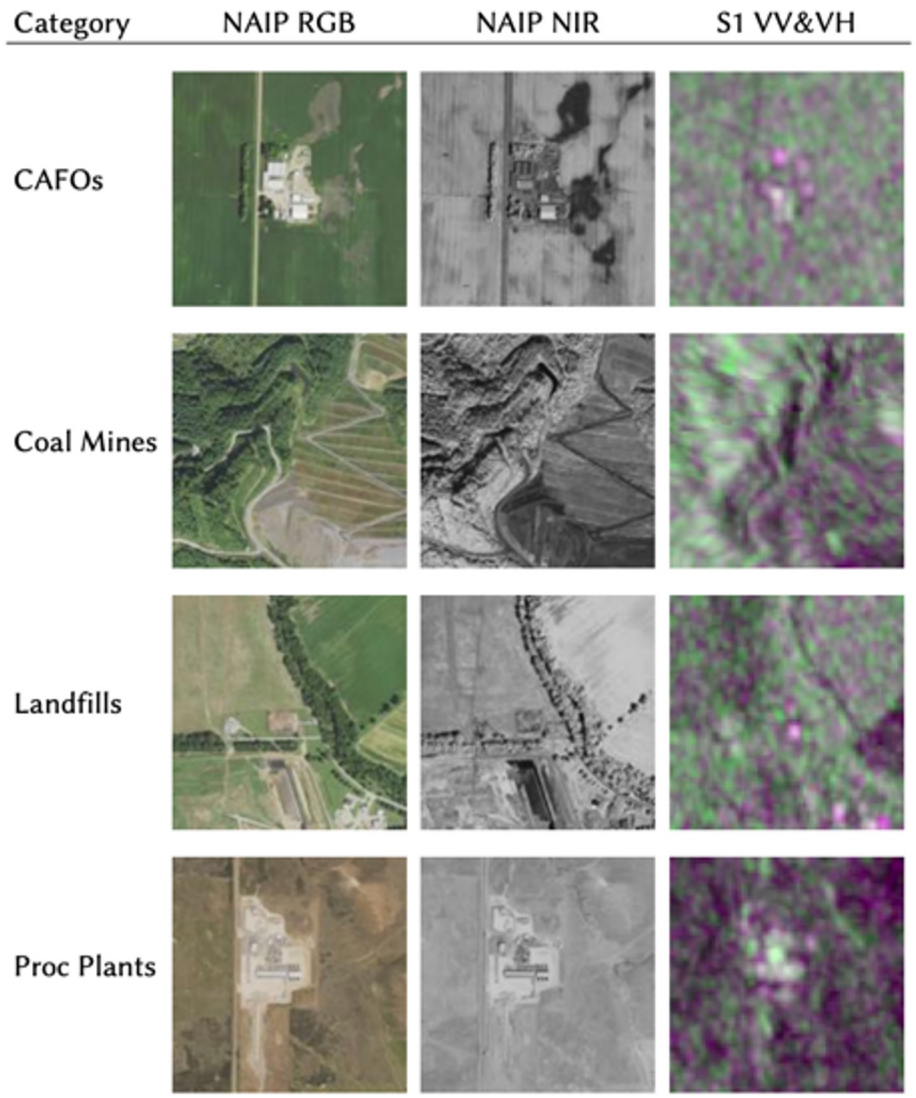



# MEthane Tracking Emissions Reference (METER)

Objetivo: crear una base de datos completa de las infraestructuras antropogénicas emisoras de metano a partir de diversas imágenes satelitales.

Fuente: METER-ML

# Datos de actividad: detección de objetos




Para crear las etiquetas, los investigadores recopilaron todas las bases de datos SIG de infraestructuras disponibles y recortaron las imágenes satelitales en consecuencia

~50 000 etiquetas/imágenes de entrenamiento

Fuente: METER-ML

# Datos de actividad: detección de objetos

## Resultados de clasificación (AUPRC) tras aplicar CNN a los conjuntos etiquetados

| Image Product | Bands | CAFOs | Landfills | Mines | Proc Plants | R&Ts | WWTPs | Overall |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | VH&VV | 0.519 | 0.107 | 0.152 | 0.218 | 0.487 | 0.119 | 0.267 |
| S2 | RGB | 0.889 | 0.268 | 0.305 | 0.374 | 0.694 | 0.204 | 0.456 |
| S2 | All | 0.889 | 0.189 | 0.382 | 0.368 | 0.690 | 0.183 | 0.450 |
| S2 & S1 | All | 0.923 | 0.152 | 0.379 | 0.391 | 0.612 | 0.231 | 0.448 |
| NAIP | RGB | 0.903 | 0.270 | 0.348 | 0.327 | 0.849 | 0.182 | 0.480 |
| NAIP | All | **0.945** | **0.276** | 0.401 | **0.508** | **0.857** | **0.303** | **0.548** |
| NAIP & S2 & S1 | All | 0.889 | 0.214 | **0.473** | 0.457 | 0.796 | 0.272 | 0.517 |

**Hay muchísimos datos satelitales, pero las buenas etiquetas siguen siendo escasas y varían mucho según la geografía**

## Validación de etiquetas: 2 revisores expertos revisaron manualmente 1500 etiquetas:

If the expert identified no clearly visible methane source categories in the image, the example was labeled "negative", and if the expert was uncertain about any label, the example was labeled "uncertain". The two labels per example were then resolved as follows:

1. If the experts agreed and neither was uncertain, the agreed upon label was taken as the final label.
2. If the experts disagreed, and one was uncertain but the other was not, the expert's certain label was taken as the final label.
3. If the experts disagreed, but one agreed with the original label, the original label was taken as the final label.
4. In all other scenarios, the example was reviewed jointly by the experts and a final label was assigned.

Fuente: METER-ML

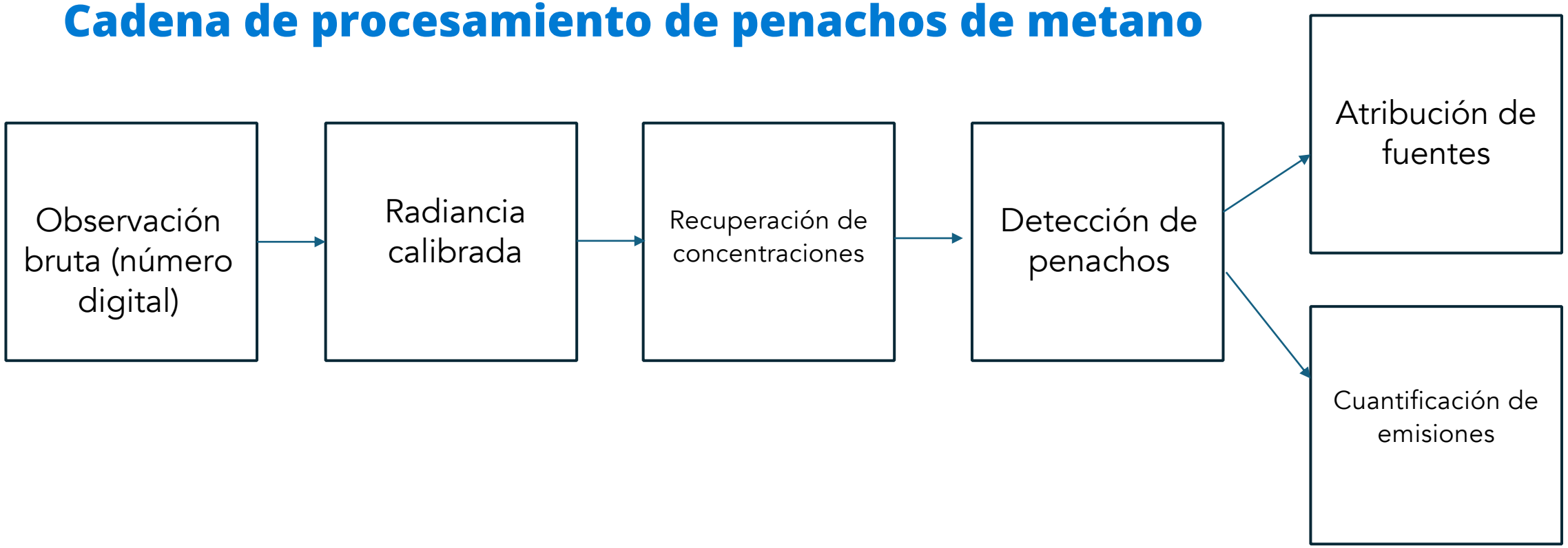
Ejemplo desarrollado:

**Cadena de procesamiento de penachos de metano**

Tarea: mientras recorremos este ejemplo, piensa en cómo podría ayudar la IA en el proceso

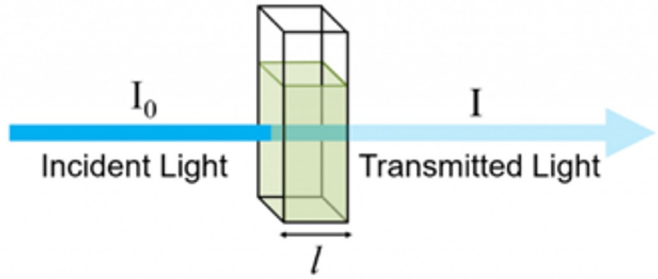
Crear productos de datos de penachos requiere varias etapas de procesamiento.

## Cadena de procesamiento de penachos de metano



El satélite observa la radiancia en el techo de la atmósfera, a partir de la cual se estiman las concentraciones en columna mediante una recuperación.

