

Impacto de los incendios forestales en la formación de nubes mixtas en el noroeste del Amazonas

Luis A. Ladino¹, Sebastián Mendoza Tellez¹, Alison Ruiz², Jaime Barrera³, Harry Alvarez⁴, Omar Ramírez⁵, Lizeth Russey-Velandia⁵, Juan Vitar³, Javier Miranda⁶, Violeta Mugica⁷, Diana Meza⁸, Graciela B. Raga¹, Giovanni Carabali⁹, Miguel Robles¹, Irma Rosas¹, Belem González⁸, Francisco Berrellez⁸, Fernando Millán⁷ y Salvador Reynoso-Cruces⁴

¹Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, México

²División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México

³Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, Bogotá, Colombia

⁴Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México

⁵Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá-Zipacquirá, Colombia

⁶Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, México

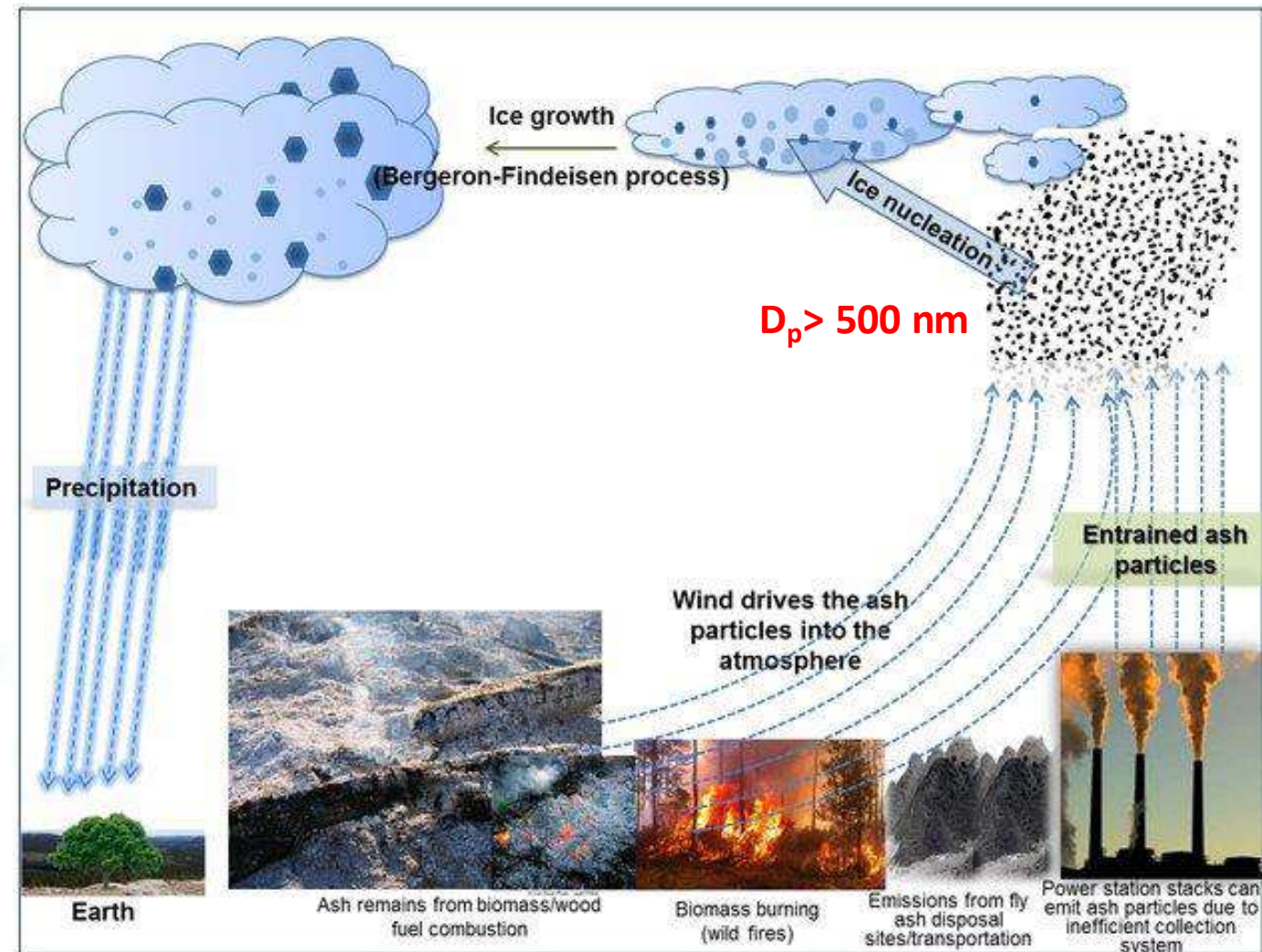
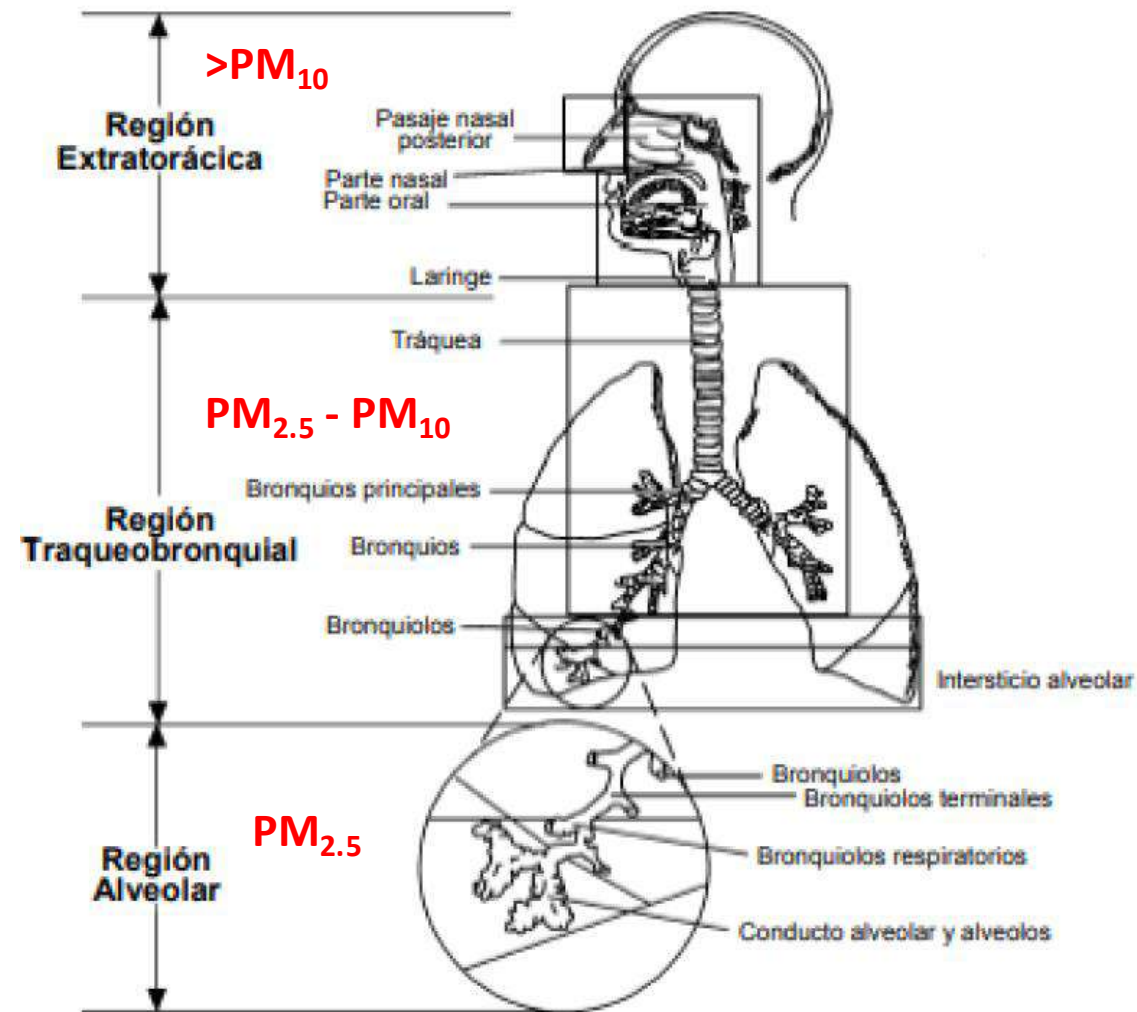
⁷Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, México

⁸Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México

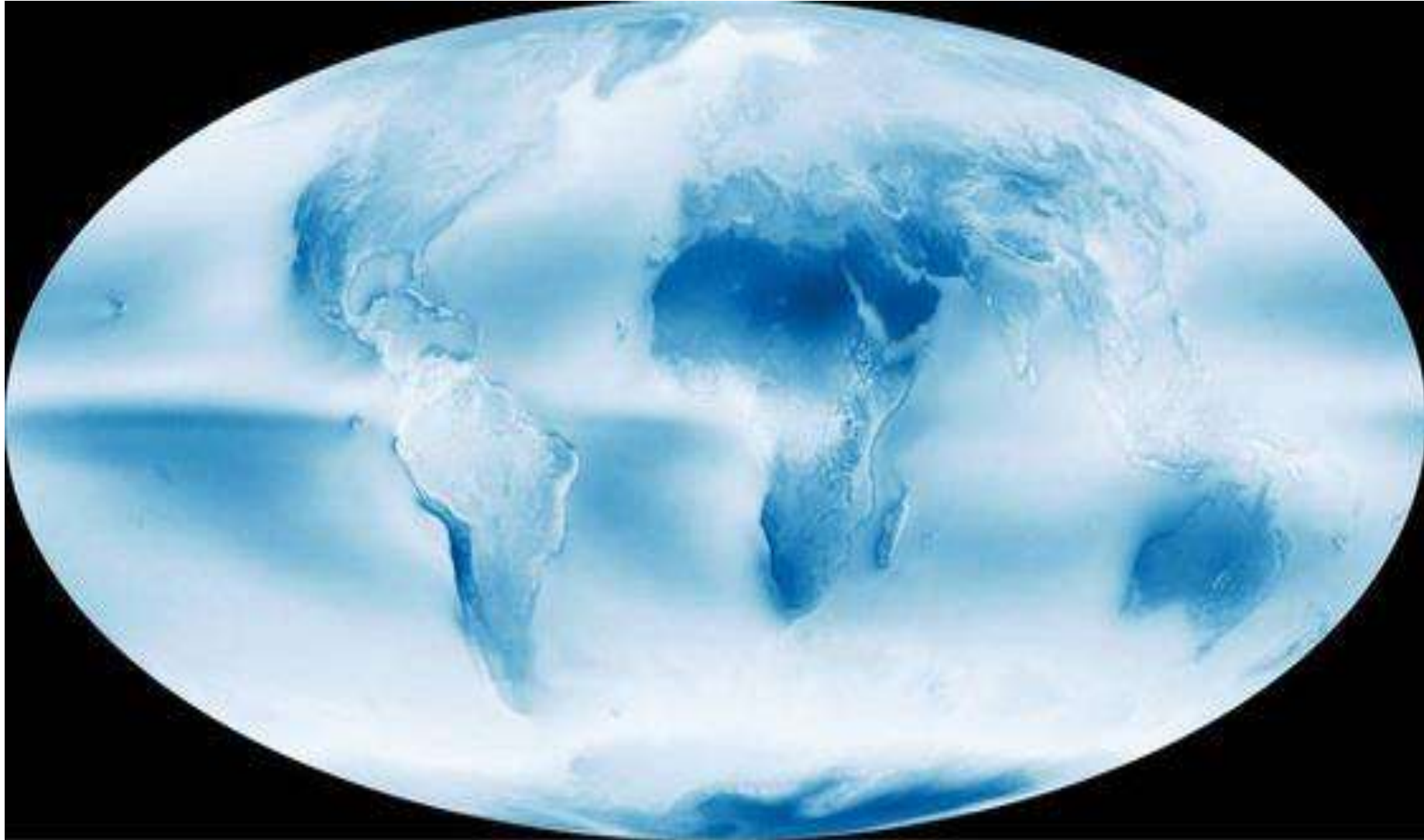
⁹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México



PM vs. Salud vs. Nubes



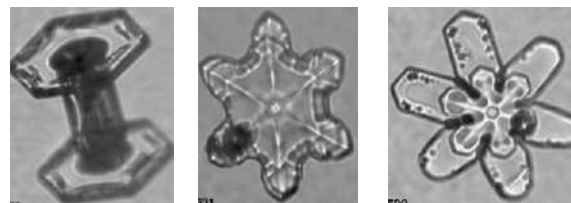
Nubes



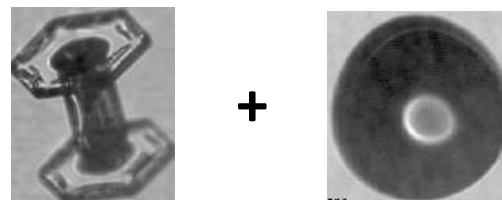
Promedio de la nubosidad entre Julio del 2002 y Abril del 2015

Nubes

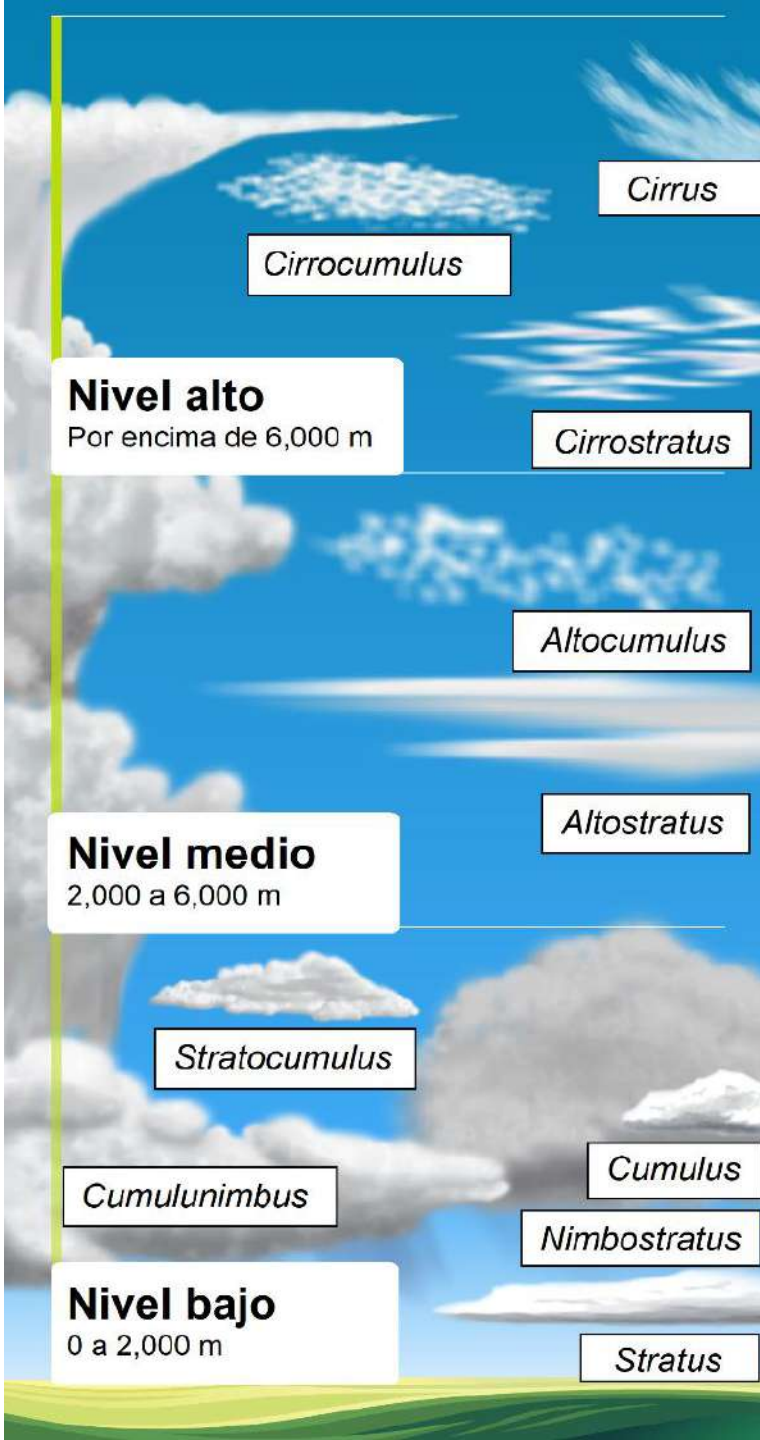
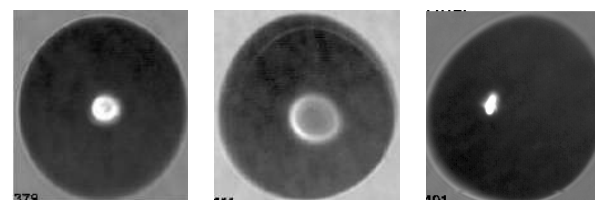
Cristales de hielo



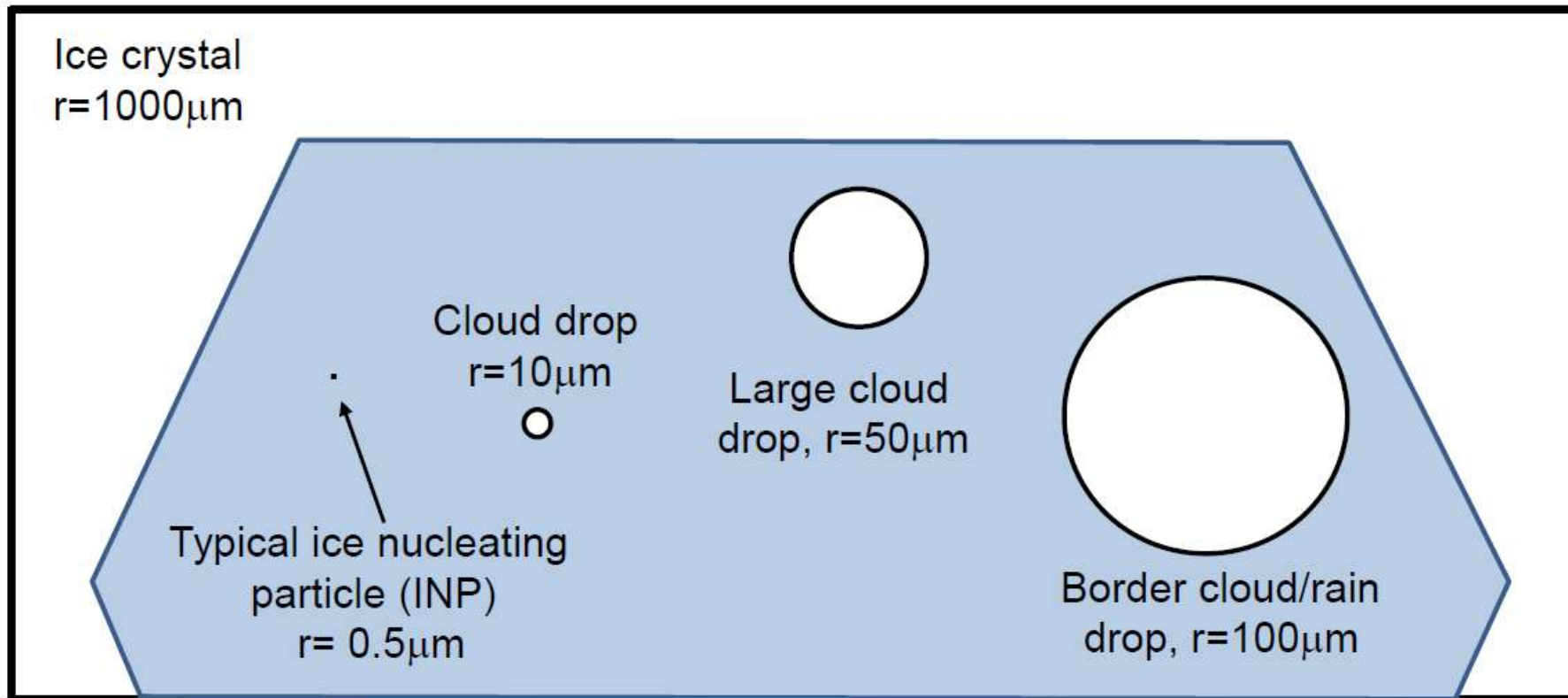
**Gotas líquidas superfrías
y
Cristales de hielo**



Gotas líquidas



Aerosol vs. Nubes Frías



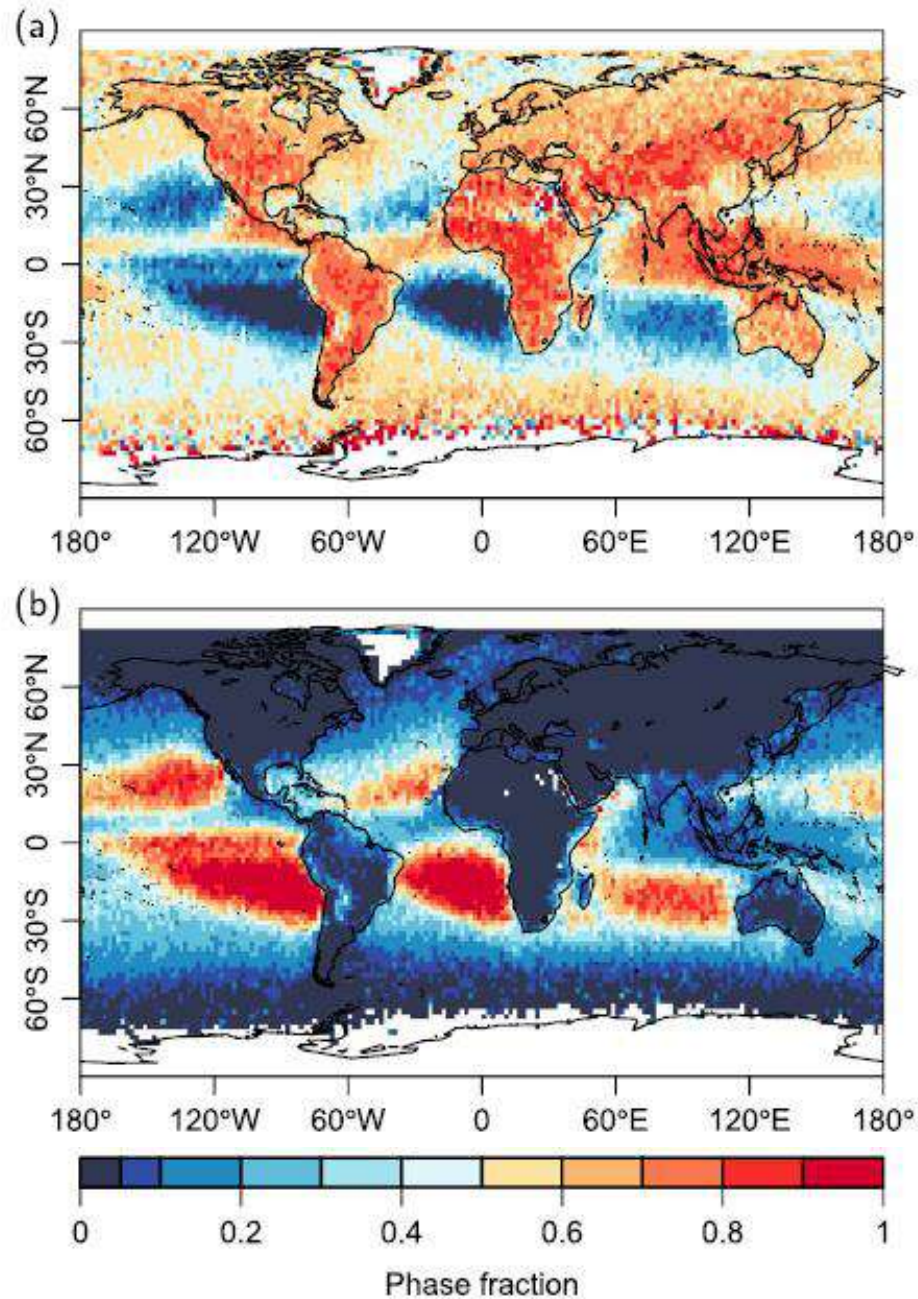
Ice Nucleating Particles (**INPs**): Núcleos de glaciación

Típicamente solo 1 partícula en un millón actúa como INP

Buen INP: gran tamaño, sólida, superficie con sitios activos, posibilidad de realizar enlaces de H, entre otros.

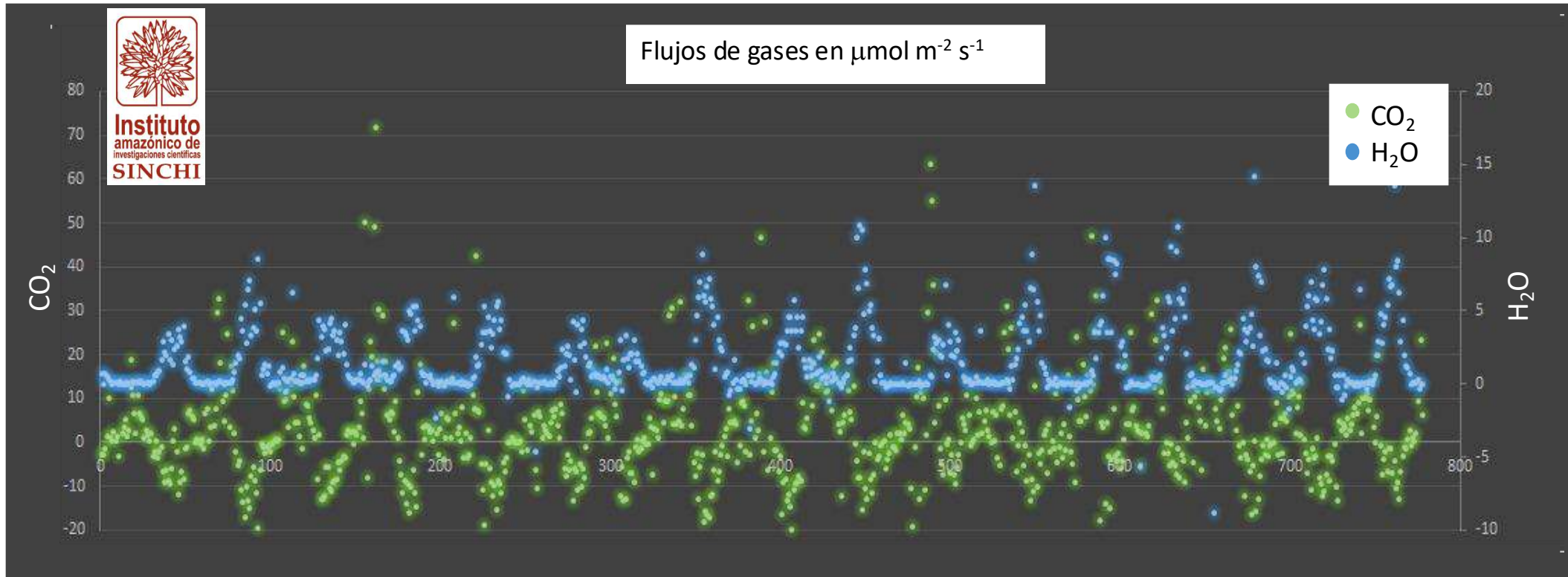
¿Por qué son importantes las nubes frías?

La mayoría de la precipitación de los continentes en latitudes medias y tropicales se forma a través de nubes frías (i.e., aquellas que contienen hielo)



Amazonas vs. Humedad

Los árboles del Amazonas también **liberan 20 mil millones de toneladas de agua** a la atmósfera por día, desempeñando un **papel fundamental en los ciclos globales** y regionales del carbono y el agua (WWF, 2024)



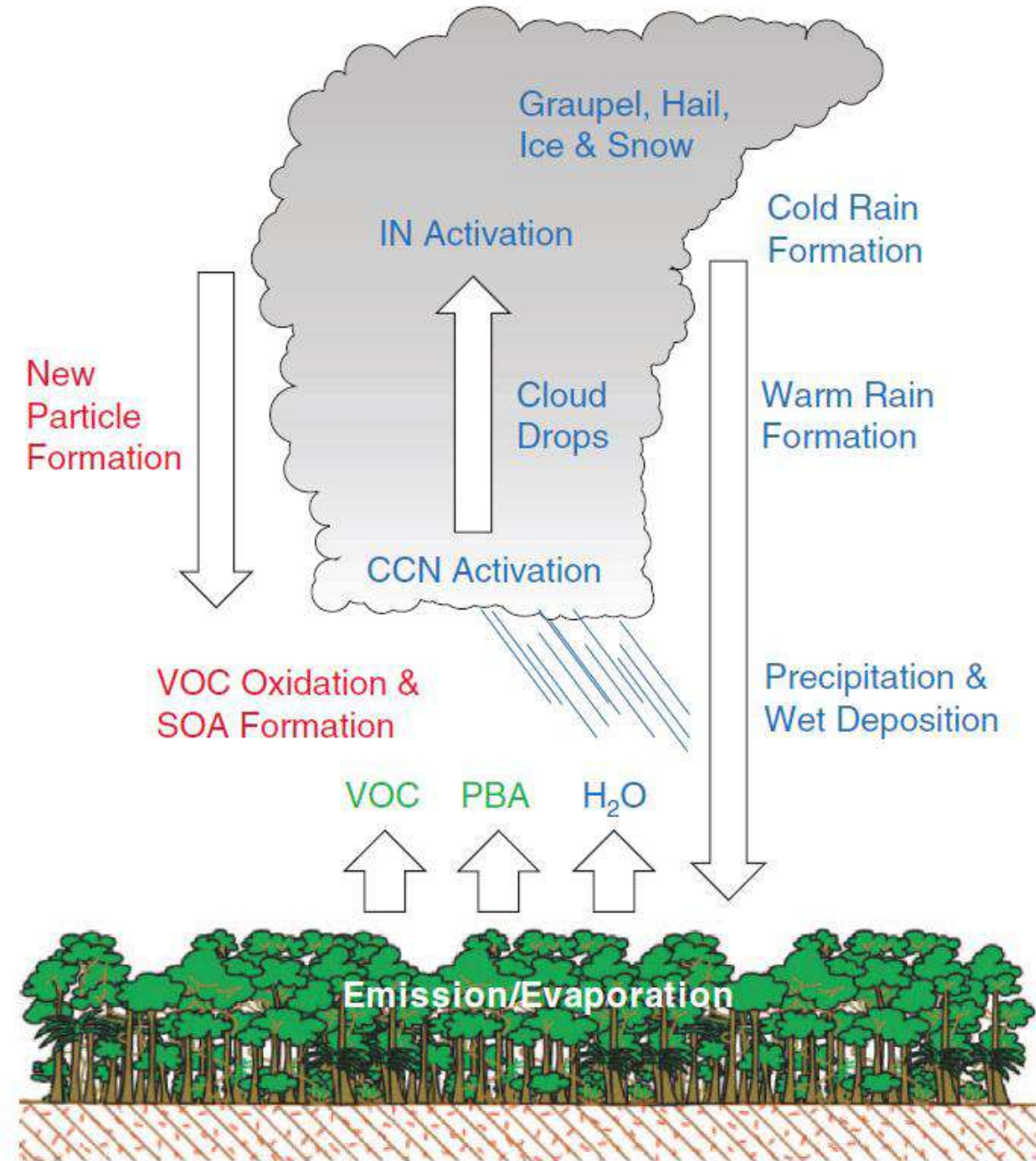
Incendios forestales en el Amazonas



Ciclo hidrológico

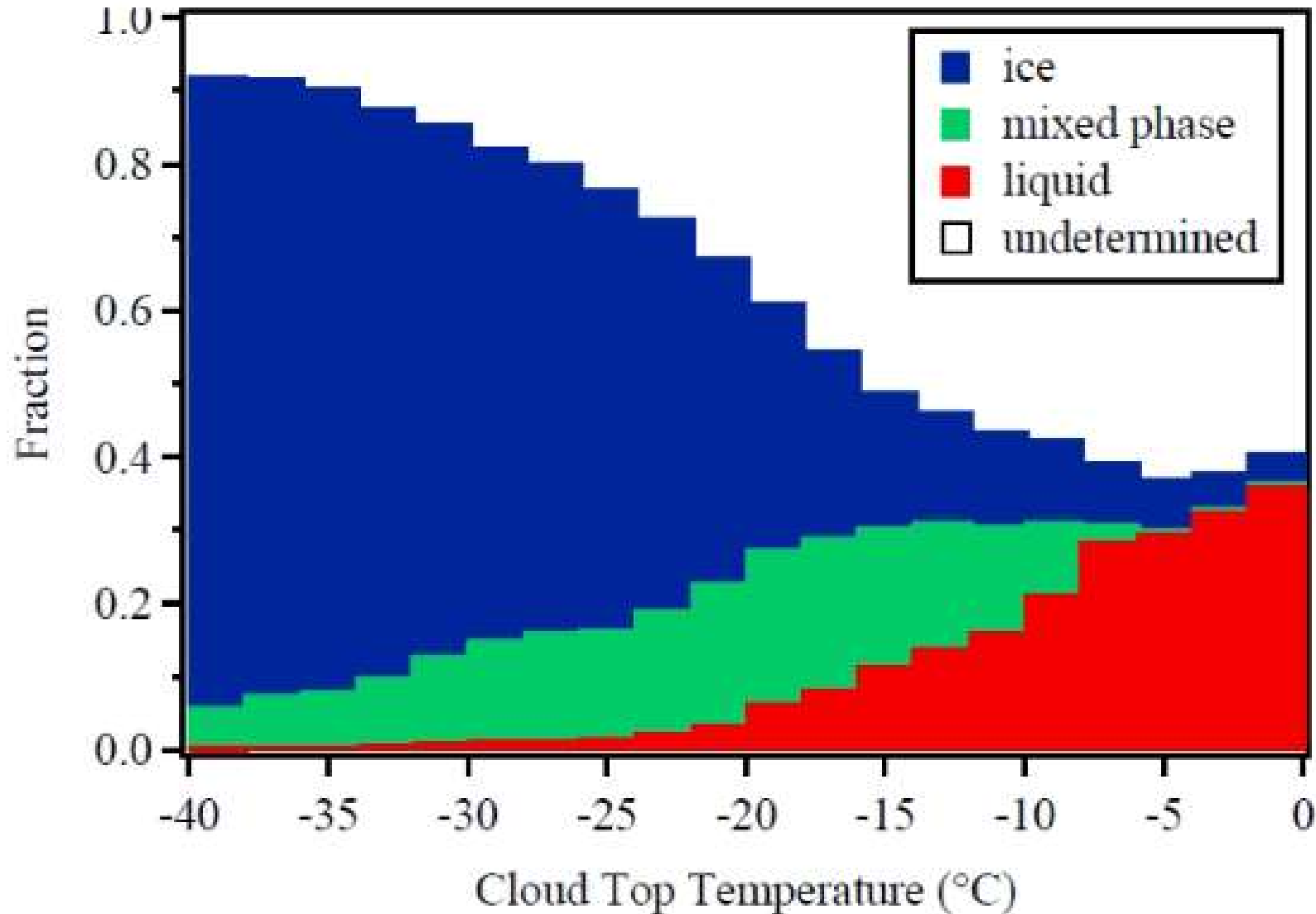
El Amazonas es una gran fuente de humedad, la cual al interactuar con las partículas biogénicas emitidas localmente promueven la formación de nubes convectivas, y por lo tanto, el desarrollo de precipitación.

VOC: Compuestos orgánicos volátiles
SOA: Aerosoles orgánicos secundarios
PBA: Aerosoles biológicos primarios
CCN: Núcleo de condensación de nube
IN o INP: Núcleo de hielo



Amazonas vs. Nubes

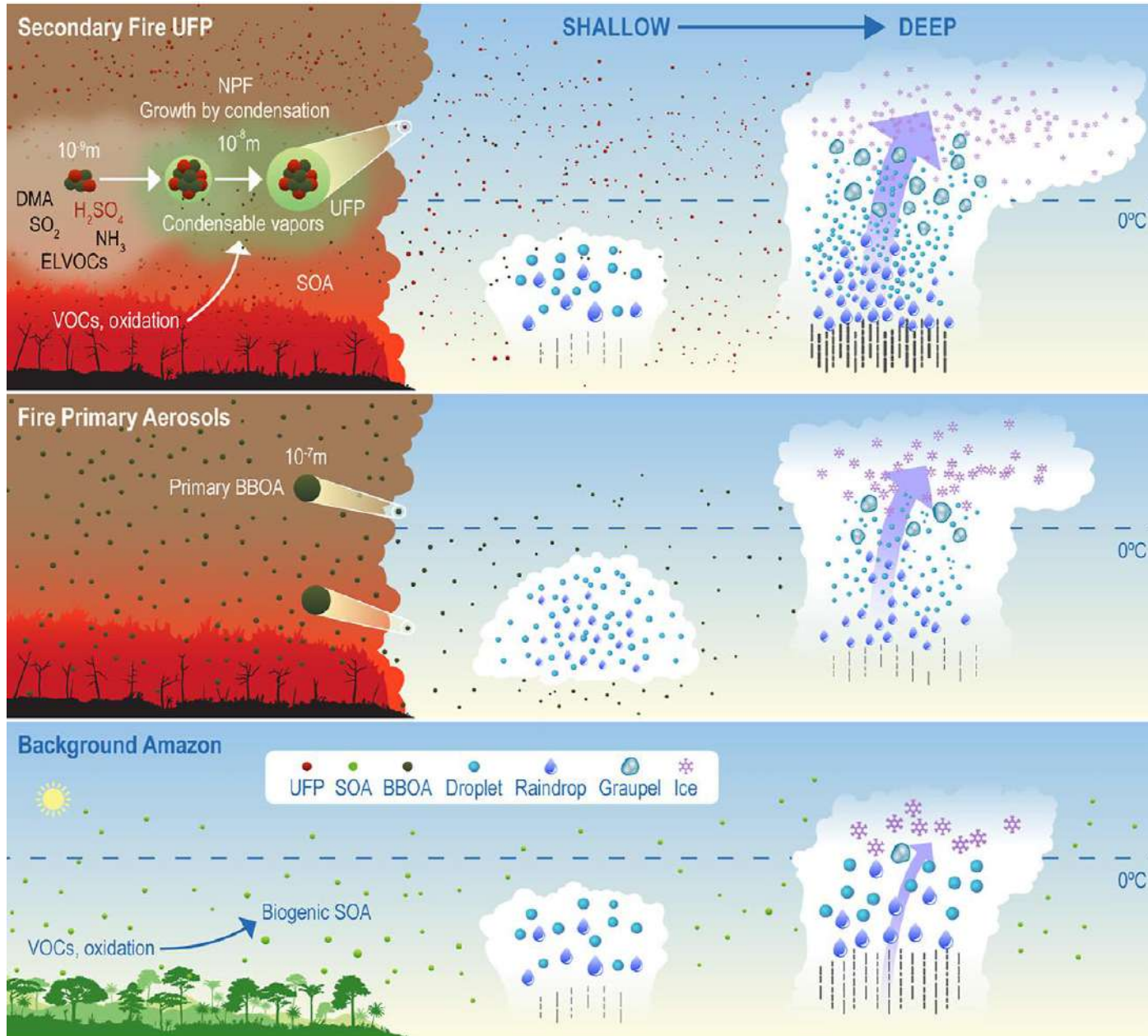
Proyecto AMAZE-08 (Amazonas central)



Entre el 40% y el 90% de las nubes sobre el Amazonas contienen hielo

¿Pueden los incendios forestales impactar la formación de nubes en el Amazonas?