Algoritmo de «filtro adaptado» por columnas, basado en la ley de Beer-Lambert




$$x_m = x_r e^{-k\Delta c}$$

- $x_m$: Espectro modelado
- $x_r$: Espectro de referencia
- $k$: Absorción
- $\Delta c$: Aumento de concentración

Desarrollo de Taylor (caso linealizado)

$$x_m = x_r(1 - k\Delta c)$$

Con un estimador de máxima verosimilitud, el aumento de concentración «óptimo» que minimiza los residuos entre modelo y observación (ponderados por una covarianza) es:

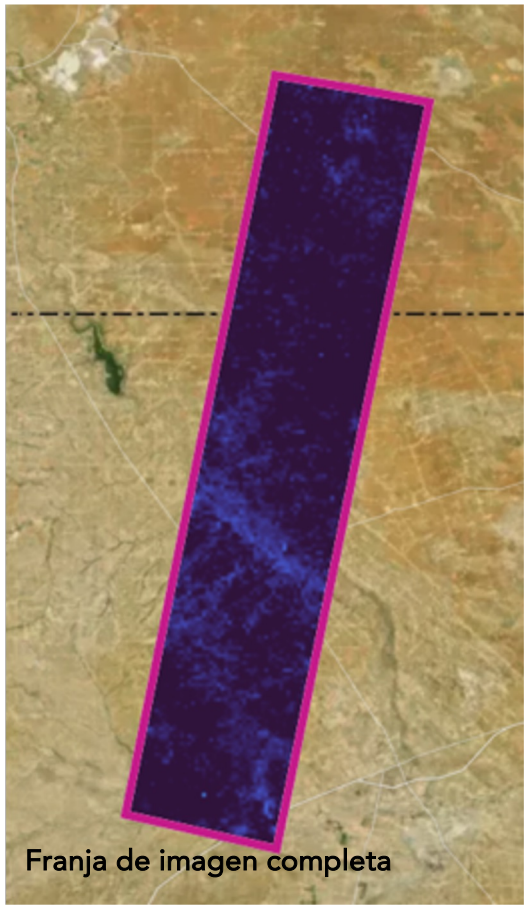
$$\Delta c = \frac{t^T \Sigma^{-1}(x_r - x_o)}{t^T \Sigma^{-1} t}$$

- $\Delta c$: Aumento de CH4 en columna

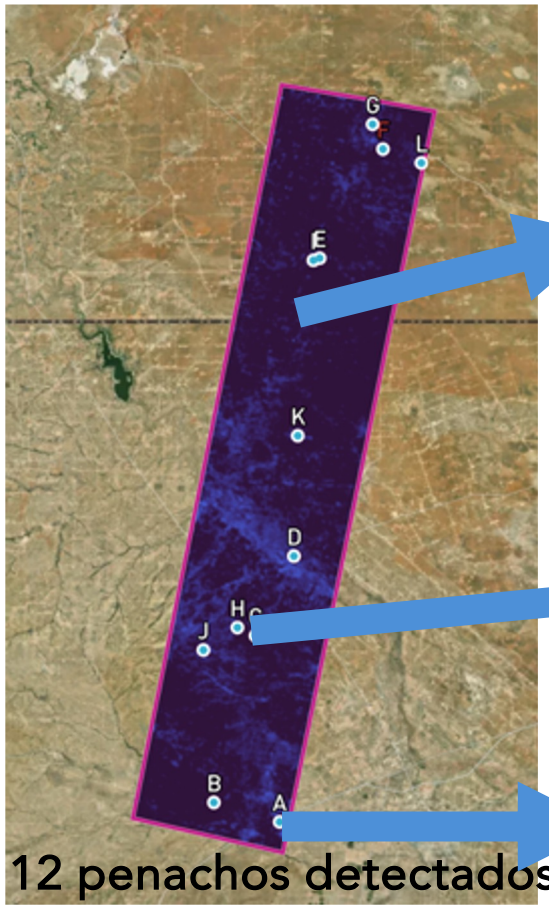
We choose $x_r$ and $\Sigma$ to be the mean and covariance of a collection of pixels in the image, and $t$ is a mapping between radiance and concentration

# Detección de penachos: buscar agujas en un pajar

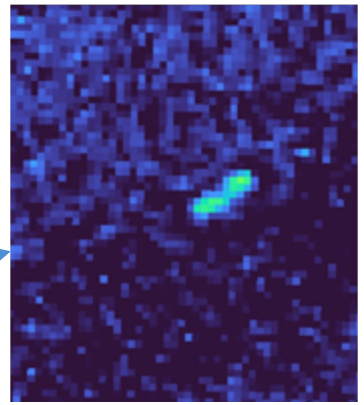
## Ejemplo: imagen de 20 x 100 km2 (satélite Tanager) tomada sobre densas infraestructuras de petróleo y gas en Texas



Franja de imagen completa

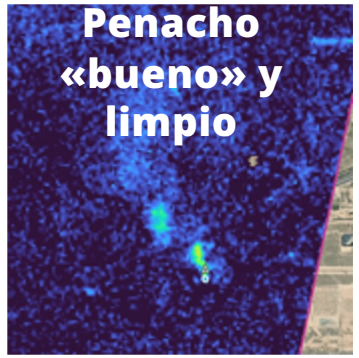


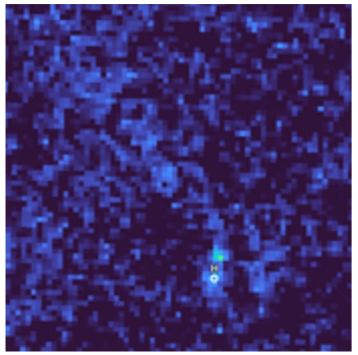

12 penachos detectados





**Falso aumento: tejados blancos**

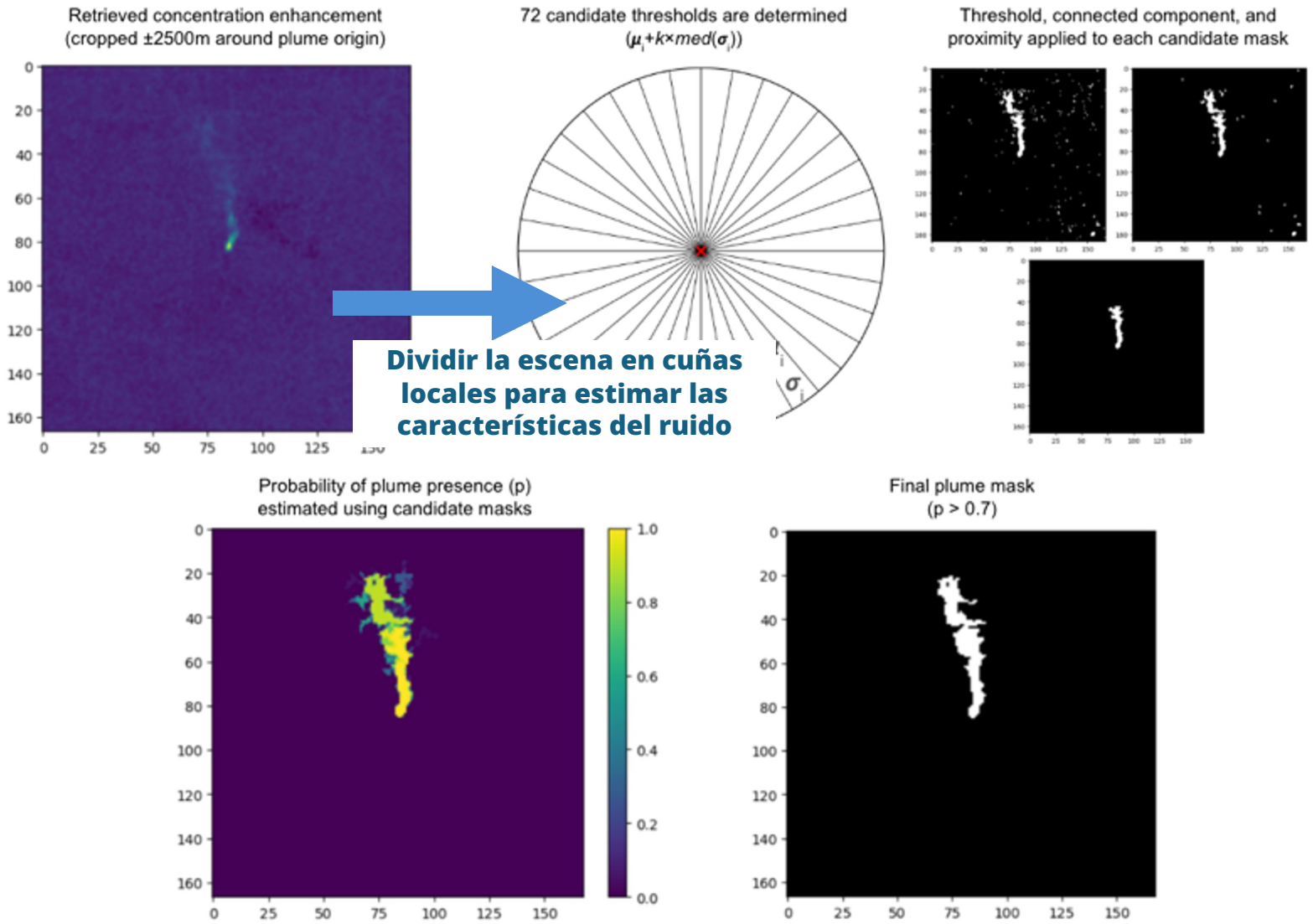


**Penacho pequeño y marginal**

Pregunta: ¿cuál es el riesgo de un solo falso positivo (recuerda lo visto al principio de la clase)?