BB vs. Formación de nubes



Las **partículas ultrafinas (UFP)** secundarias **provenientes de BB** pueden causar **tormentas más fuertes** con un yunque más grande y lluvia más intensa, mientras que las partículas primarias (más grandes) emitidas directamente por los incendios retrasan y suprimen la lluvia.

Spring NOrthern aMazon Aerosol eXperiment (SNOMAX)



■ Bioma amazónico

Foto: <https://www.bbc.com/>



Instituto
amazónico de
investigaciones científicas
SINCHI



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

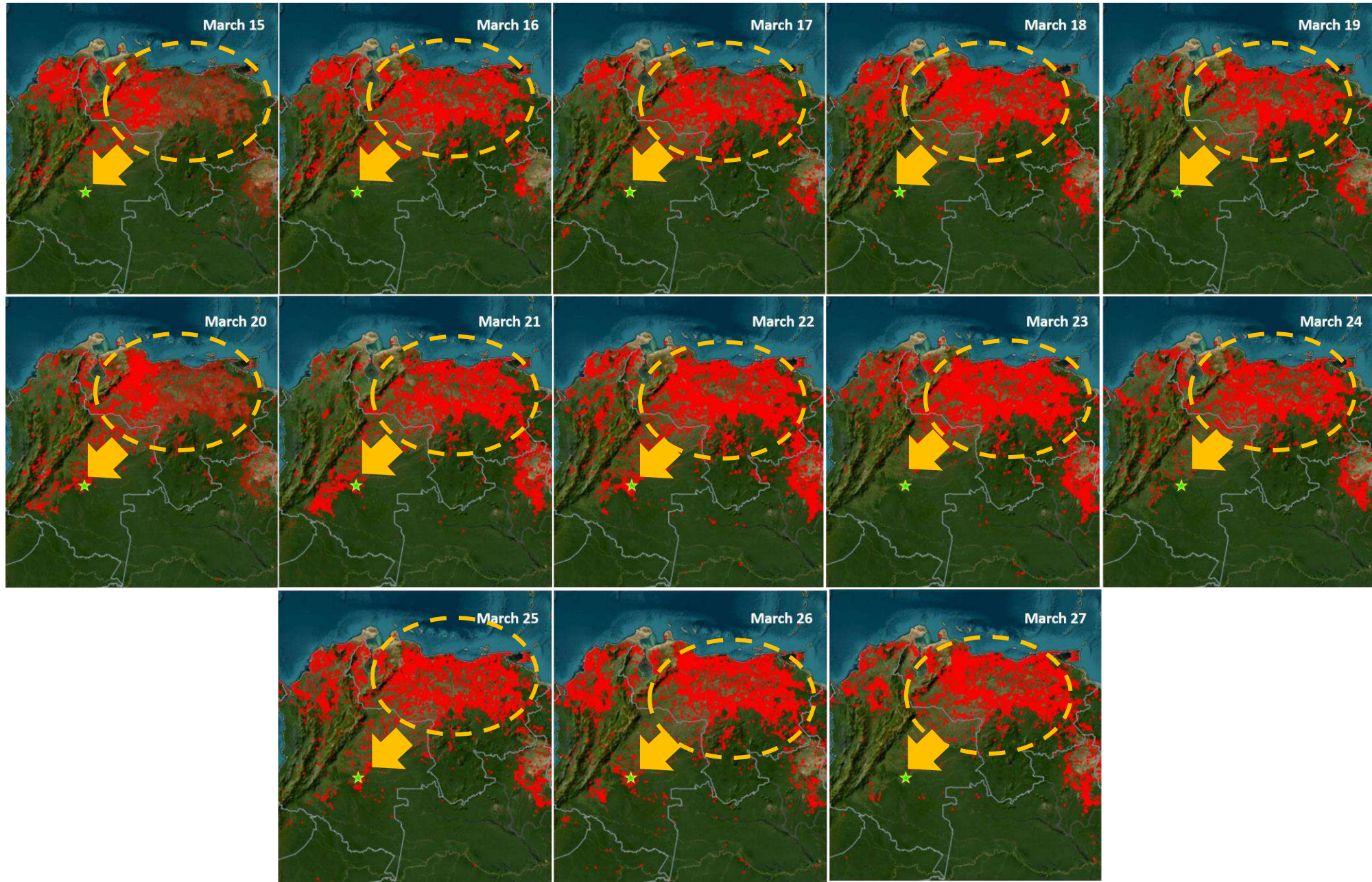
SNOMAX



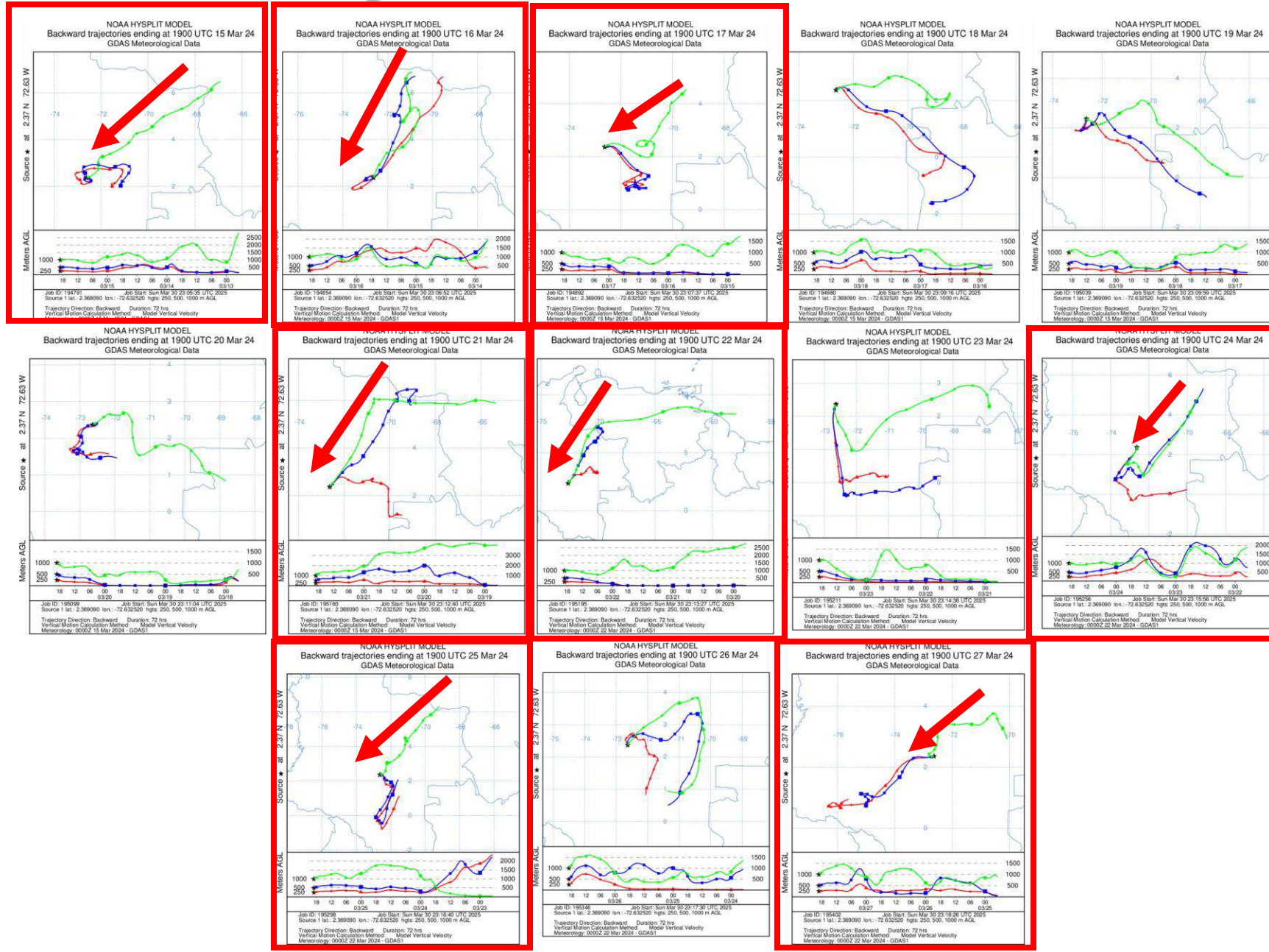
Estación experimental El Trueno
El Retorno (Guaviare)
14 al 28 de marzo de 2024



Incendios forestales



Trayectorias de las masas de aire



Los resultados indican que varias de las masas de aire que llegaron al punto de muestreo provenían de los incendios en las llanuras Venezolanas y Colombianas

Como se sugirió en nuestro estudio previo en Villavicencio (Rodríguez-Gómez et al. 2022), la mezcla de BB + OLLJ pueden transportar partículas al noroeste del Amazonas

UNAM - Microorifice uniform deposit impactor - Droplet freezing technique (UNAM-MOUDI-DFT)

17

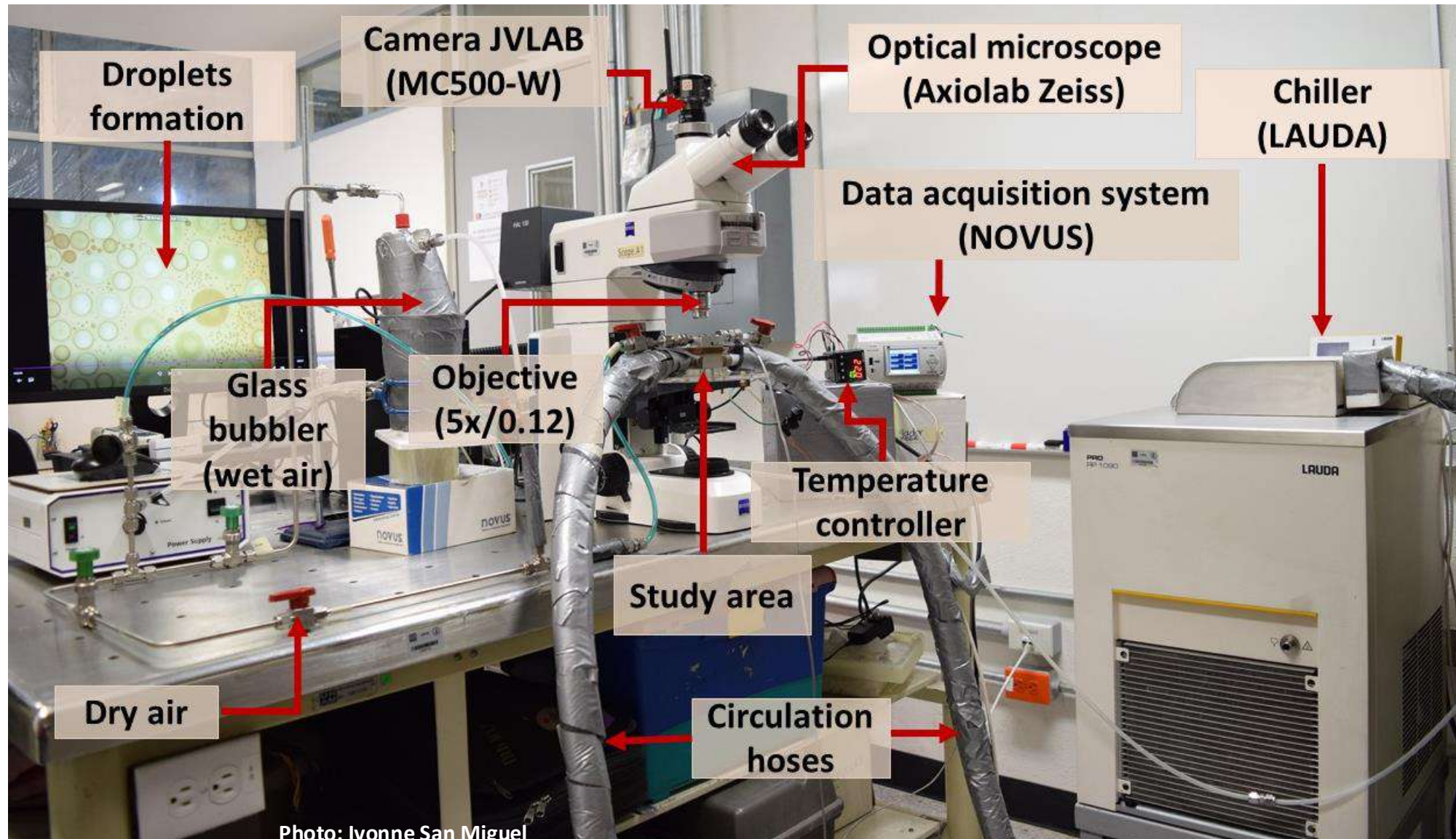
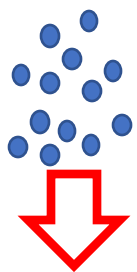


Photo: Ivonne San Miguel

UNAM-MOUDI-DFT



MOUDI



Partículas de aerosol



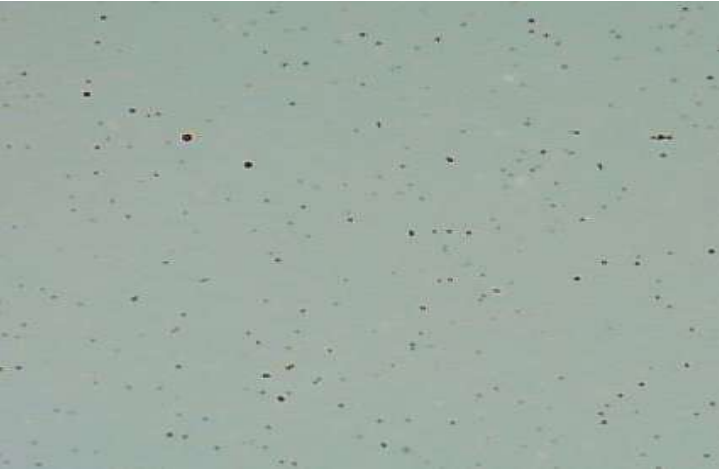
UNAM-MOUDI-DFT

“cámara de nube”