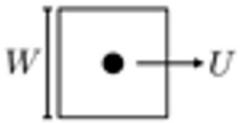
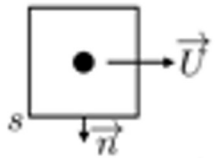
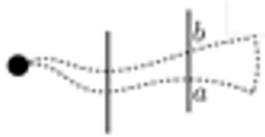
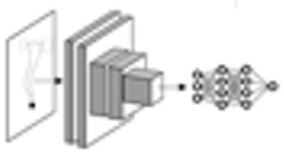
Segmentar («enmascarar») las detecciones de penachos




## Pasos críticos hacia la cuantificación

La segmentación define los límites del penacho, lo que permite cuantificar su masa y su longitud

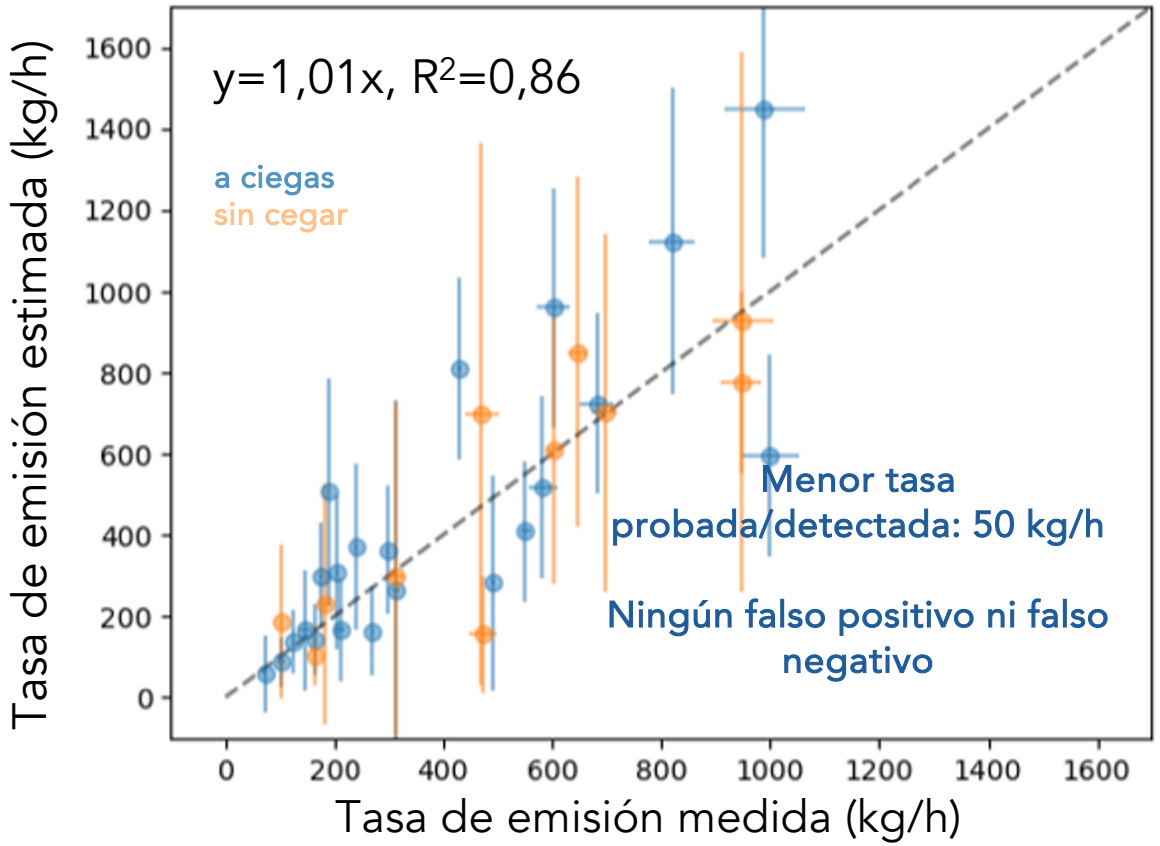
Cuantificar la tasa de emisión de un penacho

| | | |
|---|---|---|
| Gaussian Plume |  | $Q = U\Delta\Omega(x,y)\left(\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)e^{\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}}\right)$ |
| Local mass balance |   | $Q = UW\Delta\Omega$ |
| Gauss theorem |   | $Q = \oint_s \Omega(s)\vec{U}\cdot\vec{n}\,ds$ |
| Cross-sectional flux (CSF) |   | $Q = U\int_a^b \Delta\Omega(x,y)dy$ |
| Integrated mass enhancement (IME) |   | $Q = \frac{U_{\text{eff}}\ \text{IME}}{L}$ |
| Angular width |   | $Q = f(\text{IME},\theta)$ |
| Machine learning |  | $Q = \text{CNN}(\text{Plume image})$ |

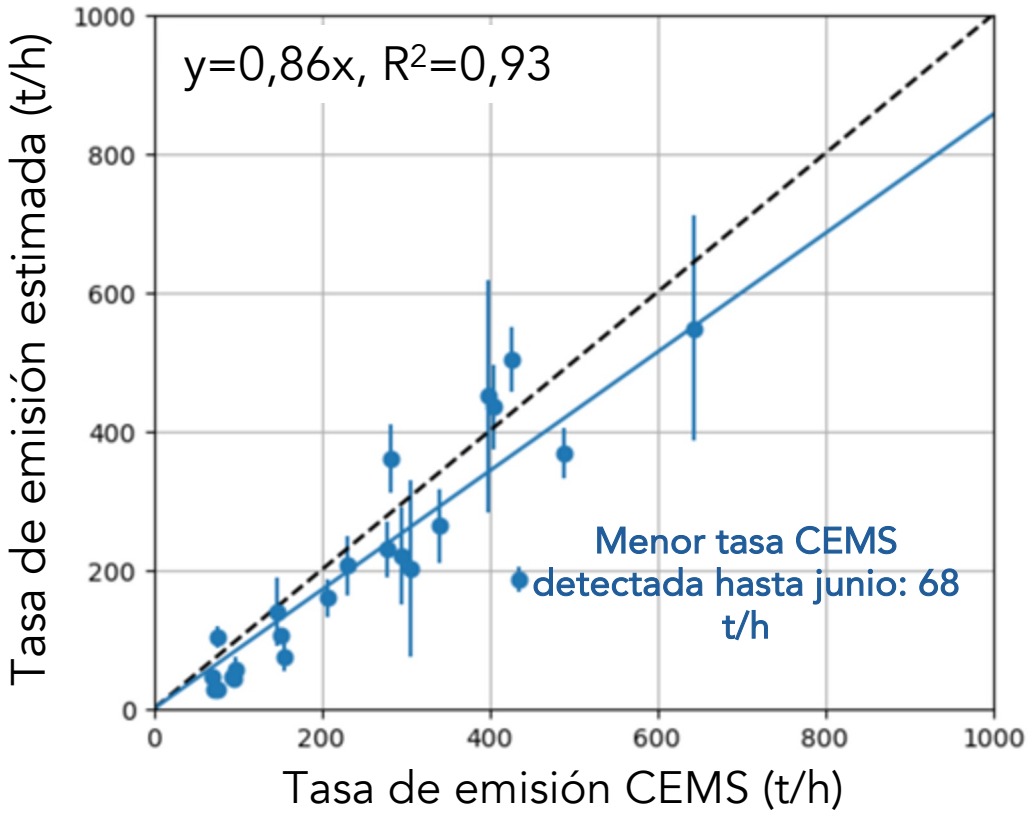
Enfoques más habituales

Los experimentos de liberación controlada permiten evaluar el sesgo y la incertidumbre de los métodos de cuantificación

Liberaciones controladas de CH4 para Tanager (Stanford; Casa Grande, Arizona)



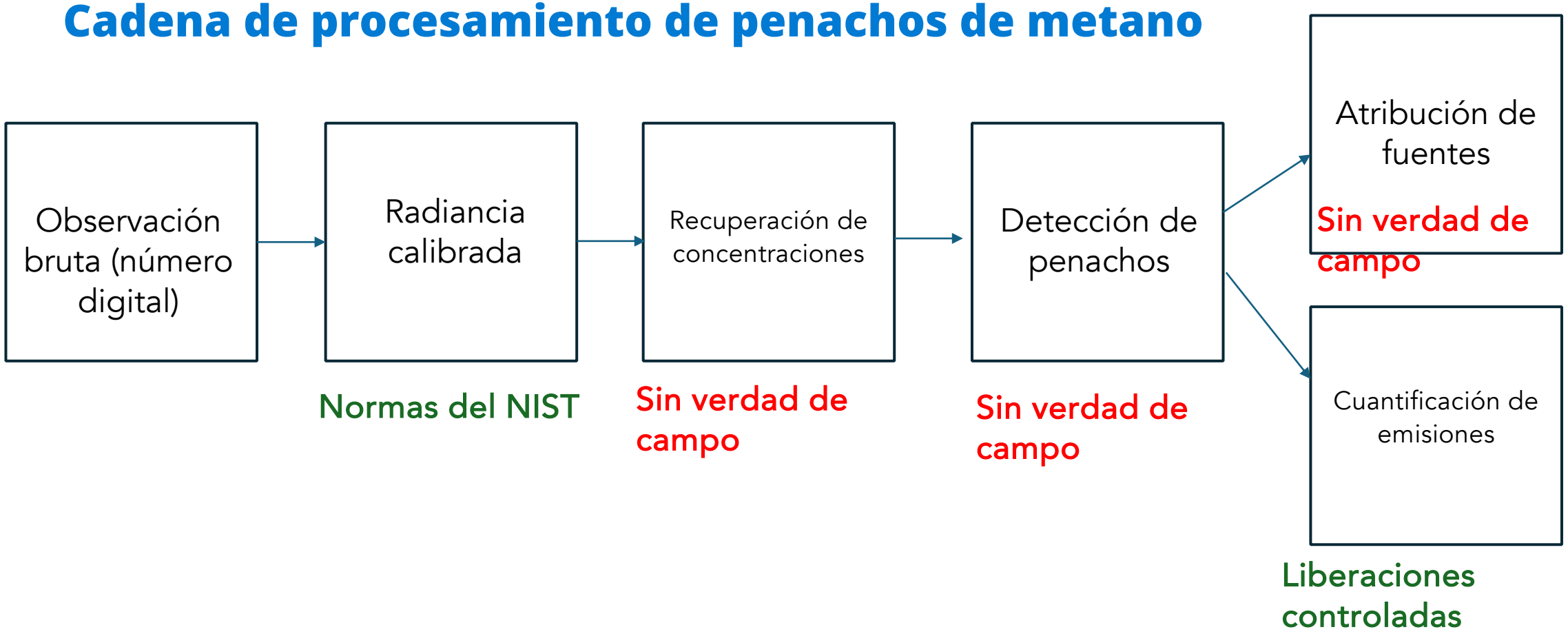

Satélite Tanager y sistemas de monitorización continua de emisiones de CO2 (CEMS, US EPA, distribuidos regionalmente)