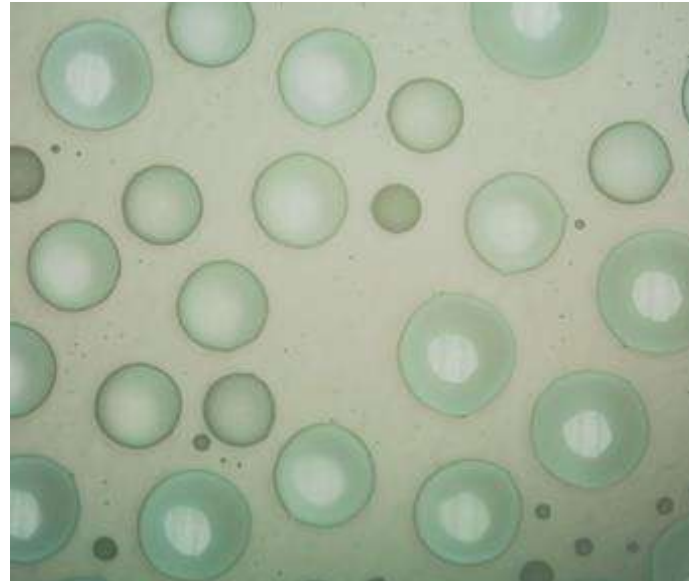


Eficiencia y concentración de INPs

UNAM-MOUDI-DFT

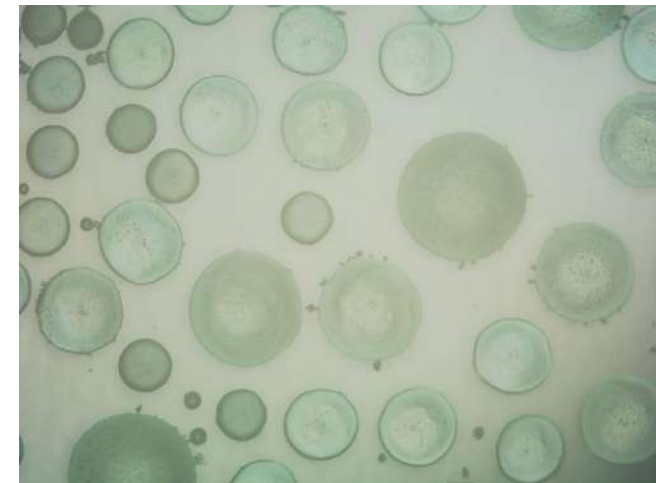


← Partículas de aerosol a 0°C

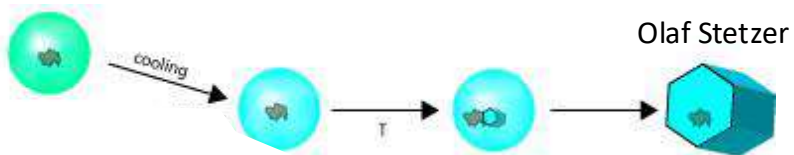


← Gotas líquidas (a 0°C)
con partículas de
aerosol inmersas en
ellas

Gotas congeladas a -40°C →



Immersion freezing

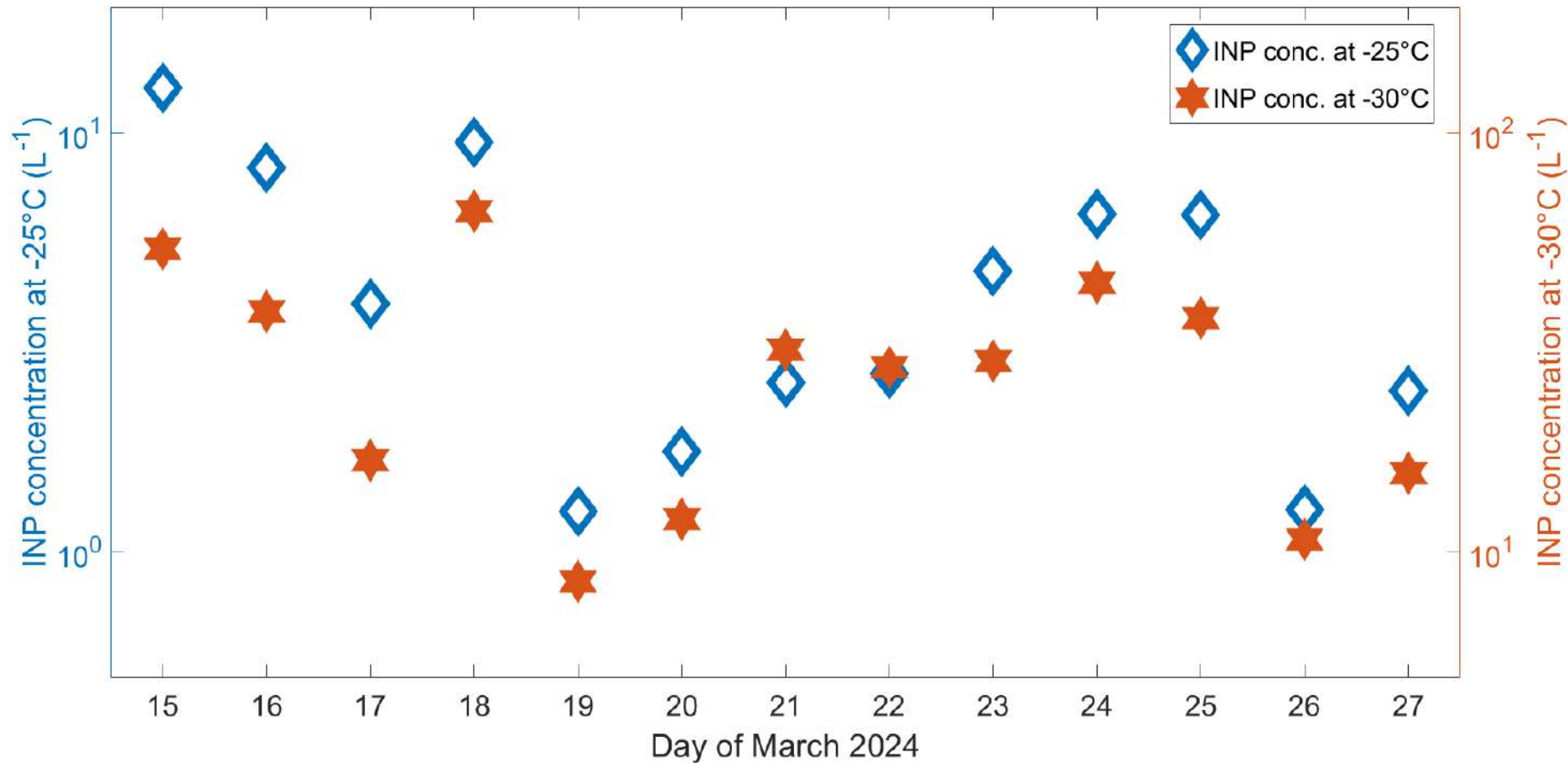


UNAM-MOUDI-DFT



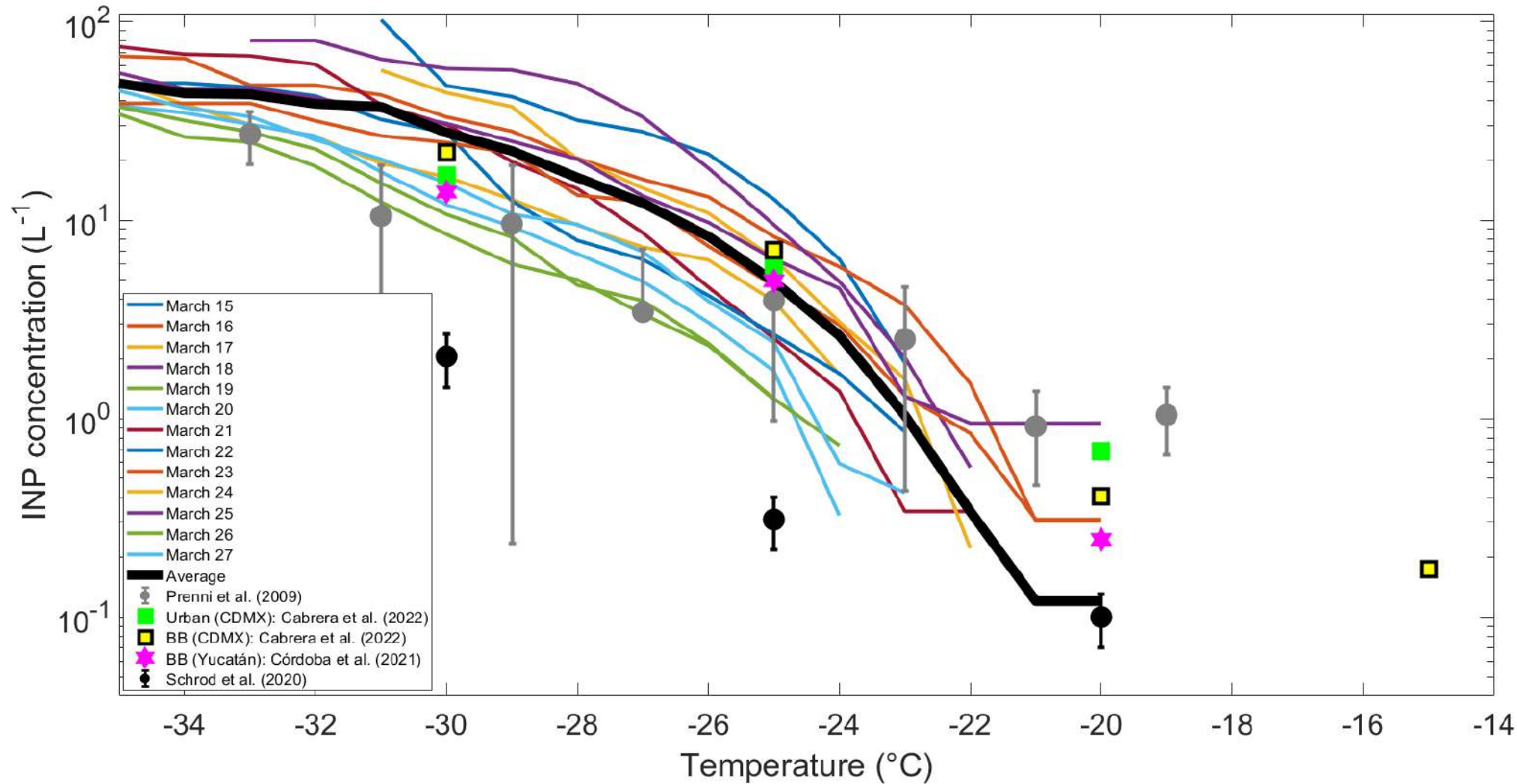
Las gotitas se congelan gracias a las partículas de aerosol inmersas en ellas (es decir, gracias a los INPs).

Núcleos de hielo (INPs)



Las partículas de aerosol del noroeste del Amazonas tienen la capacidad de actuar como núcleos de hielo (INPs) entre -20°C y -30°C (INPs moderados).

Núcleos de hielo (INPs)



La concentración de INPs en el noroeste del Amazonas son comparables con Prenni et al. (2009) pero discrepan con las de Schrod et al. (2020)

Las partículas de BB en Ciudad de México son mejores INPs entre -11 y -20°C (envejecimiento atmosférico).

Conclusiones

- Las partículas de aerosol que resultan de los incendios forestales en las llanuras Venezolanas y Colombianas pueden ser eficientemente transportadas al noroeste del Amazonas.
- Si bien el Amazonas es una gran fuente de partículas biológicas, estas parecen jugar un papel secundario en la formación de nubes (al menos en la época de secas cálidas).
- Se encontró que las partículas de incendios forestales pueden actuar como INPs entre -20 y -35°C , con un alto potencial de impactar la formación de hielo en las nubes mixtas (en ausencia de polvo mineral y biopartículas).
- Dado que el Amazonas se encuentra en constante amenaza y se prevé que el cambio climático modifique este bioma único, necesitamos mejorar nuestro entendimiento de la interacción aerosol-nubes en el bosque tropical más grande de la Tierra.

SNOMAX 2025 (Nubes mixtas y cirrus)

Financiamiento y Agradecimientos



Jorge Ladino, Elizabeth García, Rodrigo Jiménez, Lina Puerta, Irma Rosas, Camilo Alvarado, Leticia Martínez, Eva Salinas, Delibes Flores, Maribel Saavedra, Jorge Zavala, Luis González, Vanessa Ayala, Marbella González, Soledad Funes, Maru González, Alejandro García, Fernanda Córdoba, Montserrat Silva, Emma Negrete

y a todo el personal del SINCHI en Bogotá, San José del Guaviare y El Trueno





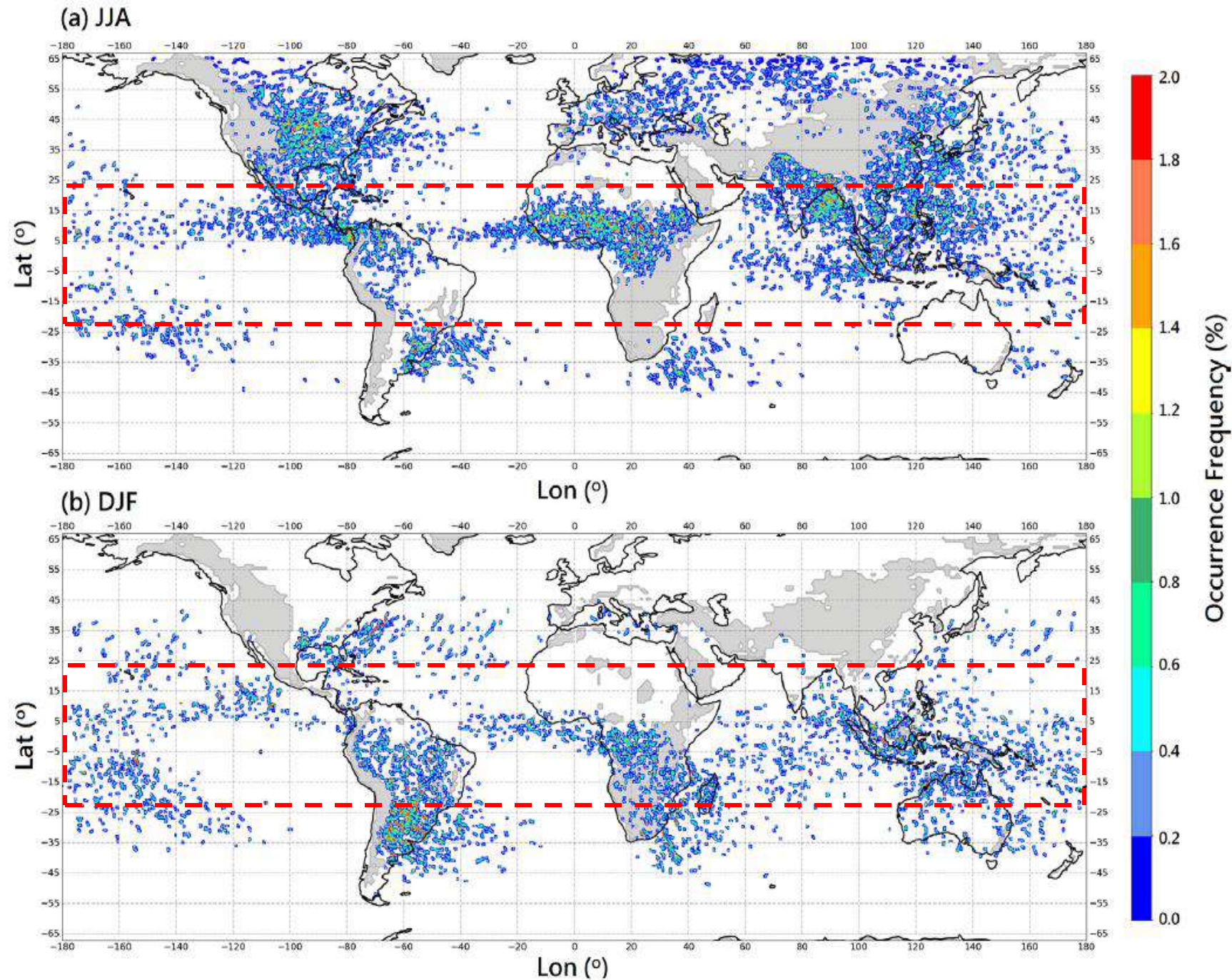
¡Gracias por su Atención!

Email: luis.ladino@atmosfera.unam.mx

Tel: +52 (55) 5622 4800 ext. 81981

www.luis-ladino.com

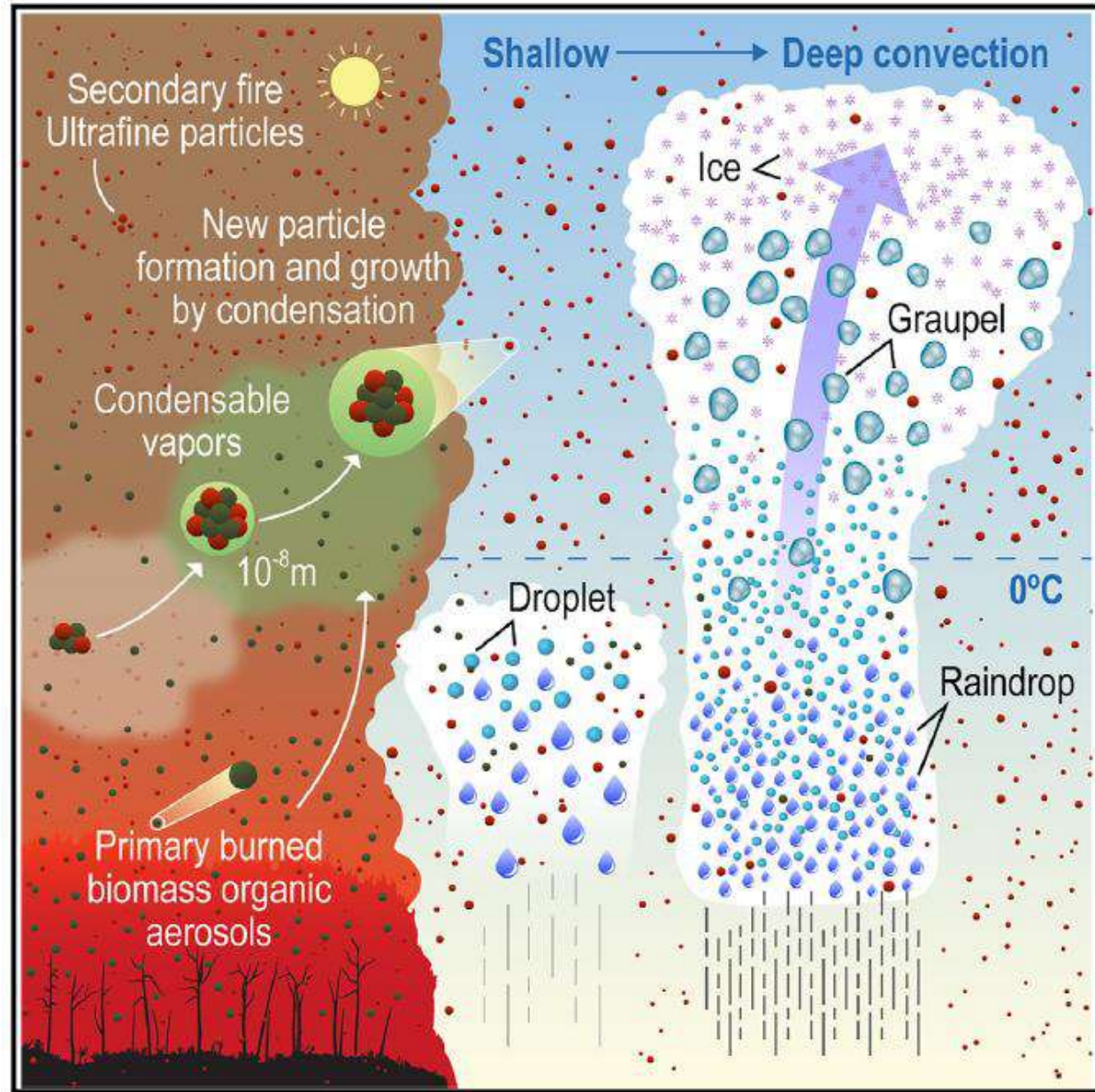
Sistemas Convectivos de Mesoescala





BB vs. Nubes vs. Precipitación

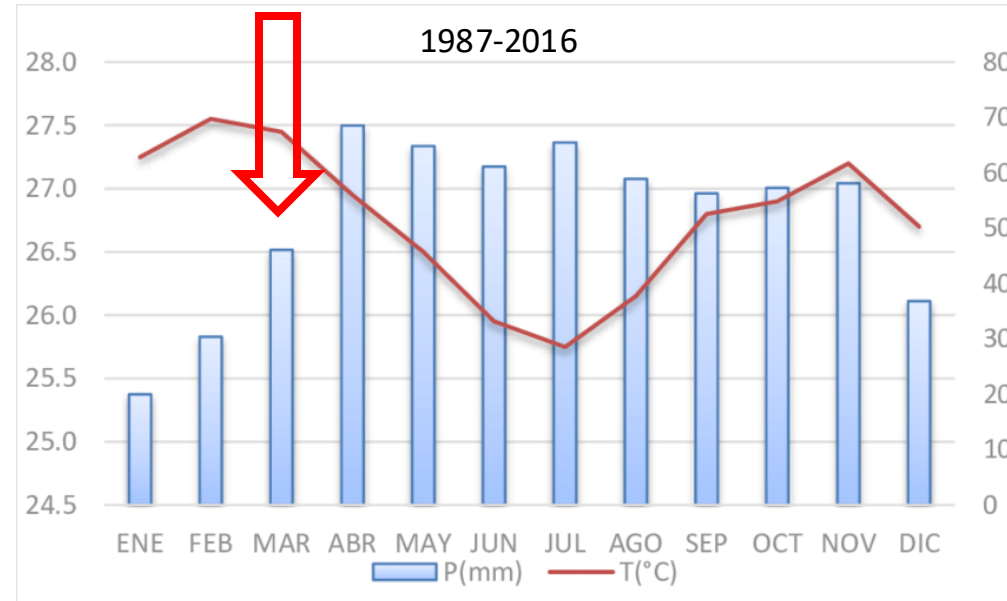
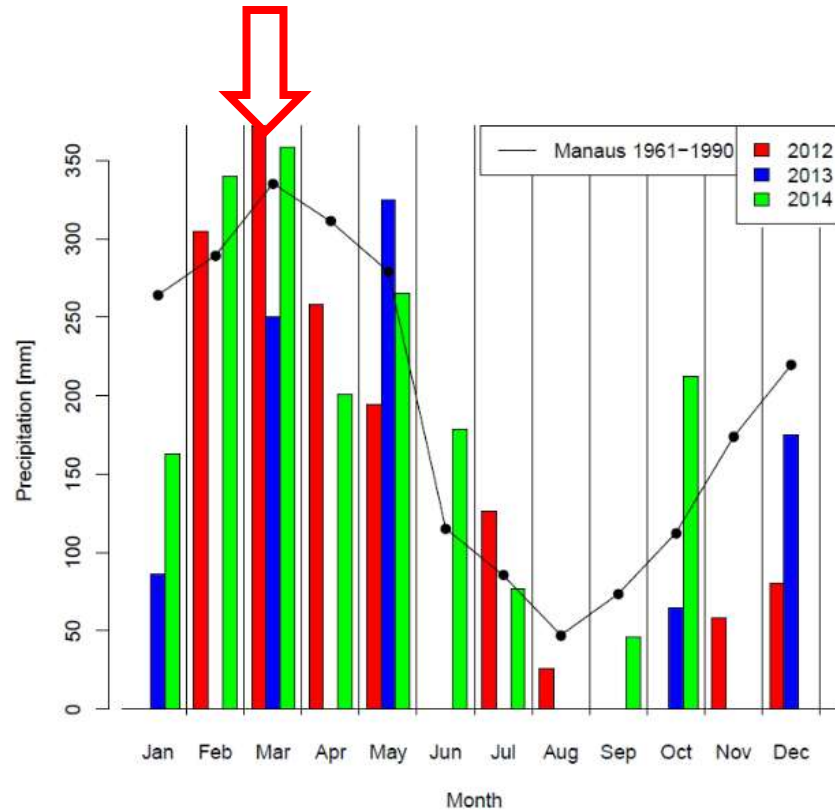
Las emisiones de la quema de biomasa juegan un papel determinante en la interacción aerosol-nubes en ambientes prístinos, como el Amazonas.