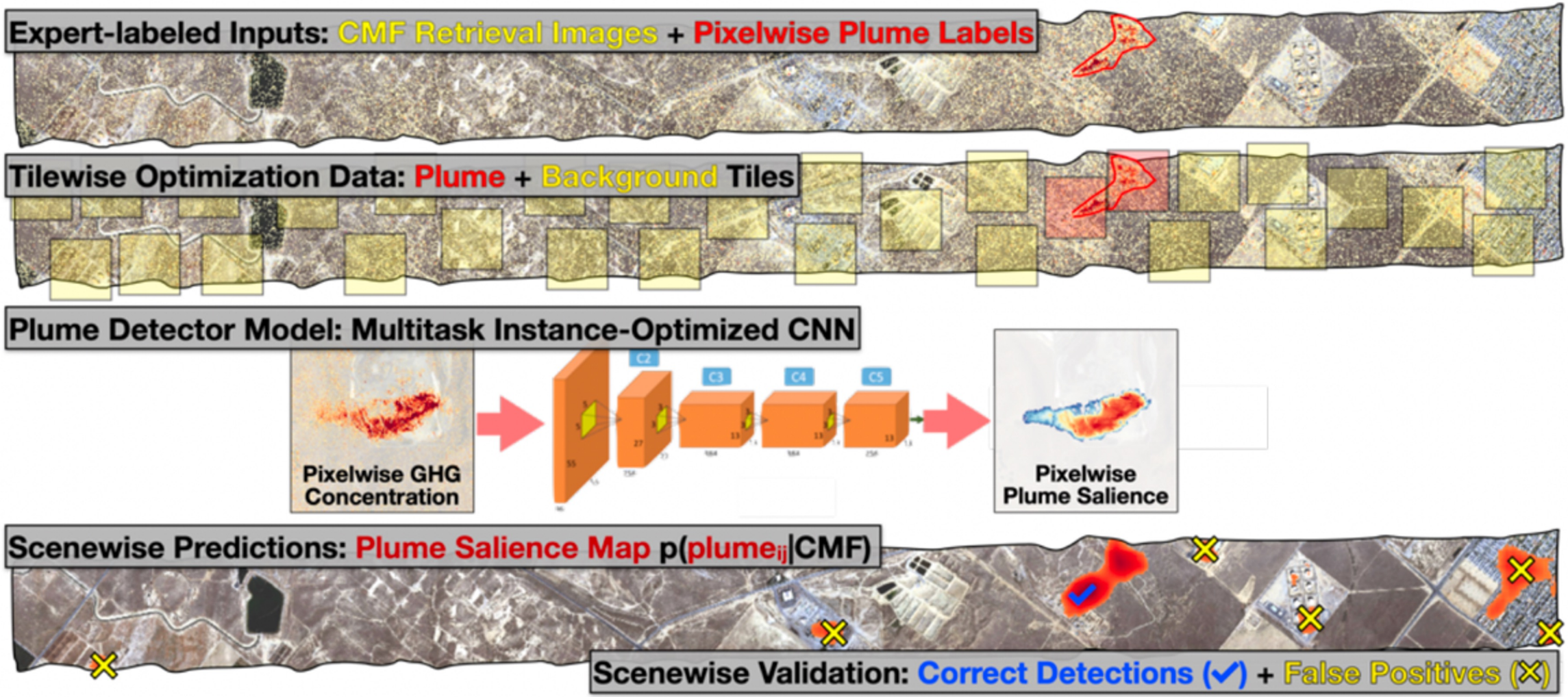

Reuland et al. (enviado)

Verdad de campo limitada

## Cadena de procesamiento de penachos de metano

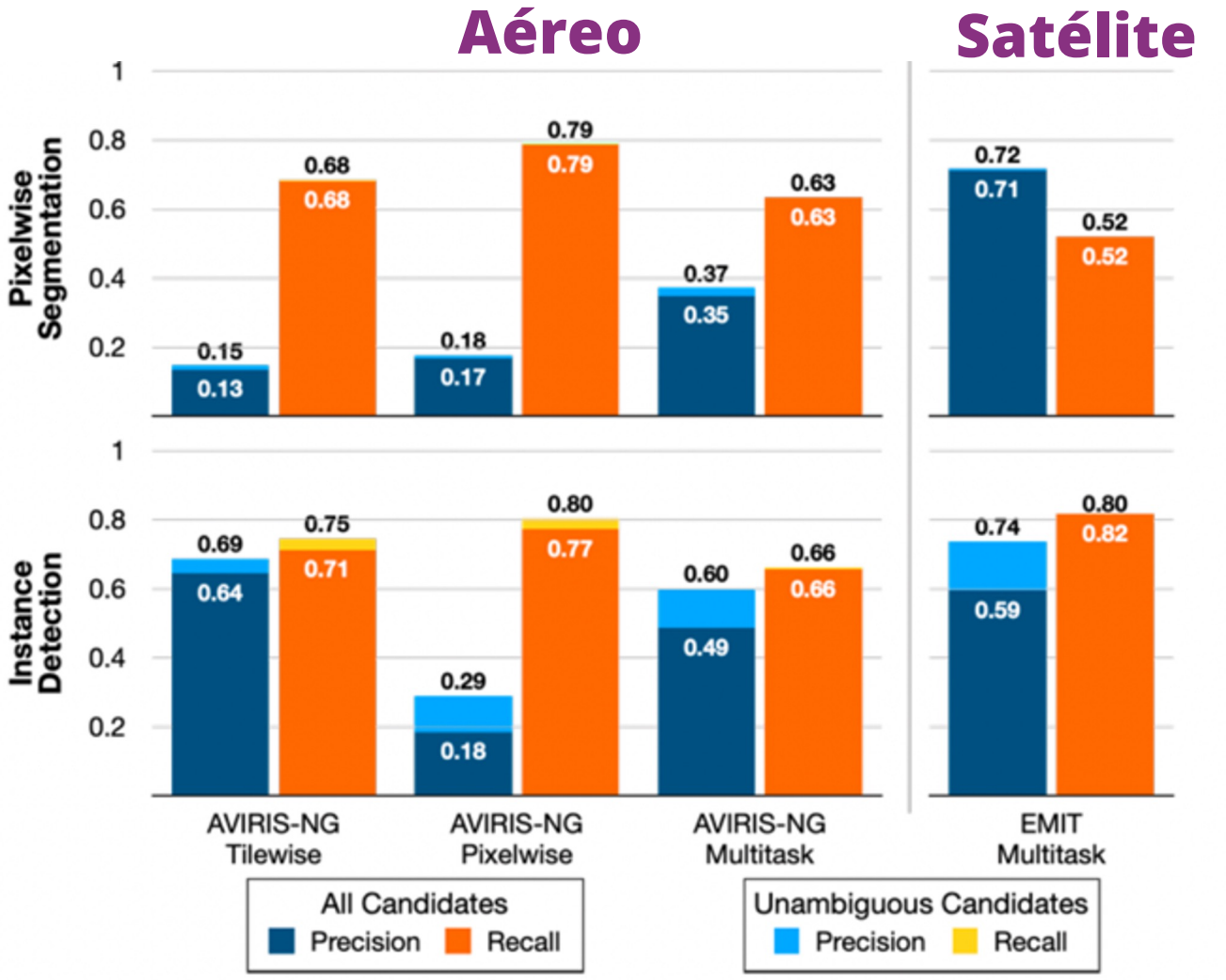


La detección de penachos es el cuello de botella de la cadena de procesamiento. Explorar métodos para reducir la latencia/la necesidad de anotación manual




**Bue et al. (en revisión)**

¿Cuál es el objetivo de aprendizaje? ¿Encontrar píxeles con metano elevado (segmentación densa) o encontrar penachos (detección de instancias)?

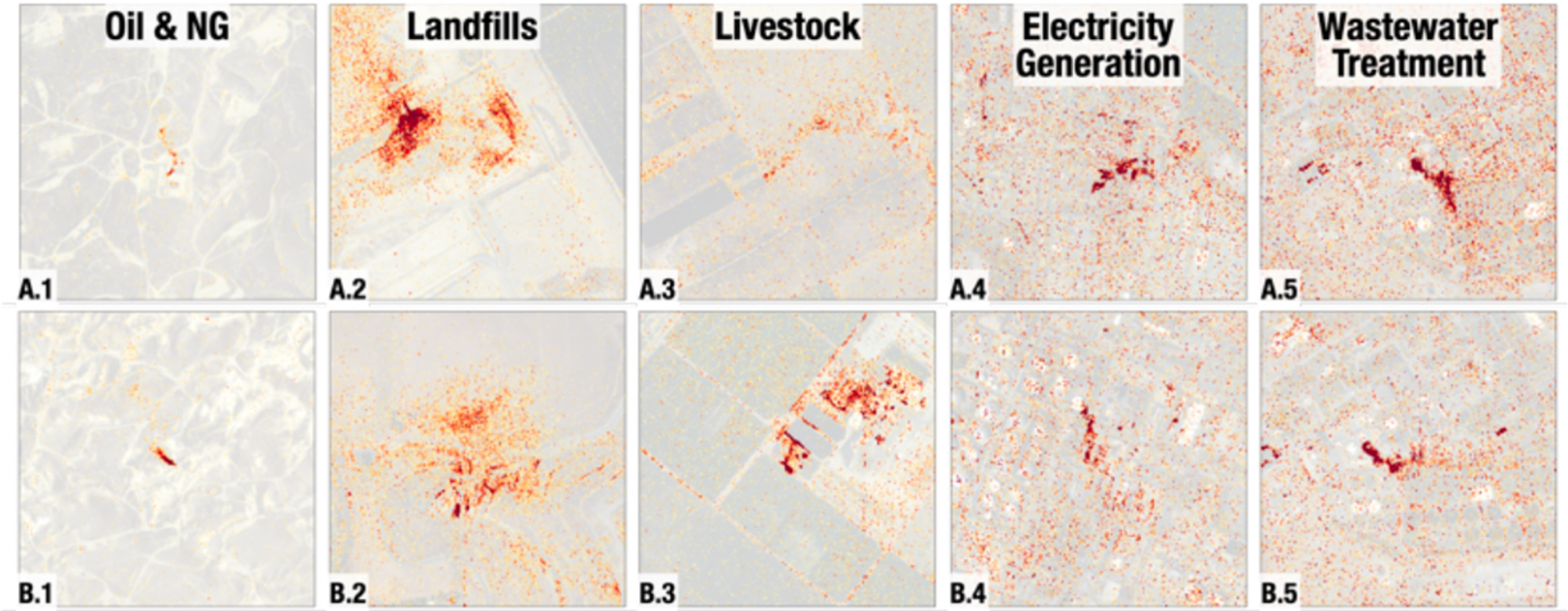



Problema: los superemisores de metano son raros, unos miles de muestras de entrenamiento