SNOMAX

	Equipo	Función
1	Condensation particle counter (CPC)	Concentración total de partículas de aerosol (>30 nm)
2	Contador óptico de partículas (LasAir)	Concentración numérica de las partículas de aerosol función de su tamaño (300 nm a 10 μm)
3	DustTrak	Concentración másica del material particulado en función de su tamaño ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10})
4	Impinger	Recolección de partículas para su análisis microbiológico o químico en una matriz líquida
5	Micro-orifice Uniform deposit impactor (MOUDI)	Recolección de partículas de aerosol en función de su tamaño (0.18 a 10 μm) para análisis de SEM/EDX y núcleos de hielo
6	MiniVol (3)	Recolección automática de partículas de aerosol en filtros para análisis químicos (XRF, IC, OC/EC)
7	Sensor de partículas de bajo costo	Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en tiempo real.
8	Estación meteorológica	Mediciones de las diferentes variables meteorológicas
9	Bioimpactador	Recolección de partículas de aerosol en medios de cultivo específicos para bacterias y hongos

Amazonas Central Vs. Noroeste

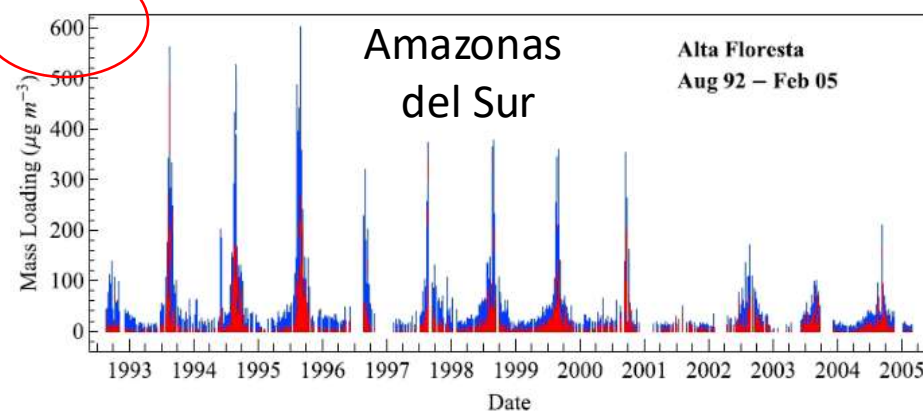
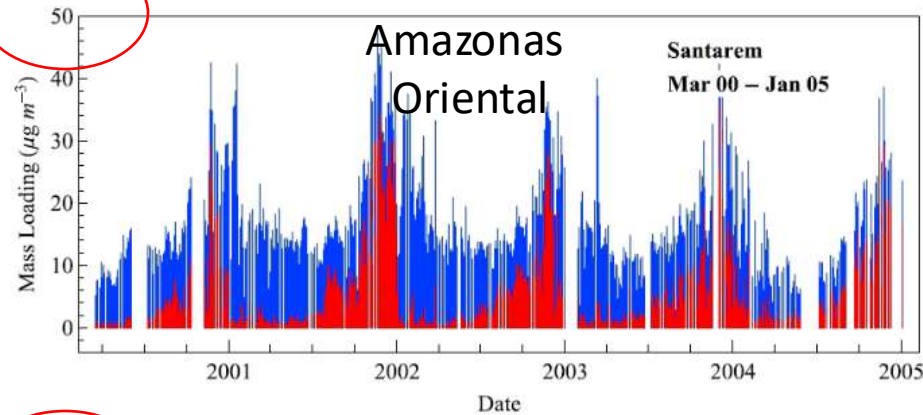
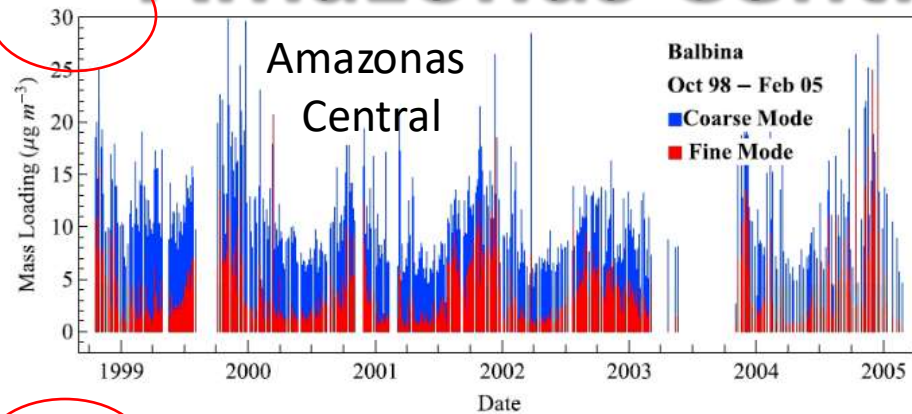


Existen diferencias en los periodos secos y húmedos entre el centro y el noroeste del Amazonas.

Centro: Noviembre-Mayo

Noroeste: Abril-Noviembre

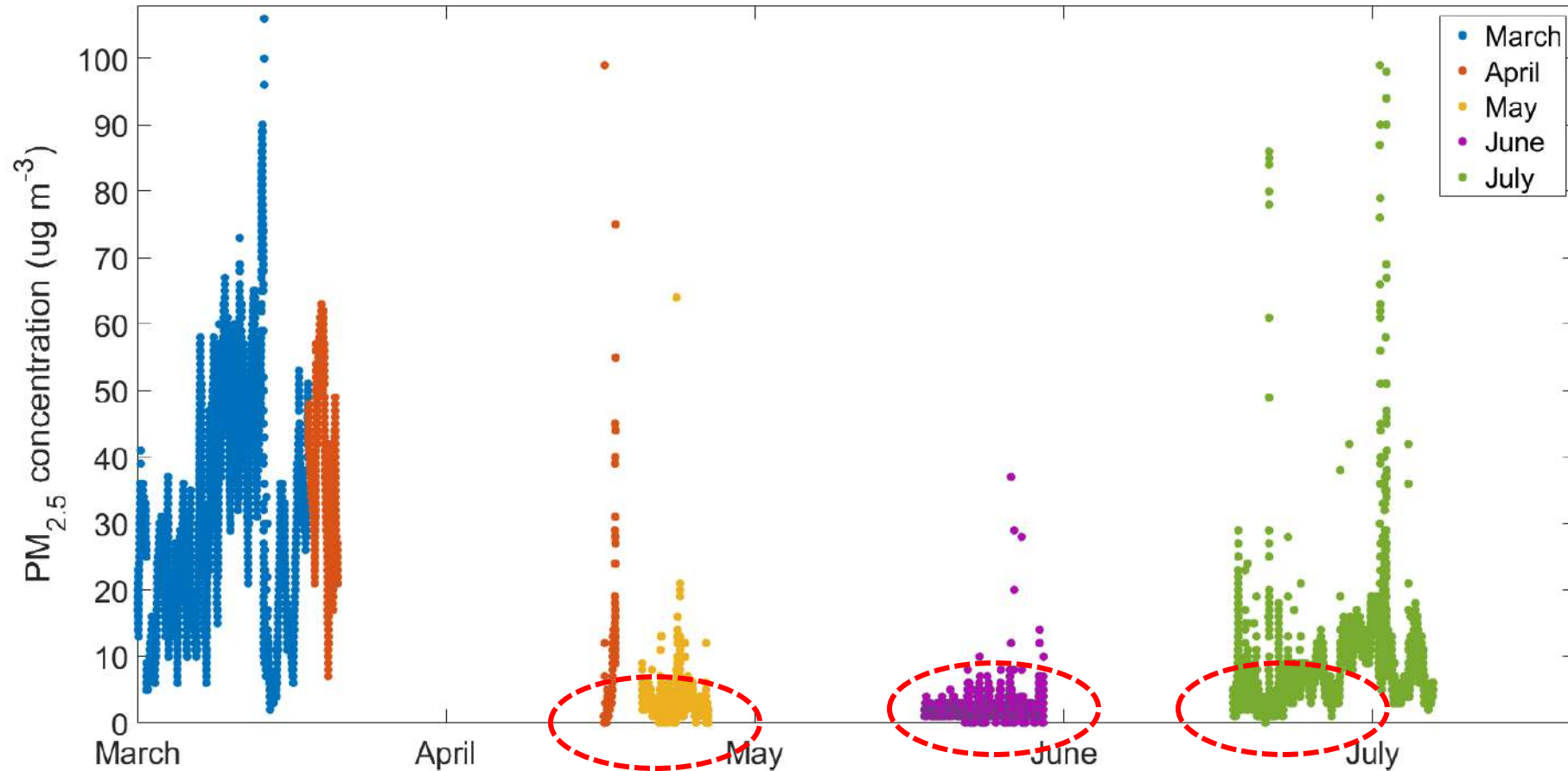
Amazonas Central / Sur / Oriente



Los niveles de contaminación del aire (partículas) en el centro y oriente del Amazonas son muy bajos comparados con el Sur del Amazonas.

¿Y el Norte?

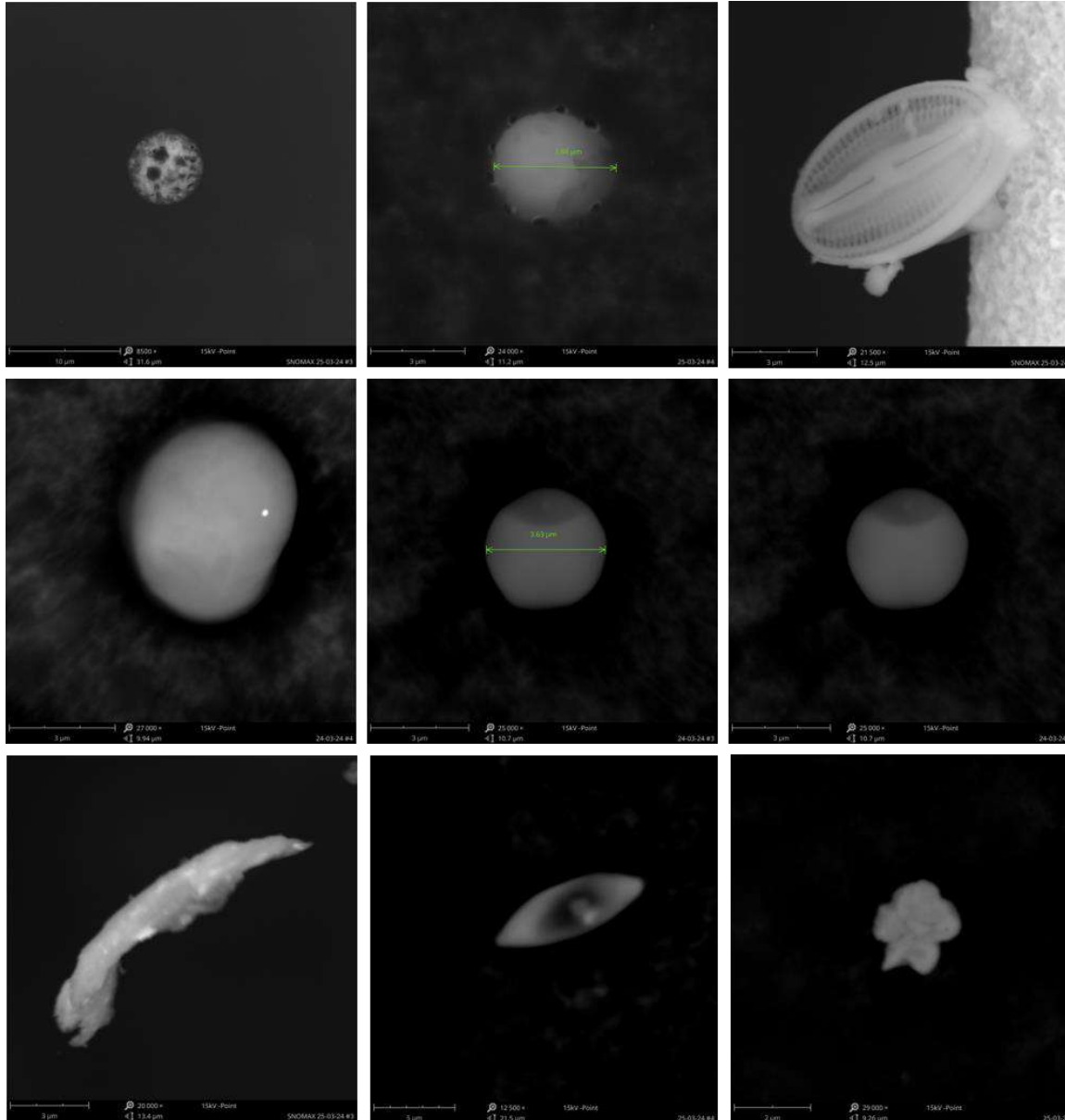
Resultados: Calidad del aire



Los altos niveles de contaminación no se observaron en los meses posteriores (concentraciones tan bajas como $1 \mu\text{g m}^{-3}$)

Resultados:

Microscopía electrónica de barrido (SEM)



Element Number	Element Symbol	Element Name	Weight Concentration	Error
6	C	Carbon	72.8	0.0
8	O	Oxygen	15.2	0.2
29	Cu	Copper	11.9	0.4

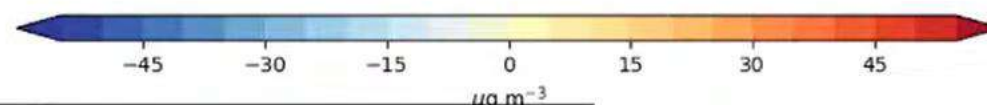
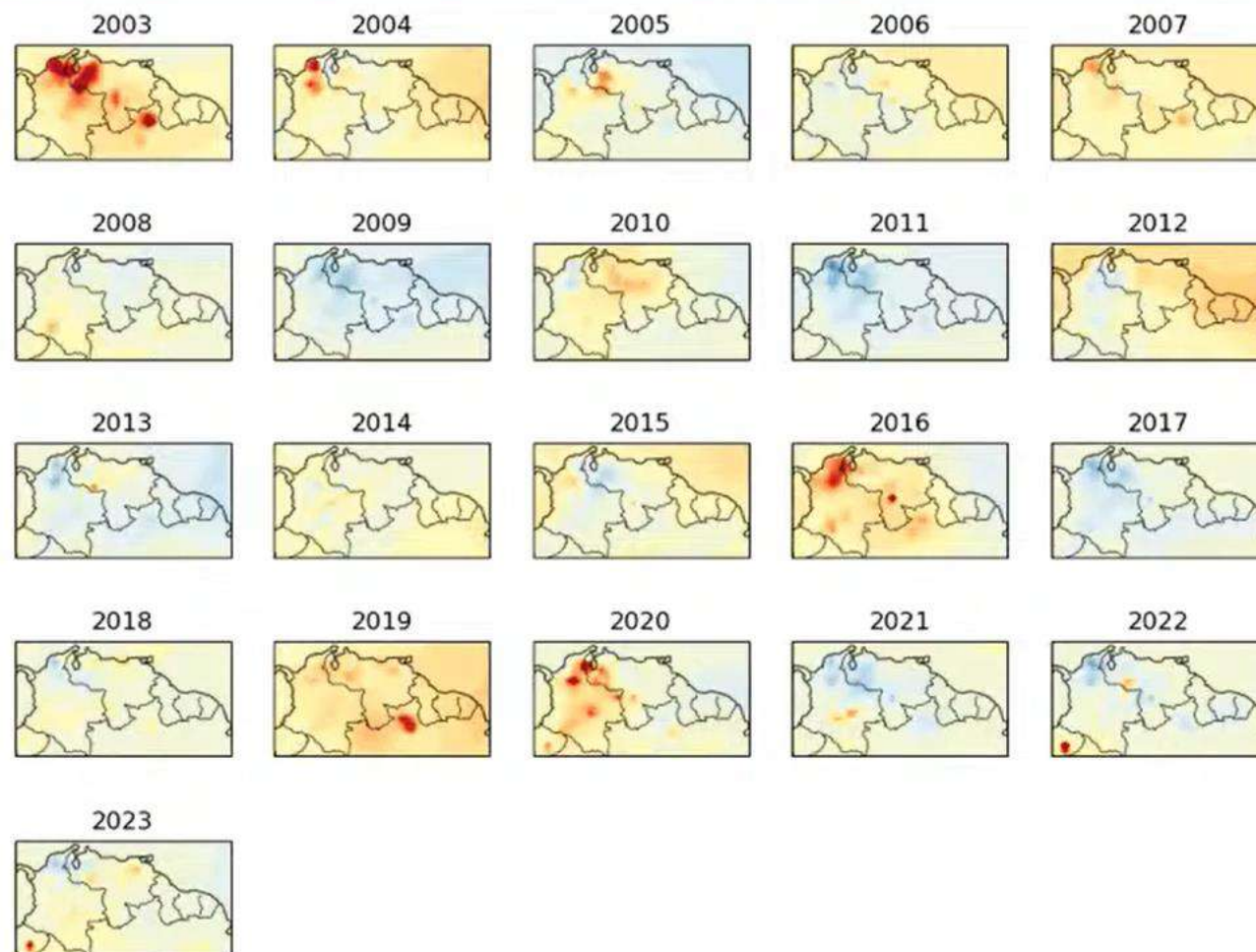
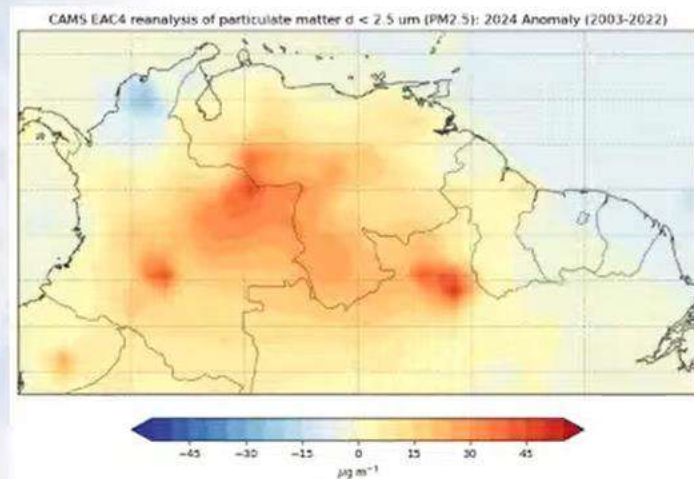
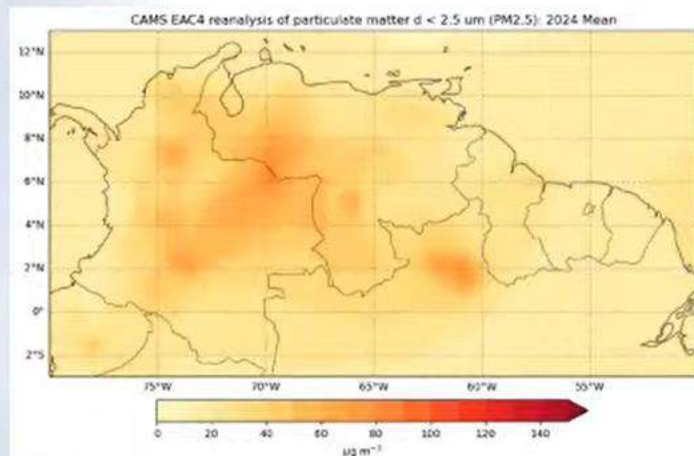
La mayoría de las partículas analizadas por SEM muestran ser orgánicas, incluyendo partículas biológicas.

Se analizaron 1461 partículas con una esfericidad promedio de 0.76



Atmosphere
Monitoring

Monthly mean PM_{2.5}: Marzo



Reanalysis

Using a combination of observations and computer models to recreate historical climate conditions.

Inness et al. 2019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>

Estes de febrero y el prosimo es para maso. So exactamente el mismo pero



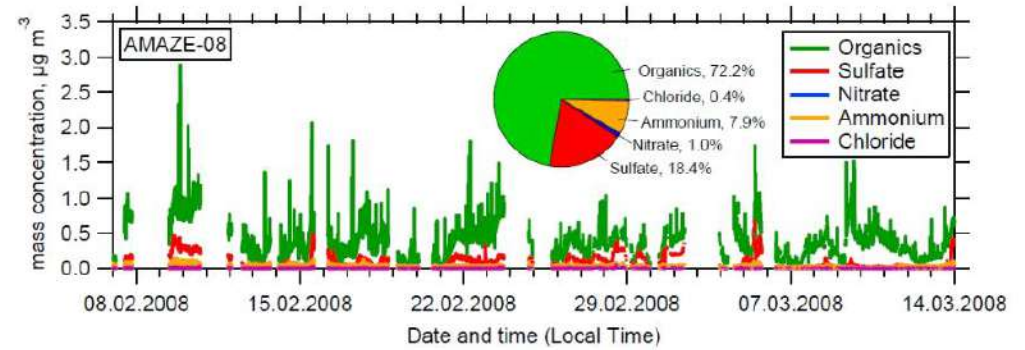
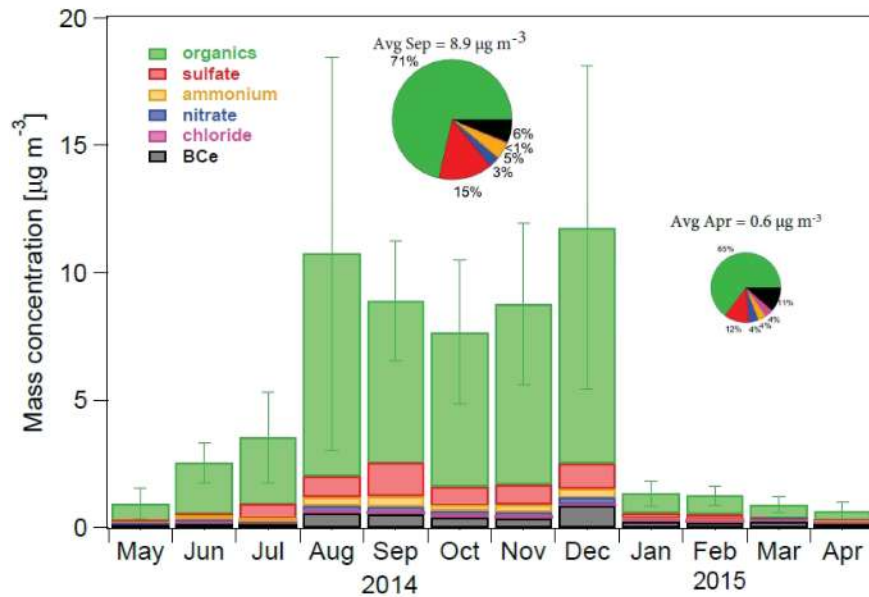
PROGRAMME OF
THE EUROPEAN UNION



Amazonas: Fuente de agua



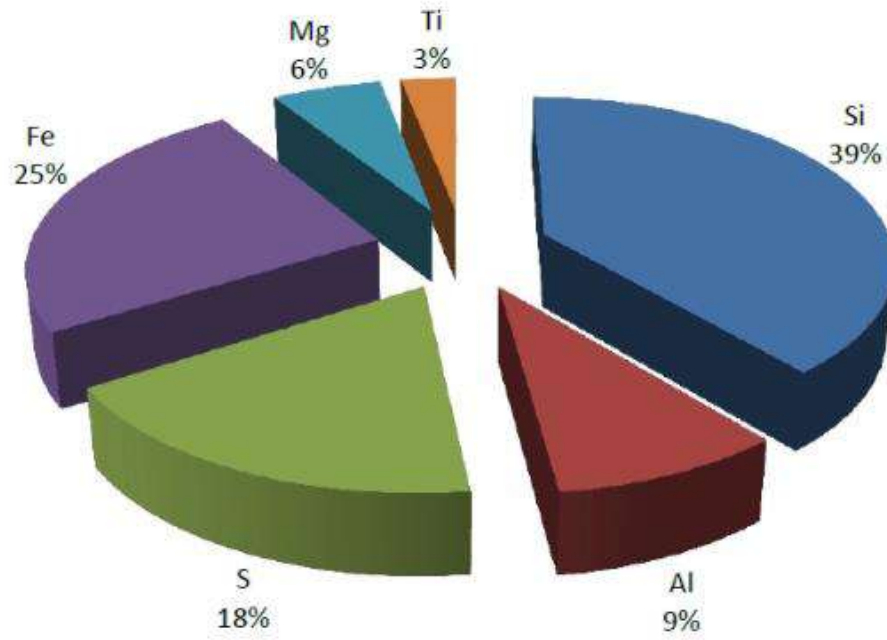
Resultados



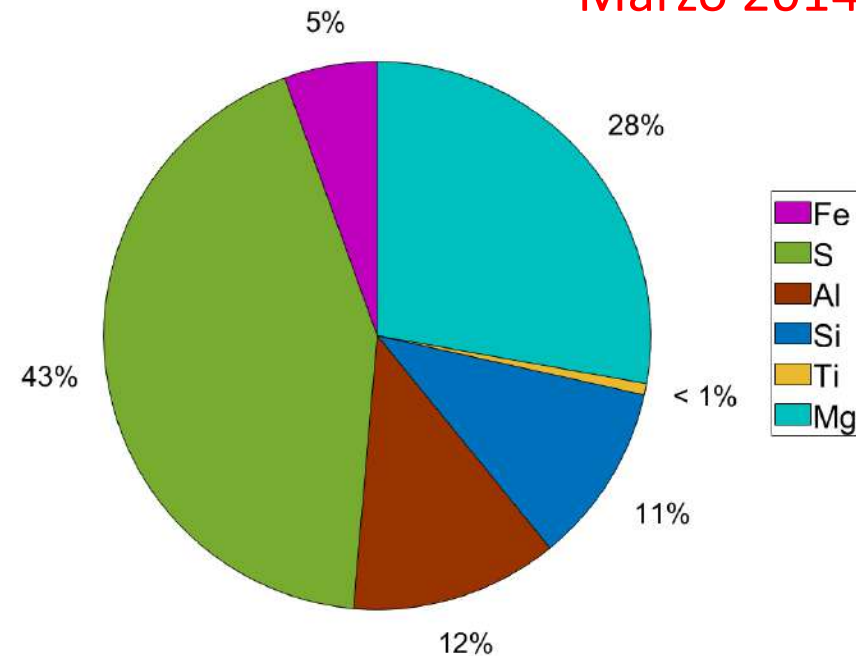
Los compuestos orgánicos definitivamente son muy importantes tanto en el Amazonas Central como en el Noroeste (casi el 75%).

Centro Vs. Noroeste

Marzo-Abril 2012



Marzo 2014

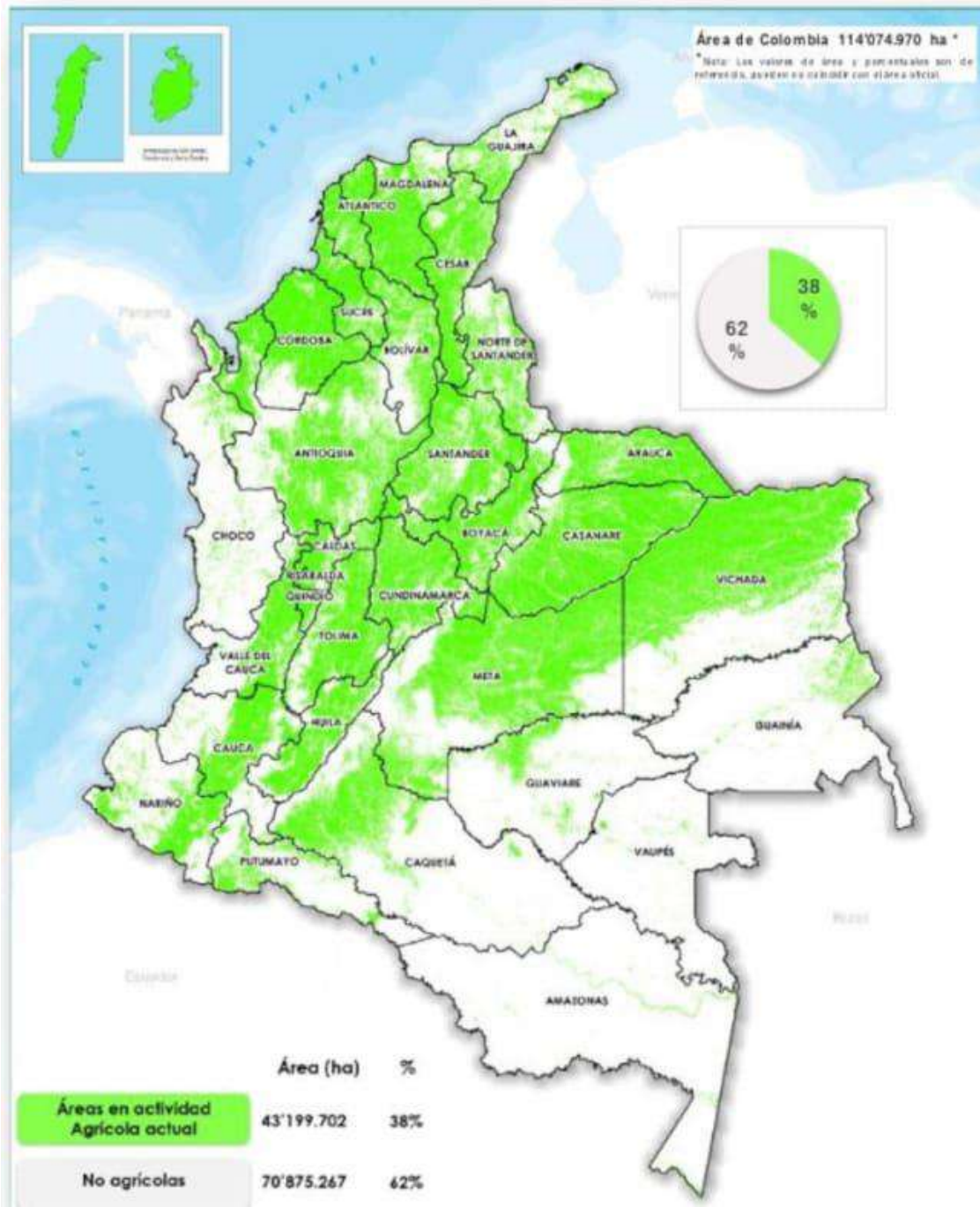


En el Centro la mayor fracción corresponder a los trazadores de Polvo Mineral; sin embargo, para este no es el caso para el Noroeste.

Fecha	Etapas del MOUDI	# de partículas analizadas	Circularidad promedio
23.03	3	47	0.804
	4	72	0.847
	5	670	0.593
24.03	3	44	0.710
	4	58	0.845
	5	171	0.798
25.03	3	86	0.81
	4	96	0.787
	5	79	0.669
26.03	4	138	0.738

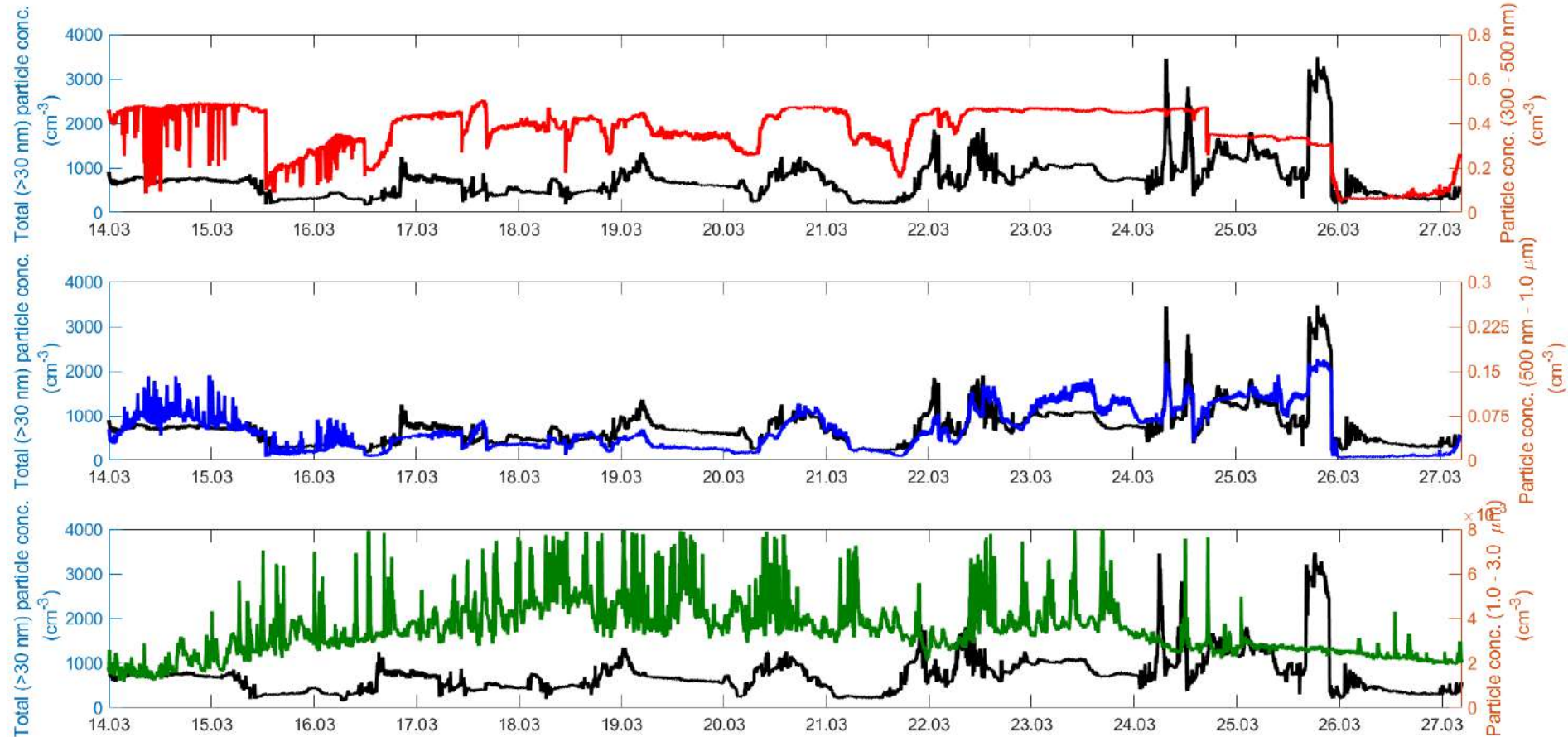
Fecha	Etapas del MOUDI	Rango de partículas	# de partículas analizadas	Circularidad promedio
23.03	3	3.2 – 5.6	47	0.804
	4	1.8 – 3.2	72	0.847
	5	1.0 – 1.8	670	0.593
24.03	3	3.2 – 5.6	44	0.710
	4	1.8 – 3.2	58	0.845
	5	1.0 – 1.8	171	0.798
25.03	3	3.2 – 5.6	86	0.81
	4	1.8 – 3.2	96	0.787
	5	1.0 – 1.8	79	0.669
26.03	4	1.8 – 3.2	138	0.738