La arquitectura del modelo y la función de pérdida marcan una gran diferencia según la tarea

**Bue et al. (en revisión)**

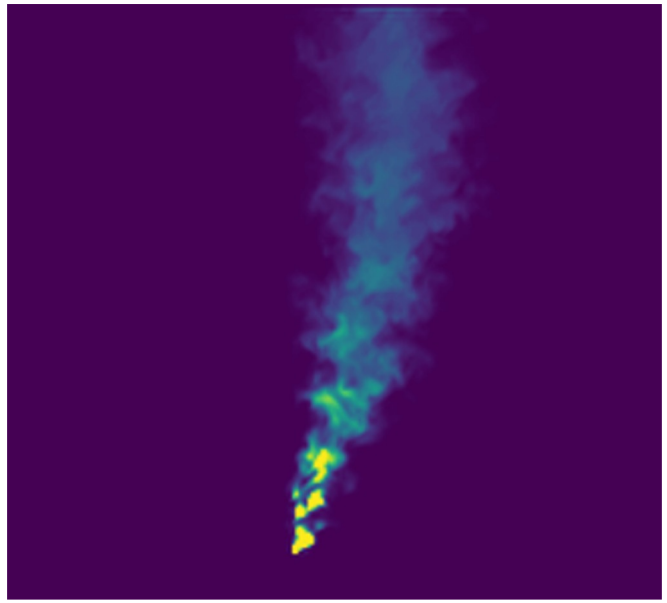
Los penachos de metano tienen formas muy diversas según el sector emisor. El ruido instrumental también depende de la región y del entorno.

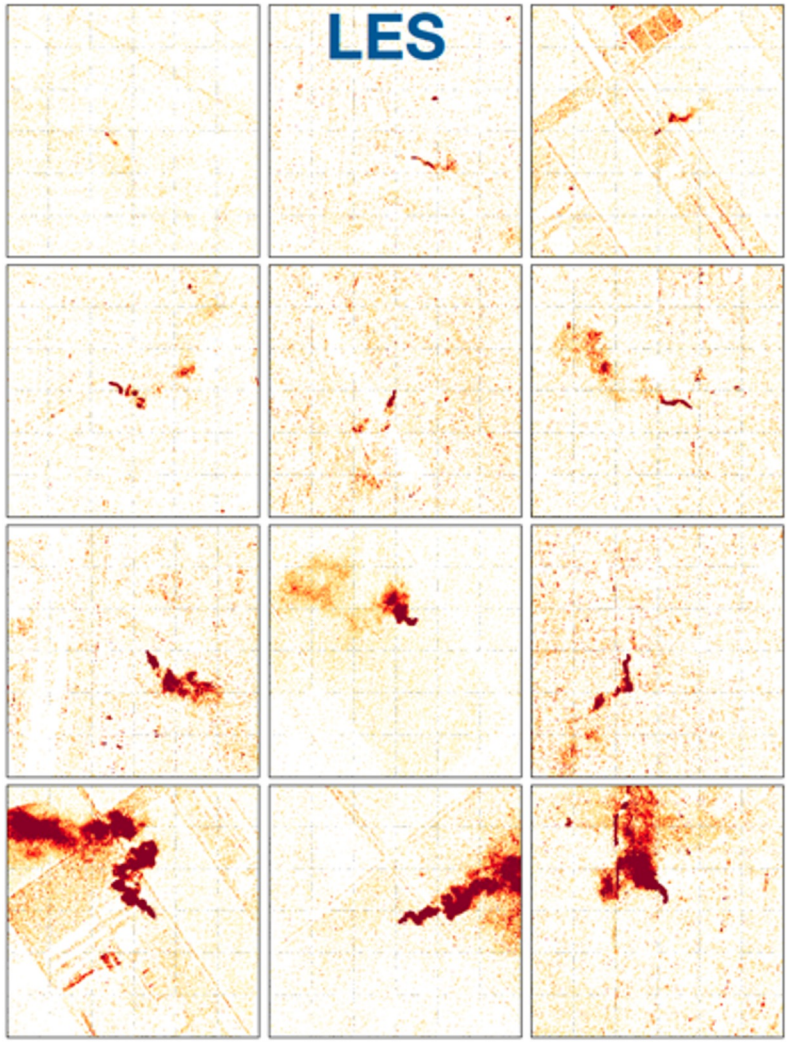



**Bue et al. (en revisión)**

Aumento de datos: inyectar penachos sintéticos en imágenes realistas para crear más muestras

Generar penachos falsos mediante simulaciones de grandes remolinos (LES)

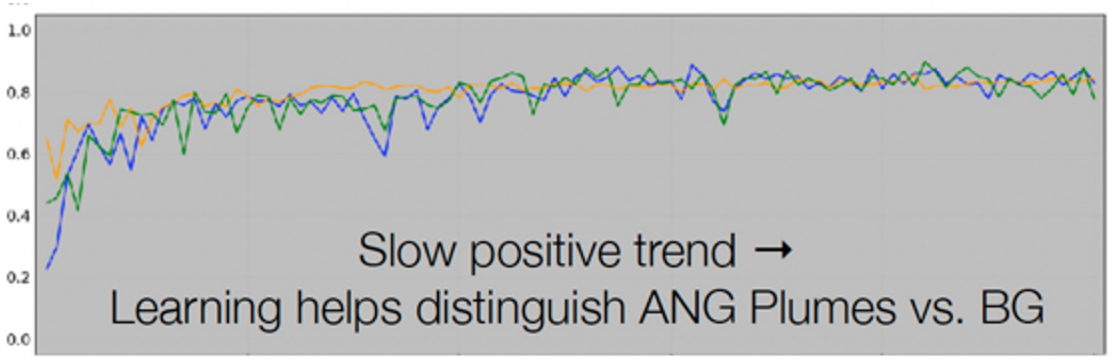




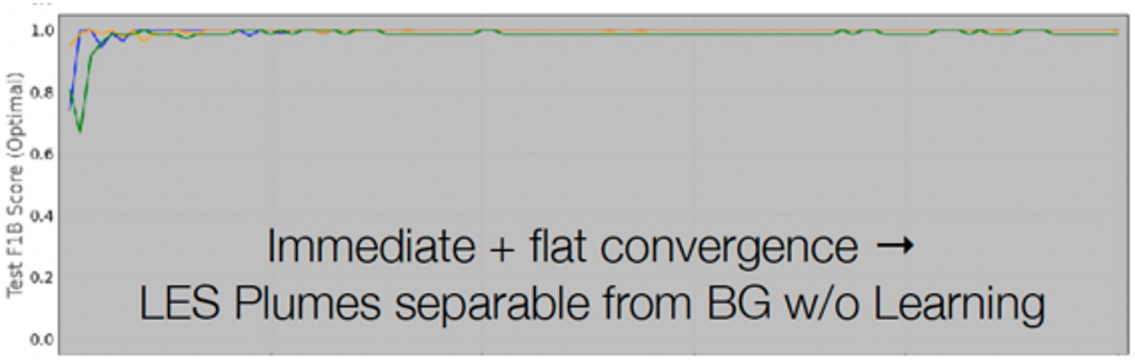

Insertar los penachos en teselas con ruido realista para el entrenamiento

El aumento de datos plantea un problema de generalización con las arquitecturas CNN