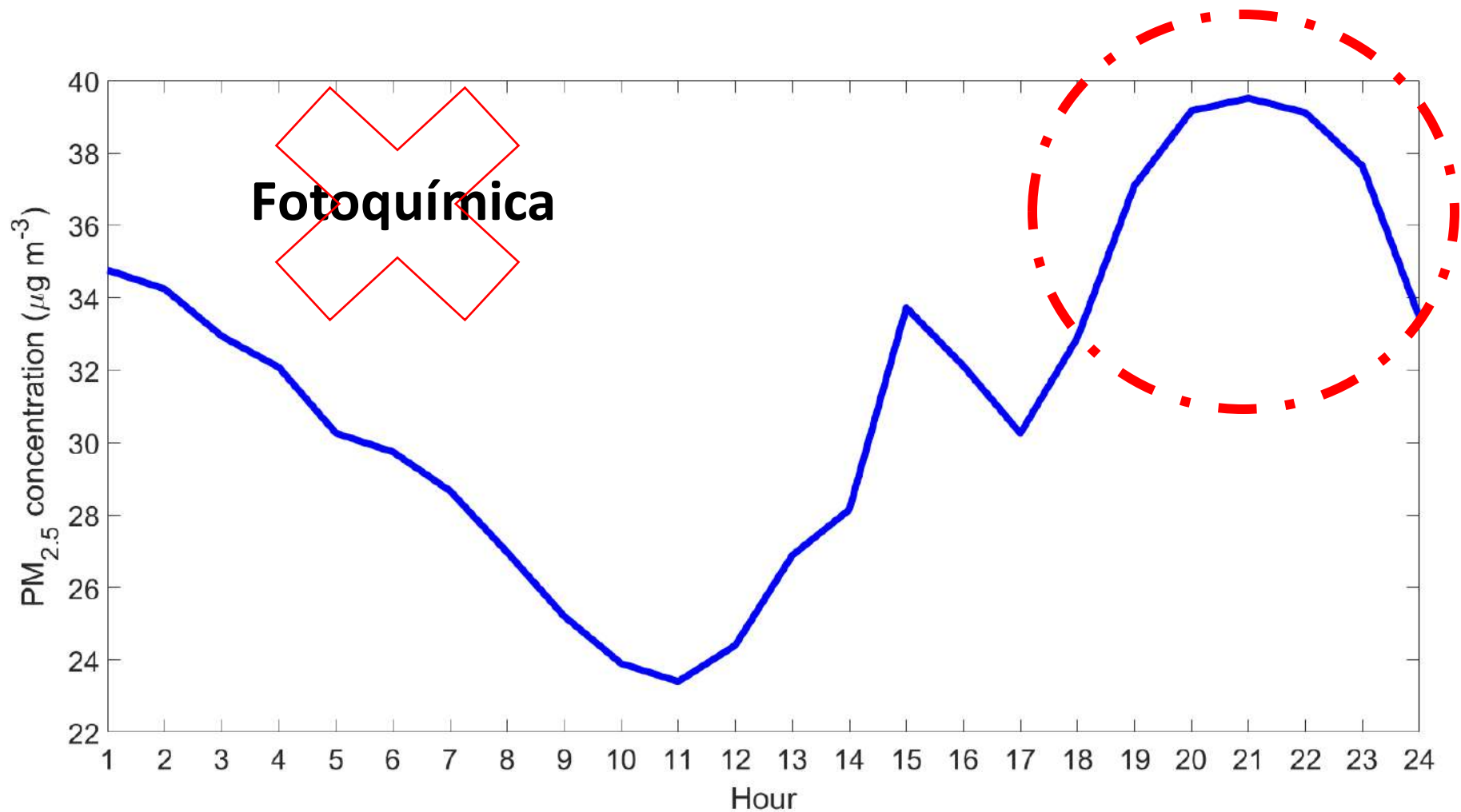
Mapa 1. Áreas en actividad agropecuaria



https://caracol.com.co/radio/2018/06/22/nacional/1529618547_873138.html

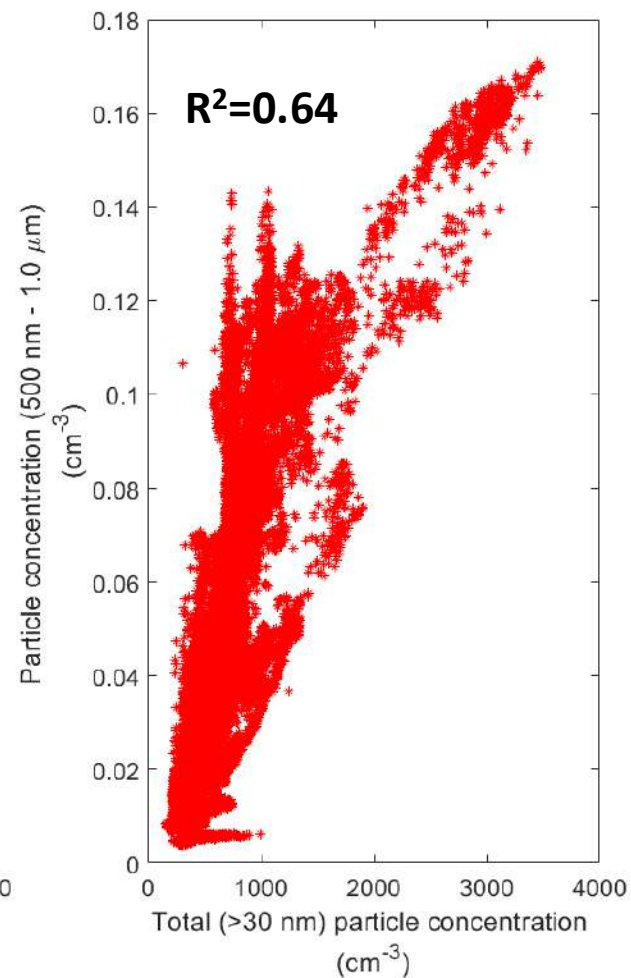
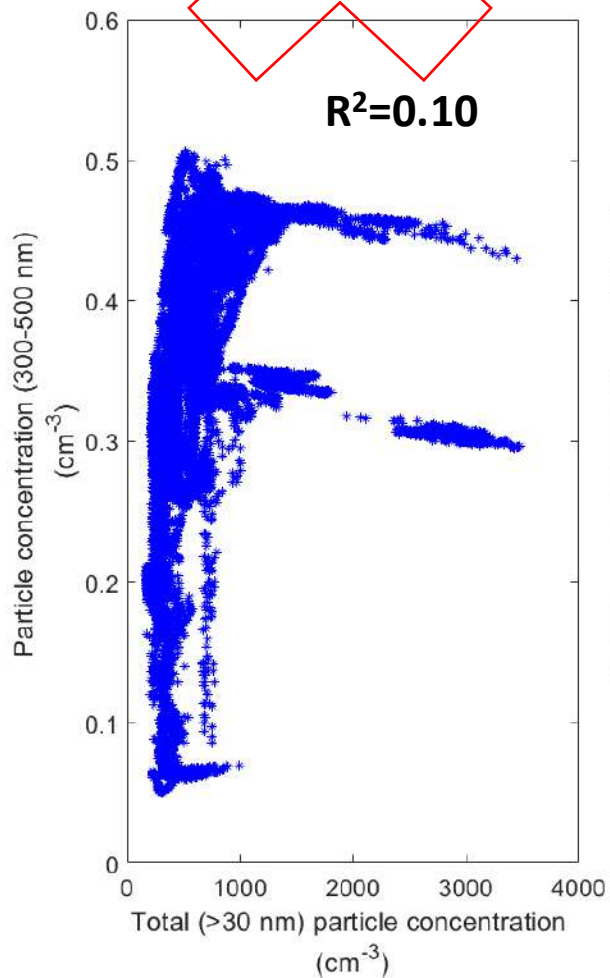
Tamaño de partícula vs. fuente



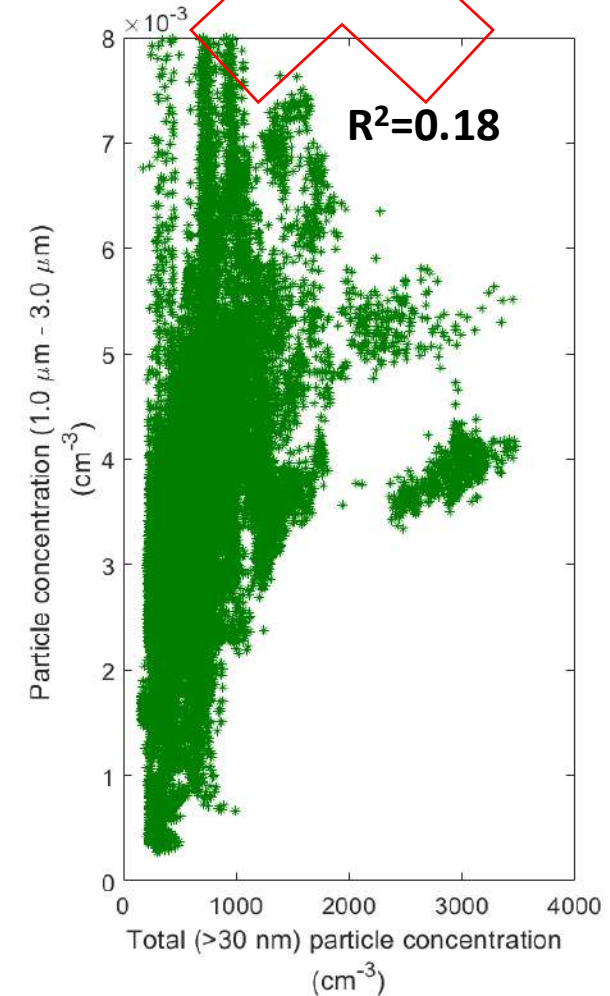


El perfil diario promedio de $PM_{2.5}$ indica que la mayor concentración de partículas se observa en horas de la noche

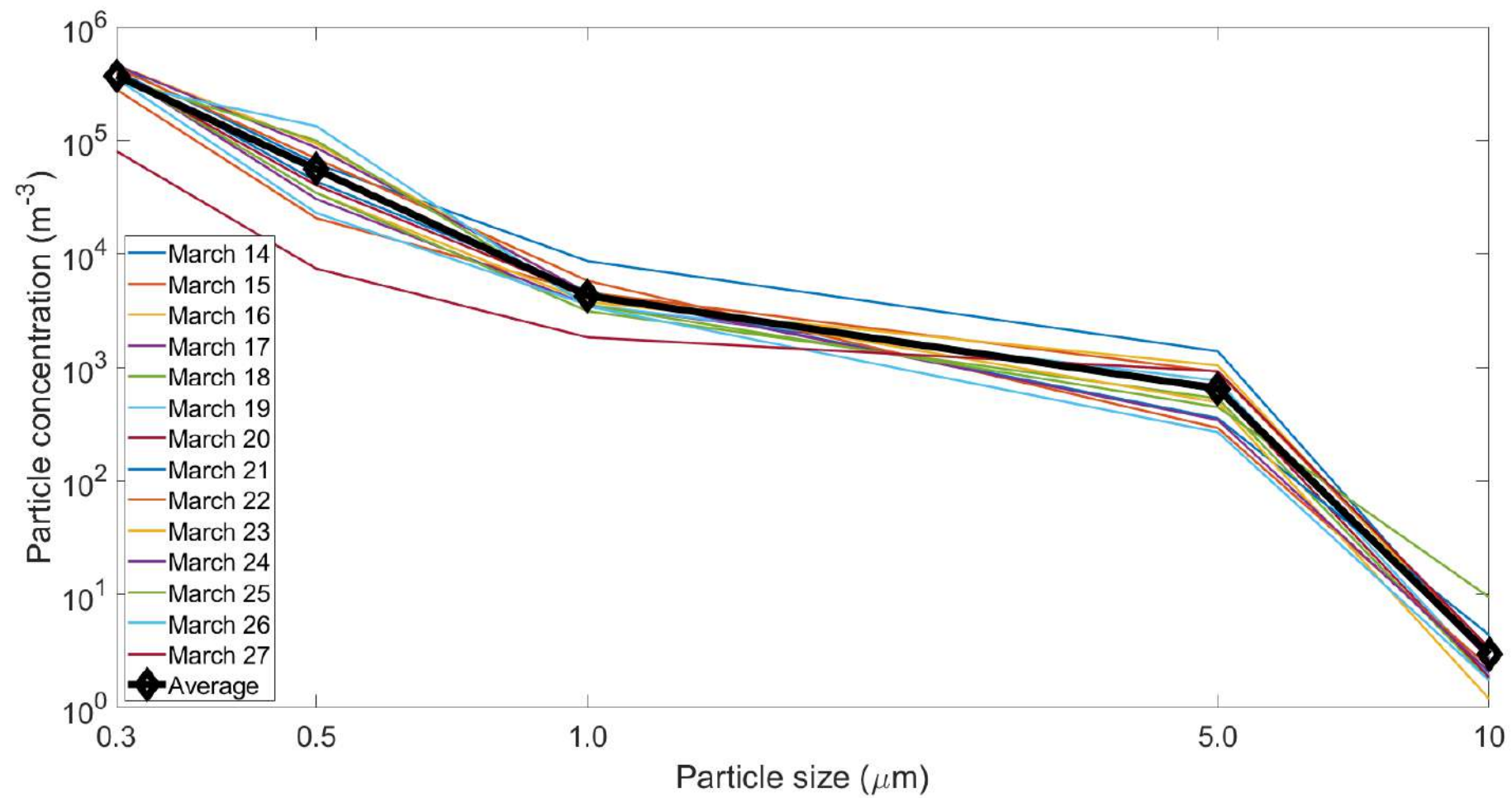
Gas-to-particle?



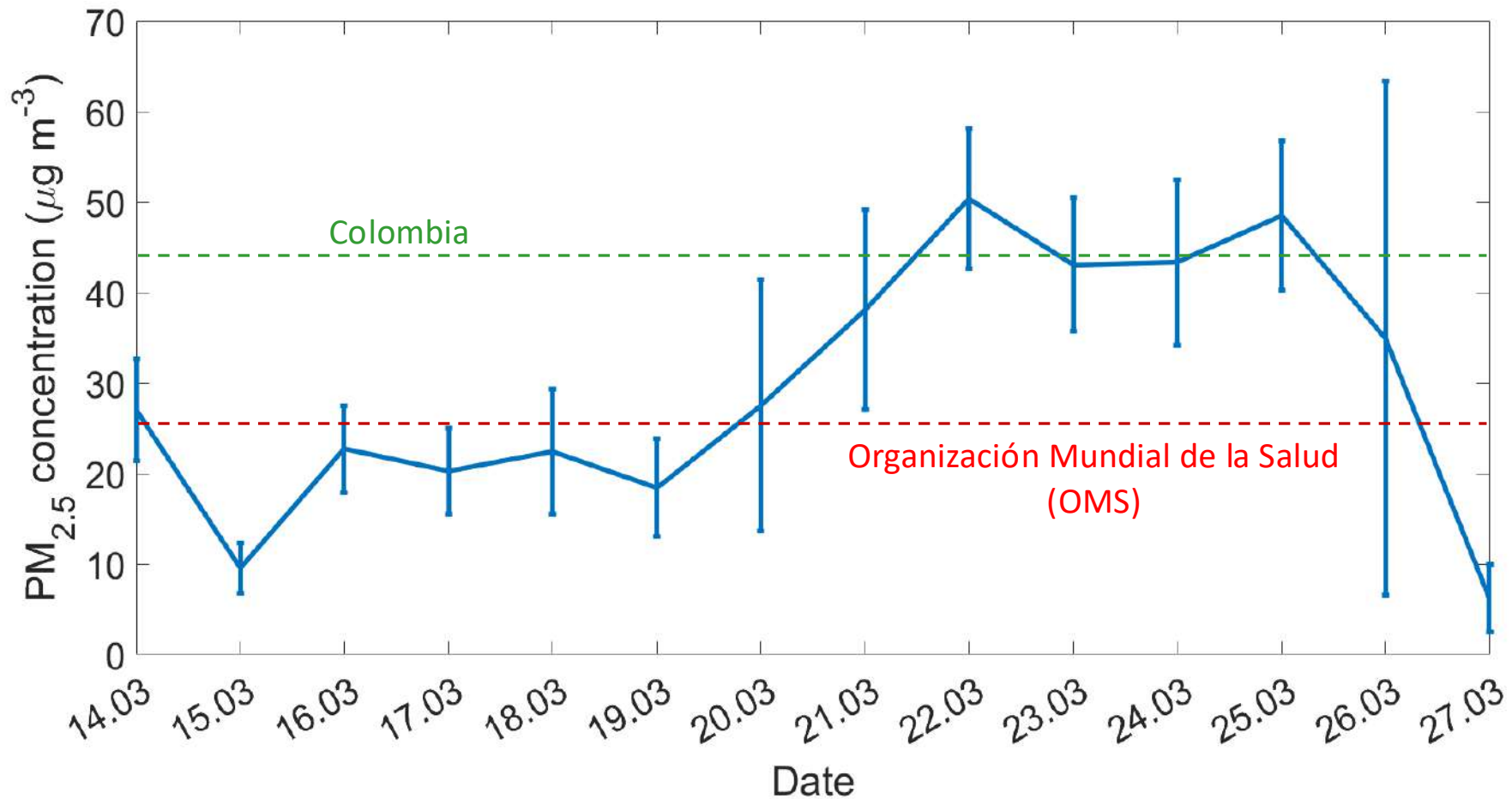
Polvo o biopartículas



Nuestros datos indican que las partículas que deterioran la calidad del aire tienen un tamaño entre 500 nm y 1.0 μm



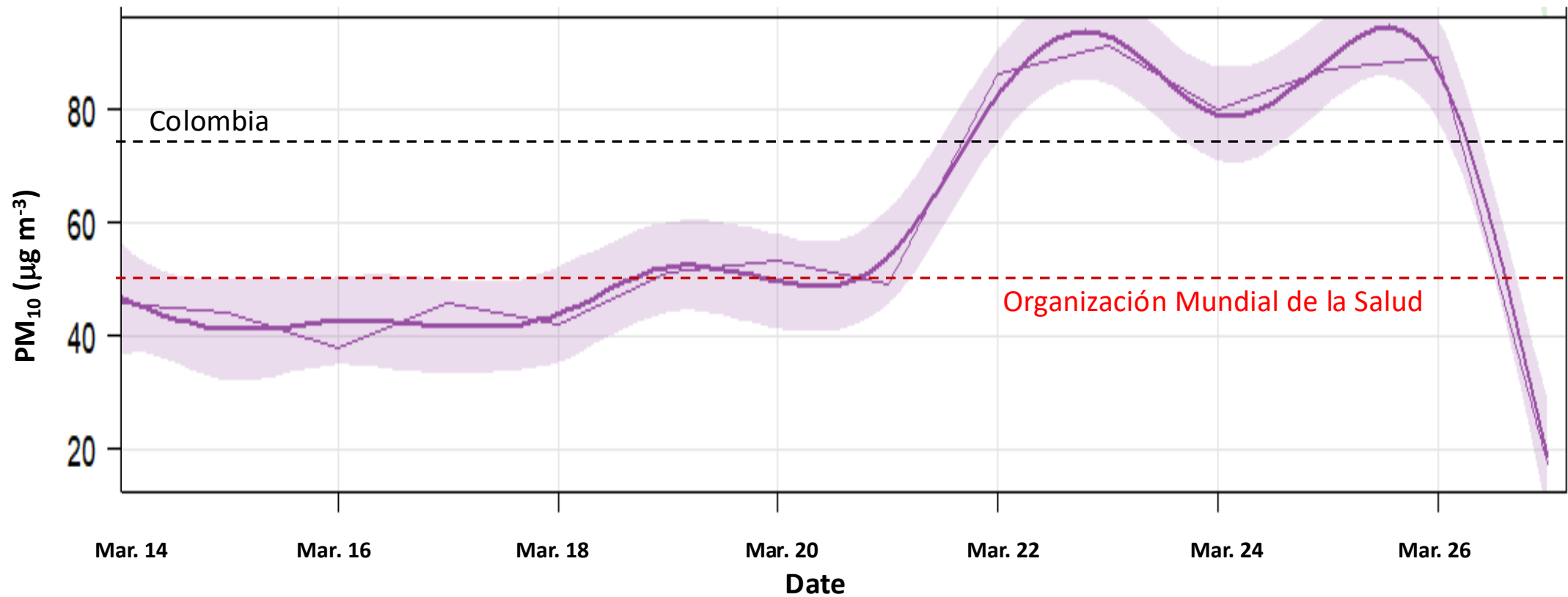
Resultados: Calidad del aire



El 22 y 25 de marzo se rebasó el valor límite permisible decretado por el gobierno Colombiano.