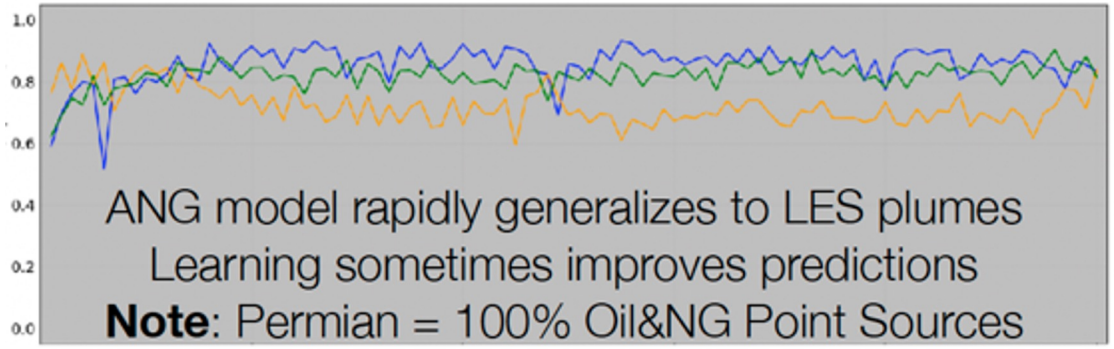
## Entrenar aéreo -> probar aéreo




## Entrenar LES -> probar LES




## Entrenar aéreo -> probar LES




## Entrenar LES -> probar aéreo

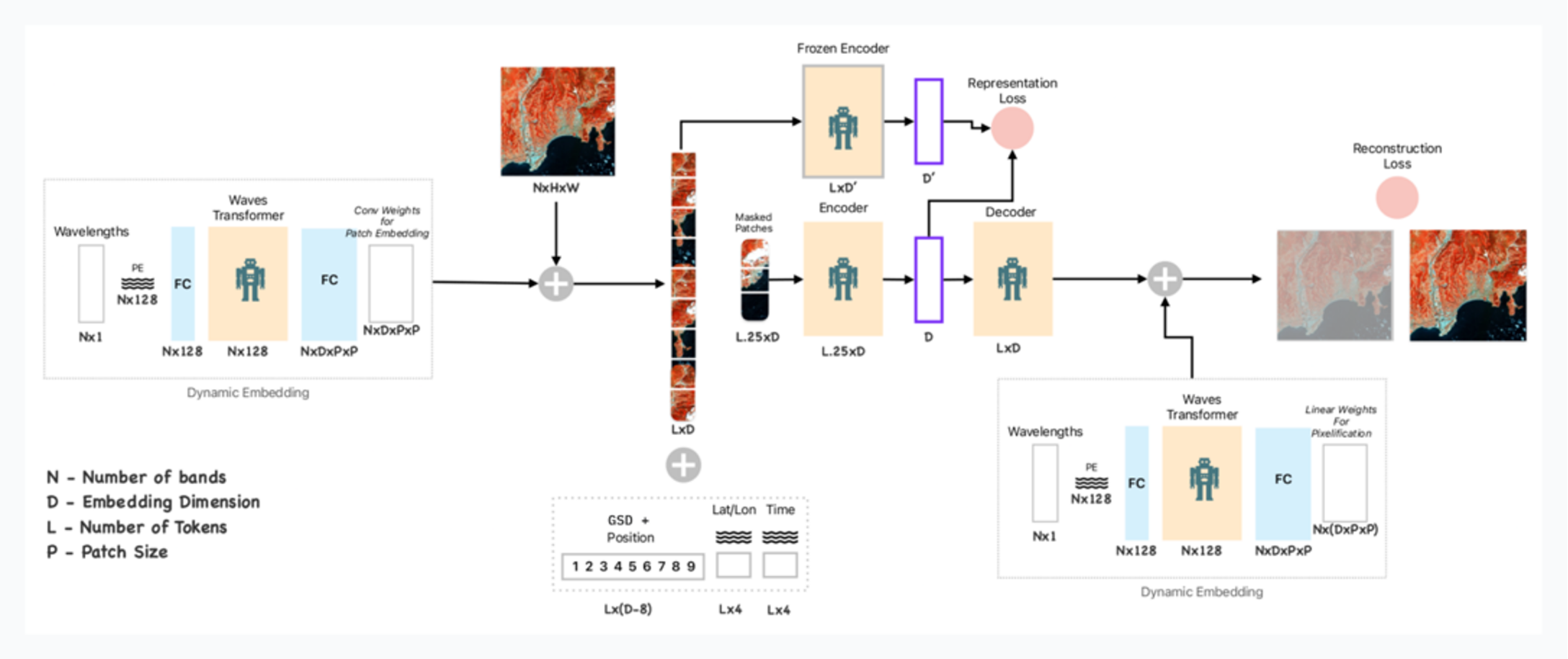



Puntuación F1

Época

# Prueba de modelos fundacionales de la Tierra en esta aplicación

## Embeddings de Clay




Se probaron diversos embeddings existentes y nuevos con Tanager, Sentinel-2 y distintos tamaños de tesela.

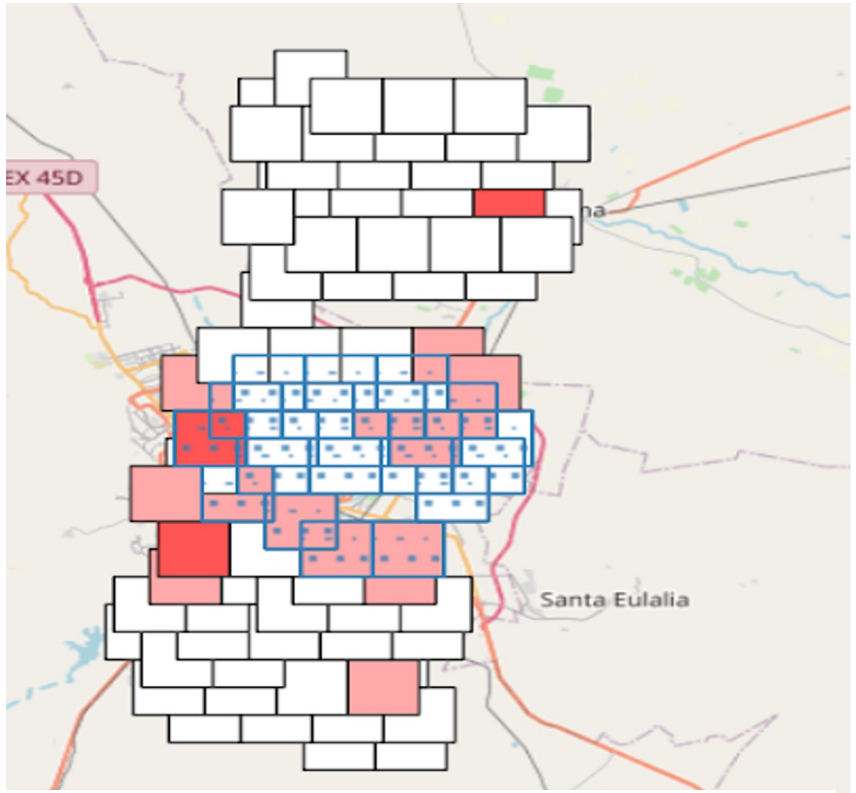
# Los embeddings sugieren que ~10 bandas de Tanager + Sentinel-2 bastan para la mejor clasificación

| Fuente(s) | Tamaño de tesela [metros][1] | N.° de bandas Tanager | F1 positivo[2] | F1 ponderado por clase | F1 negativo |
|---|---|---|---|---|---|
| Tanager | 3840 | 10 | 0.64 | 0.61 | 0.19 |
| **Tanager** | **3840** | **Todas** | **0.74** | **0.69** | 0.19 |
| Tanager | 2560 | 10 | 0.43 | 0.40 | 0.17 |
| Tanager | 2560 | Todas | 0.69 | 0.64 | **0.21** |
| Tanager, S2 | 3840 | 10 | **0.74** | **0.69** | 0.15 |
| Tanager, S2 | 3840 | Todas | 0.69 | 0.64 | 0.12 |

Bajo rendimiento al predecir la clase sin penacho. Peor que las pruebas basadas en CNN

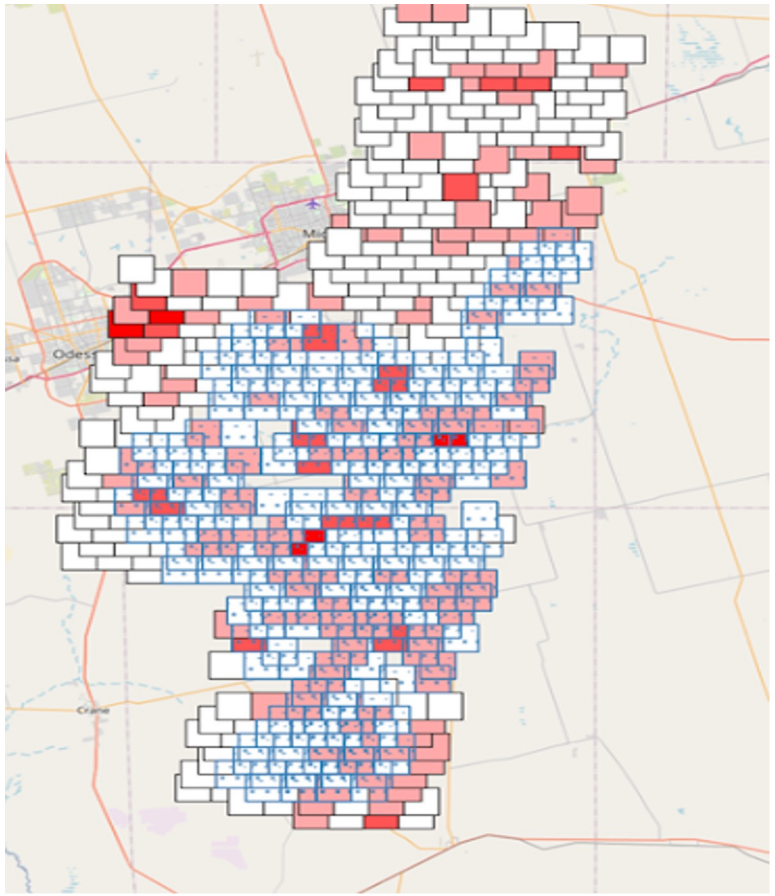
# La inspección visual de los resultados no muestra patrones claros en los errores

## Ejemplo de resultado del modelo Clay en Oklahoma




Puntos azules: ubicaciones de penachos conocidas
Cuadrados blancos: clase negativa
Cuadrados rojos: clase positiva

## Ejemplo de resultado del modelo Clay en Texas

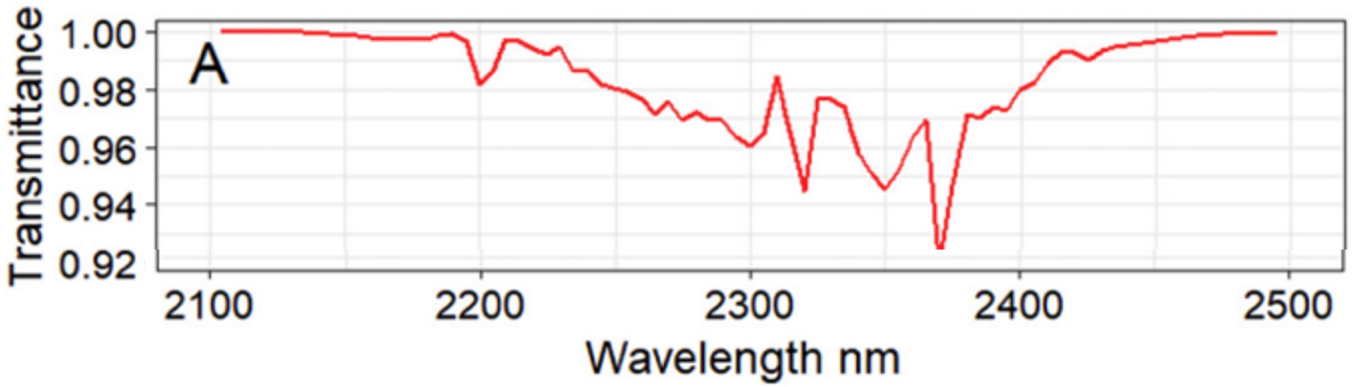


**Hipótesis:**

La absorción del metano es un rasgo menor de la retrodispersión solar observada

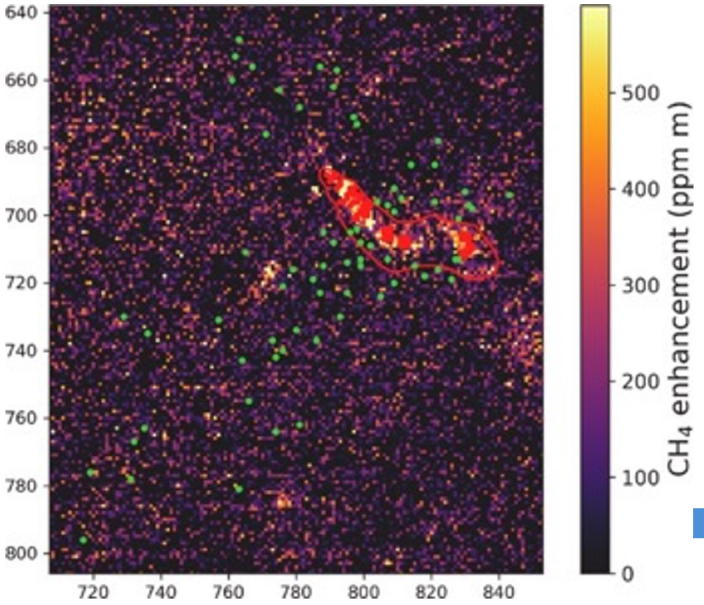
Los modelos fundacionales genéricos de la Tierra pueden perder esta señal sutil al crear los embeddings