Del 20 al 26 de Marzo se rebasó la norma de la OMS.

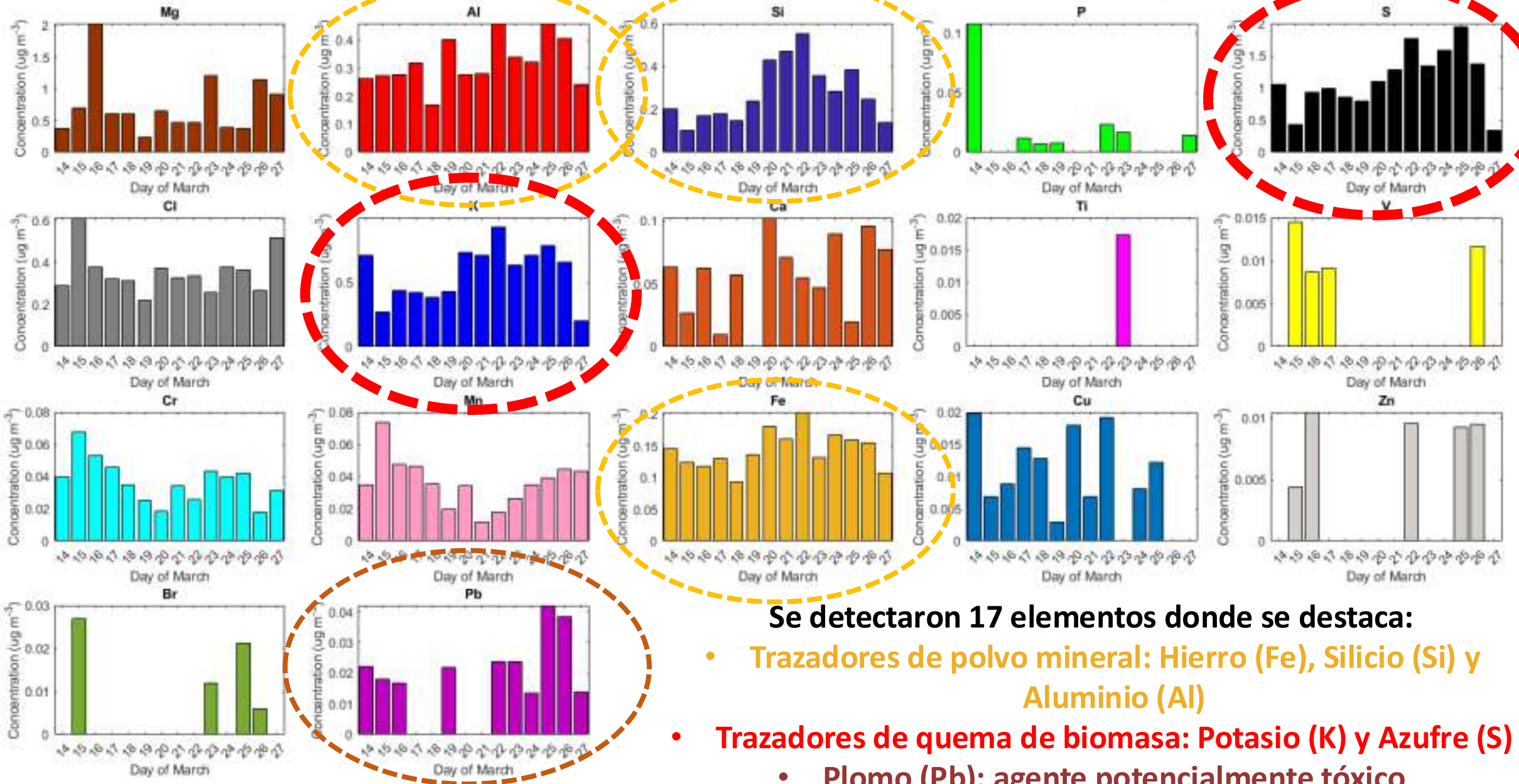
Resultados: Calidad del aire



Al igual que las PM_{2.5}, la segunda mitad de la campaña (entre el 21 y el 26 de marzo) se reportaron altos nivel de PM₁₀.

Del 21 y el 26 de marzo se rebasó el valor límite permisible decretado por Colombia y la OMS.

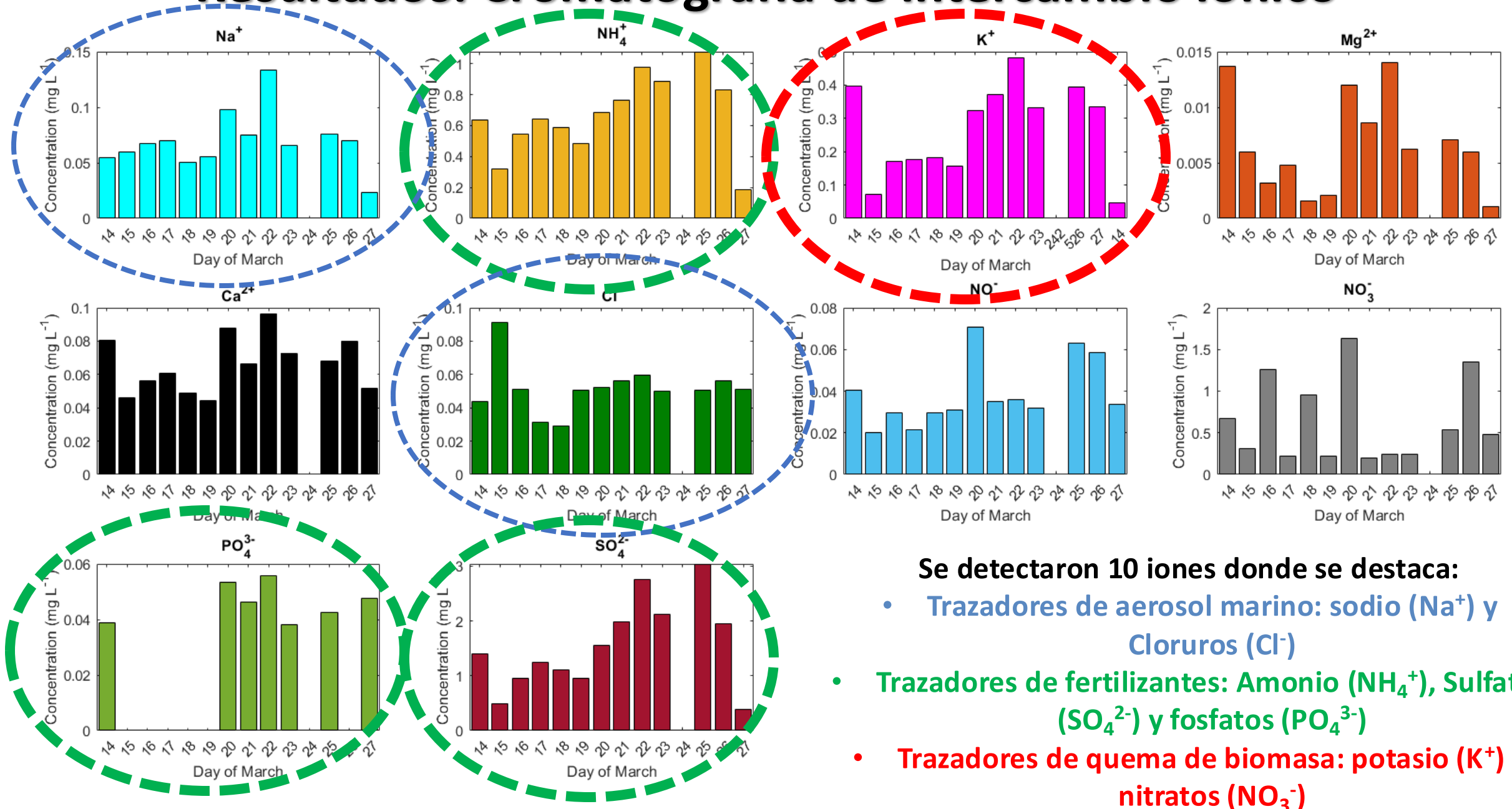
Resultados: Fluorescencia de rayos X



Se detectaron 17 elementos donde se destaca:

- Trazadores de polvo mineral: Hierro (Fe), Silicio (Si) y Aluminio (Al)
- Trazadores de quema de biomasa: Potasio (K) y Azufre (S)
 - Plomo (Pb): agente potencialmente tóxico

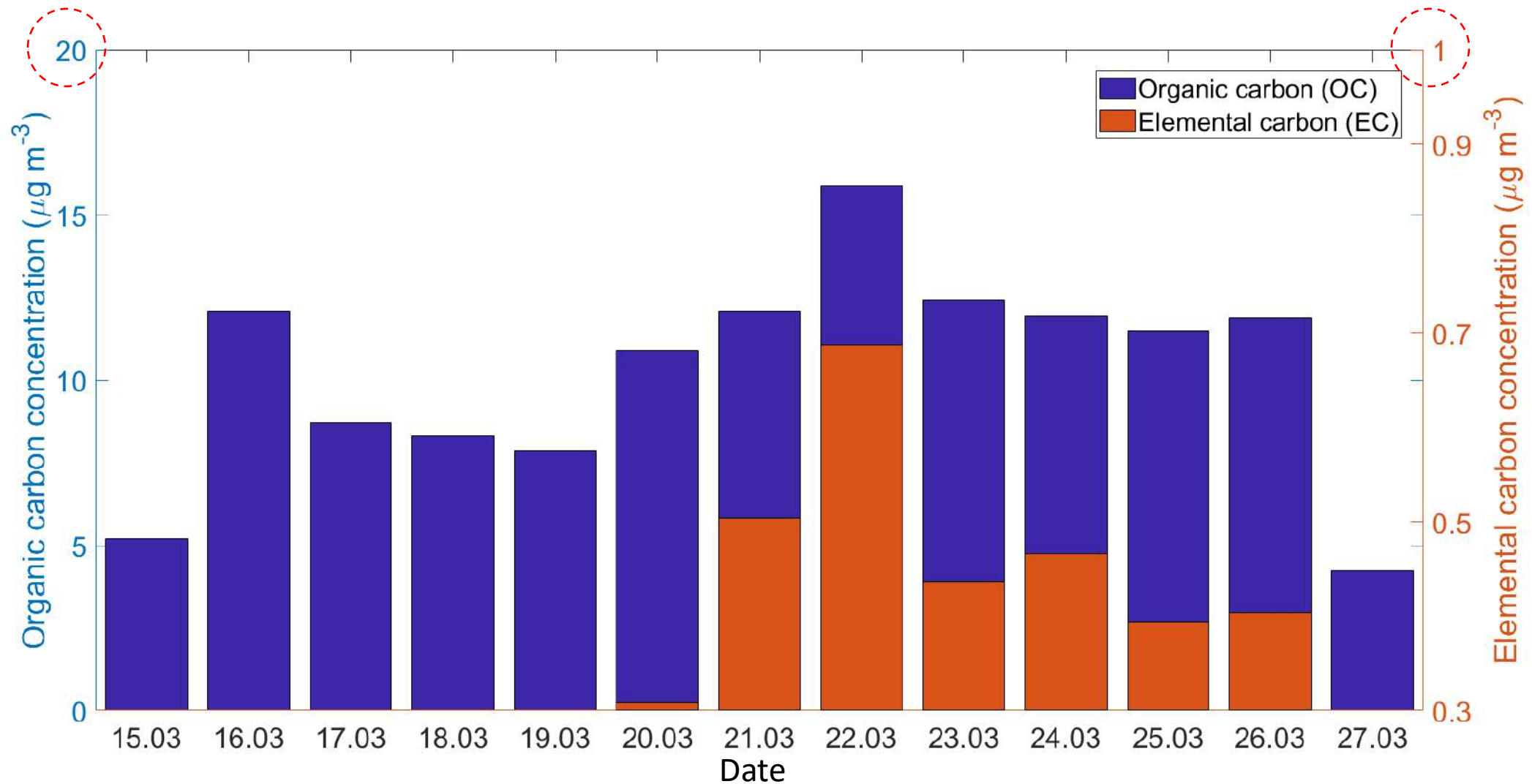
Resultados: Cromatografía de intercambio iónico



Se detectaron 10 iones donde se destaca:

- Trazadores de aerosol marino: sodio (Na⁺) y Cloruros (Cl⁻)
- Trazadores de fertilizantes: Amonio (NH₄⁺), Sulfatos (SO₄²⁻) y fosfatos (PO₄³⁻)
- Trazadores de quema de biomasa: potasio (K⁺) y nitratos (NO₃⁻)

Resultados: Contenido de Carbono

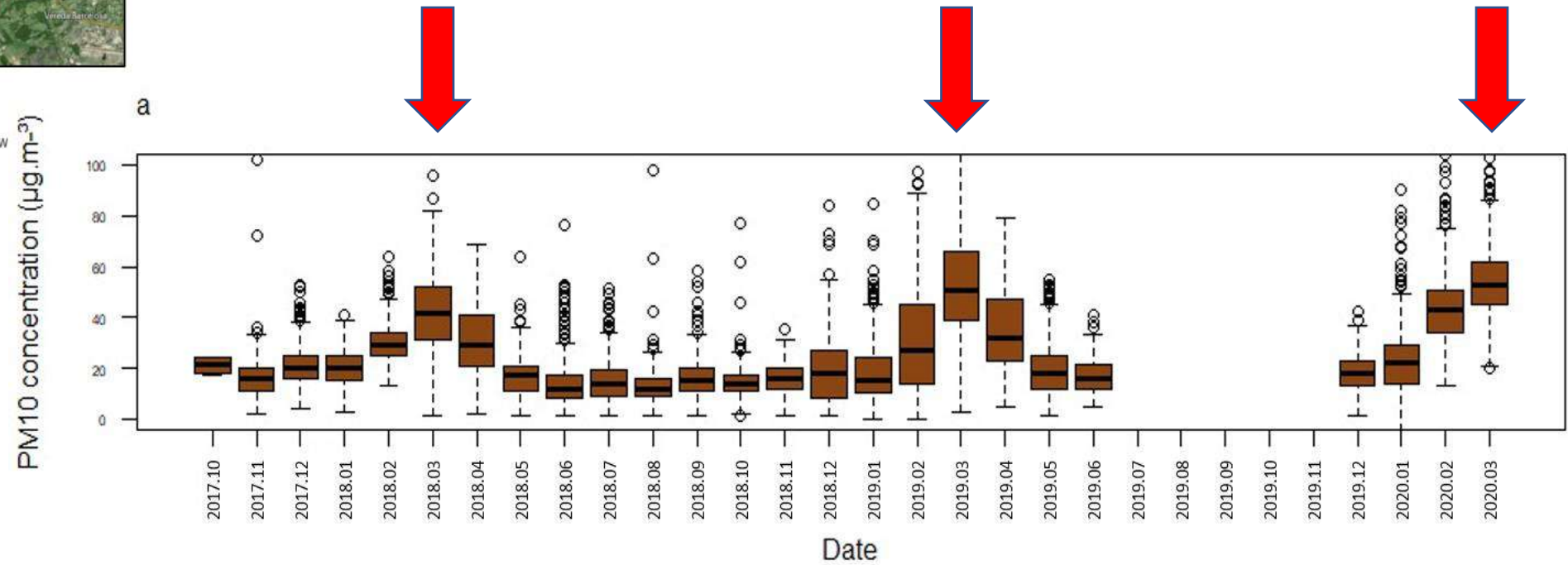
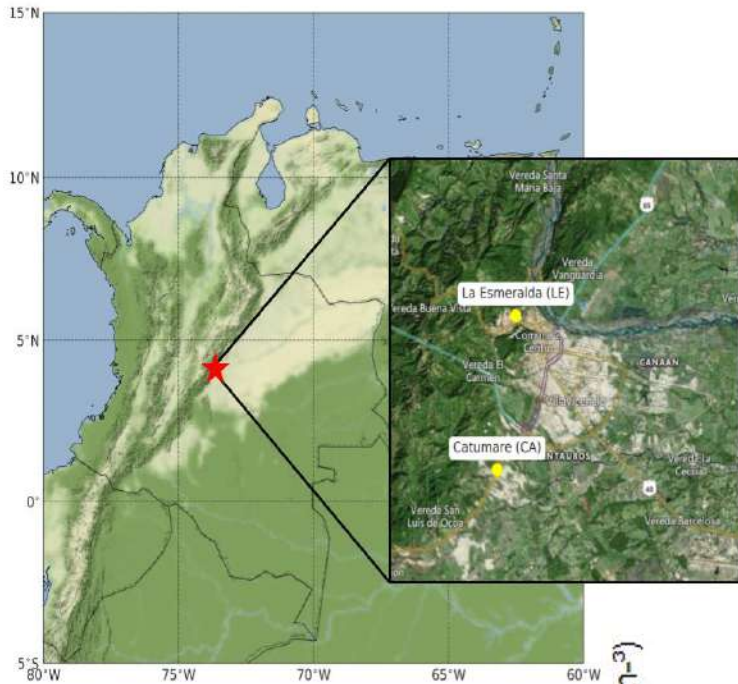


Si bien se detectó carbono elemental (EC), el carbono orgánico (OC) representa > 96% del carbono total

Del **análisis químico** se puede inferir que **la fuente** principal de los altos niveles de contaminación es la **quema de biomasa**

Pero... ¿dónde se origina?

Calidad del aire en Villavicencio