# Volver a los espectros, la física y las CNN: evaluación a posteriori

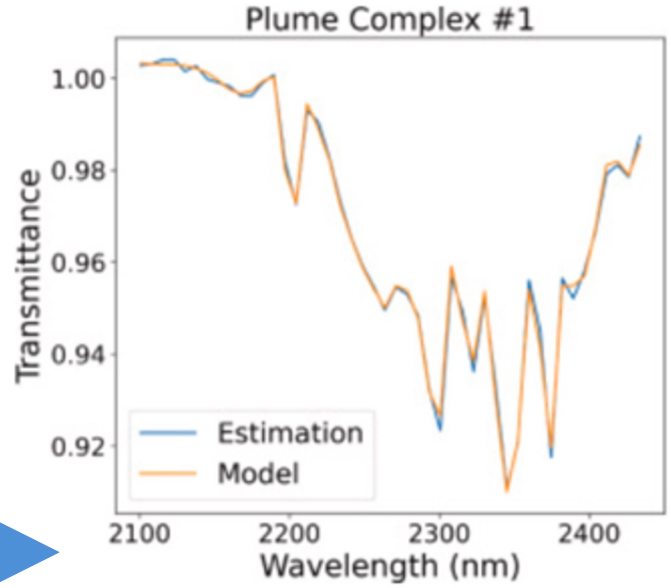



Así se ve espectralmente la absorción del metano con una separación de bandas de 5 nm (es decir, un satélite como Tanager)

Así que, si tengo un penacho real y tomo espectros dentro del penacho y fuera del penacho…



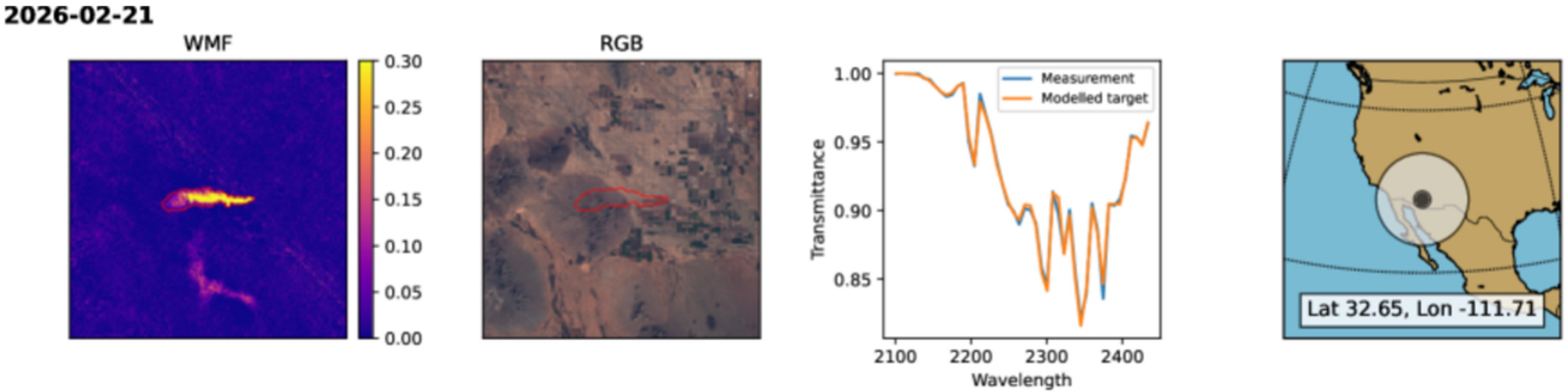

Debería obtener algo que se parezca a una absorción




**Xiang et al. (2025)**

# Combinar AA e intuición física para notificar penachos con baja latencia

## Ejemplo de alerta de penacho totalmente automatizada en operación




Detección del penacho con CNN

Pasa por un control físico automatizado (sin AA)

Carbon Mapper alertó a la autoridad local

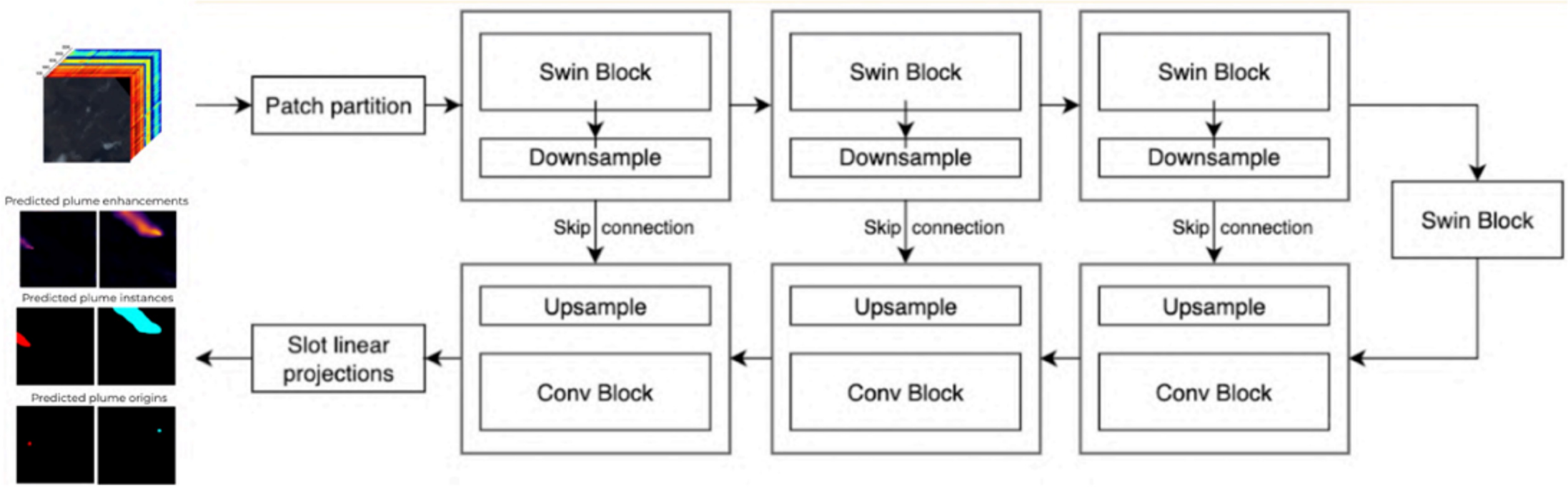
Aquí, un modelo de AA con muchos falsos positivos es aceptable si se combina con una sólida intuición física para producir una detección

Pregunta: ¿los sistemas de IA o AA tienen que ser realmente de extremo a extremo?

**Růžička et al. (2026)**

# Hacia los transformers y los conjuntos de datos masivamente aumentados

## MAPL-EMIT: arquitectura U-Net con codificador Swin Transformer



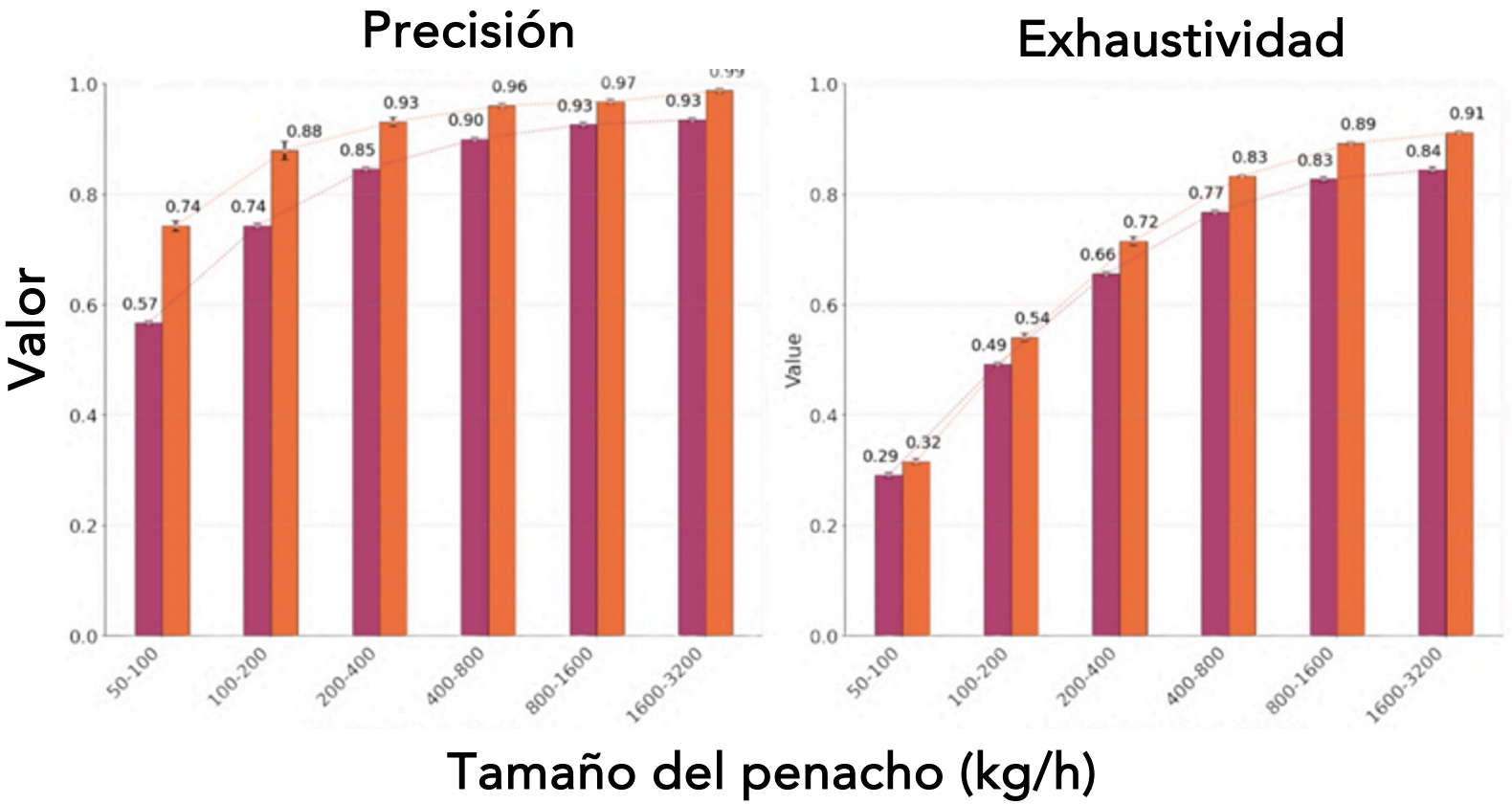

Aumento con penachos sintéticos: 3,6 millones de penachos sintéticos

Entrenamiento con todos los canales de radiancia y todos los píxeles de una tesela

**Batchu et al. (2026)**

# Hacia los transformers y los conjuntos de datos masivamente aumentados

## MAPL-EMIT: arquitectura U-Net con codificador Swin Transformer




Alentador, pero sigue habiendo un problema de «verdad de campo»:

«…solo el 54 % de los penachos de MAPL-EMIT figuraban en la colección de penachos EMIT L2B, lo que indica que MAPL-EMIT identificó el doble de penachos que los analistas humanos».

¿Cómo evaluar la precisión con confianza si las etiquetas humanas pueden tener este nivel de error?

**Batchu et al. (2026)**

Debate

Volviendo a las preguntas anteriores, ahora desde la óptica de la IA:

¿Cómo podríamos/deberíamos basar los resultados descendentes [o de IA] en la verdad de campo, normas y validación?

Encuesta en directo: ¿ha cambiado tu opinión sobre la fiabilidad de la contabilidad descendente, basada en IA o ascendente?

- Vota: ¿en qué confías más? Descendente (manual); descendente (IA); ascendente?

¿Qué tipos de experimentos propondrías/harías para aumentar la confianza en las estimaciones descendentes/por teledetección?

# Claves para una contabilidad de carbono basada en IA

*Temas comunes a todos los ejemplos de esta clase*

**Verdad de campo y calidad de las etiquetas**

A menudo carecemos de una verdad de campo fiable (recuperación, detección, cuantificación). La calidad de las etiquetas varía según la geografía. Diseña tu evaluación teniéndolo en cuenta.

**Generalización geográfica y de dominio**

Los modelos entrenados con una región o un sensor suelen fallar con otros. Evalúa explícitamente el rendimiento fuera de distribución antes del despliegue.

**Los costes de falsos positivos y falsos negativos son asimétricos**

Un falso positivo puede desencadenar una acción reguladora o una tasa para el operador; un falso negativo deja emisiones sin contabilizar. El punto de funcionamiento adecuado en la curva precisión-exhaustividad depende de la decisión posterior, no solo de la puntuación F1.

**La física/la explicabilidad como salvaguarda**

¿Puedes explicar los resultados de un modelo de IA? La física nos mantiene con los pies en la tierra, sobre todo en aplicaciones donde la confianza es crucial.

**Vía de despliegue y aceptación de las partes interesadas**

¿Quién acepta los resultados: reguladores, operadores, auditores? El rendimiento técnico por sí solo no basta sin confianza institucional.

**La disponibilidad de datos determina el alcance**

Datos más ricos: Norteamérica (p. ej., GHGRP), UE (p. ej., RCDE). Datos escasos: la mayor parte del Sur Global. La cobertura que afirma tu modelo puede no cumplirse donde más importa para la contabilidad mundial.

# IA ética y responsable en la contabilidad de carbono

## Implicaciones de vigilancia

- La detección satelital de emisiones de instalaciones por terceros crea una capa de vigilancia independiente. Pero también plantea preguntas:
  - ¿Quién debería poder notificar? La vía de autorización de la EPA para notificadores de superemisores es un modelo posible para regular el acceso.
  - ¿Quién controla los datos?

## Rendimiento desigual según la geografía

- Los modelos entrenados en regiones ricas en datos (EE. UU., UE) suelen degradarse en regiones con pocas etiquetas (Asia meridional, África, América Latina), donde una contabilidad precisa puede ser más importante para el progreso mundial.
- El rendimiento de referencia con datos nacionales reservados no basta para demostrar que el modelo está listo para desplegarse a escala mundial.

## ¿Quién asume las consecuencias de los errores?

- Falsos positivos: se señala a un operador para una acción reguladora que no provocó. Si el modelo se equivoca, ¿quién es responsable?
- Falsos negativos: las emisiones pasan desapercibidas, lo que socava la integridad de los mercados de carbono o permite vertidos ilegales.
- En ambos casos, los afectados rara vez son los desarrolladores del modelo.

## Transparencia y posibilidad de impugnación

- Una estimación de emisiones derivada de satélites que desencadena una tasa reguladora debe ser explicable. Los modelos de caja negra plantean problemas para las garantías procesales.
- ¿Qué recurso tiene un operador para impugnar una detección? Los organismos de normalización (ISO, OMM, Verra) empiezan a abordarlo para los mercados de carbono.
- Los modelos de código abierto y los conjuntos de datos de referencia públicos (METER-ML, EMIT L2B) facilitan el escrutinio. Los sistemas propietarios sin divulgación socavan la confianza.

# Cómo empezar: datos, herramientas y problemas abiertos

## Conjuntos de datos abiertos y bancos de pruebas

### METER-ML

Banco de pruebas multisensor para detectar infraestructuras de metano (CAFO, vertederos, pozos, plantas de procesamiento).
https://stanfordmlgroup.github.io/projects/meter-ml/

### Climate TRACE

Inventario abierto de emisiones por instalación para más de 352 M de activos de todos los grandes sectores. API gratuita + descarga en CSV.
Climatetrace.org

### TROPOMI / Sentinel-5P

Productos diarios y mundiales de la ESA de columnas de metano y CO. Gratuitos a través del Copernicus Open Access Hub.
https://scihub.copernicus.eu/

### Portal de datos de Carbon Mapper

Recuperaciones de metano y dióxido de carbono de Tanager, EMIT y varios instrumentos aéreos:
data.carbonmapper.org

## Problemas de investigación abiertos

- Mejor cuantificación de la incertidumbre en las cadenas completas de cuantificación de penachos
- Bancos de pruebas de generalización entre sensores/geografías
- Recopilación escalable de verdad de campo para sectores difíciles de etiquetar (agricultura, cemento)
- Integrar las detecciones de IA en los marcos de notificación reglamentaria
- Aplicar a los datos espectrales de teledetección modelos fundacionales con preentrenamiento informado por la física
- Cerrar a escala la brecha entre la inversión atmosférica y la atribución a instalaciones

# Cierre: lo que hemos visto y lo que queda abierto

## ✅ Lo que hemos visto

- Por qué y cómo funciona la contabilidad de carbono
- Estimación ascendente frente a descendente
- Seguimiento satelital de $CH_4$/$CO_2$
- Métodos de inversión atmosférica
- IA para datos de actividad
- IA para la detección de penachos
- Usar la IA para agilizar la toma de decisiones
- Cuantificación de la incertidumbre

## 🔭 Preguntas abiertas y más allá de esta clase

- Contabilidad empresarial y de la cadena de suministro (tratada brevemente)
- Análisis del ciclo de vida con IA
- IA para reforzar los procesos de auditoría
- Fusión de sensores (satélite + suelo + avión)
- Gobernanza de modelos, normas y certificación

# Turno de preguntas y debate

# Test

P1 *Opción múltiple*

¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor la principal limitación de la contabilidad de carbono ascendente?

A. Requiere observaciones satelitales, que son caras

**B. Se basa en datos de actividad autodeclarados y factores de emisión que pueden no reflejar las emisiones locales reales**

C. Solo puede usarse para el $CO_2$, no para el metano

D. Solo es aplicable a países desarrollados con marcos reguladores sólidos

P2 *Opción múltiple*

En la cadena de procesamiento de penachos de metano de alta resolución, ¿qué etapa dispone actualmente de MENOS verdad de campo para entrenar o evaluar modelos de IA?

A. Calibración de las observaciones satelitales brutas

**B. Recuperación de concentraciones con filtro adaptado**

C. Detección de penachos

D. Cuantificación de emisiones

P3 *Verdadero/Falso*

Verdadero o falso: los modelos fundacionales de la Tierra (p. ej., Clay) superaron a los enfoques basados en CNN en la detección de penachos de metano en los experimentos con Tanager descritos en esta clase.

P4 *Opción múltiple*

Una empresa quiere desplegar un detector de penachos de metano basado en IA para apoyar una iniciativa de notificación del programa de superemisores. ¿Qué consideración debería influir más en la elección del umbral de decisión (compromiso precisión/exhaustividad)?

A. Maximizar la puntuación F1 global en el conjunto de prueba reservado

**B. El coste relativo de los falsos positivos frente a los falsos negativos, dadas las consecuencias reguladoras y financieras posteriores**

C. Usar el mismo umbral que el mejor artículo publicado sobre detección de penachos

D. Minimizar el tiempo de inferencia para permitir alertas en tiempo real

# Lecturas previas

Joyce et al. (2023) — METER-ML: A Multi-Sensor Earth Observation Benchmark for Automated Methane Source Mapping

Jacob et al. (2022) — Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations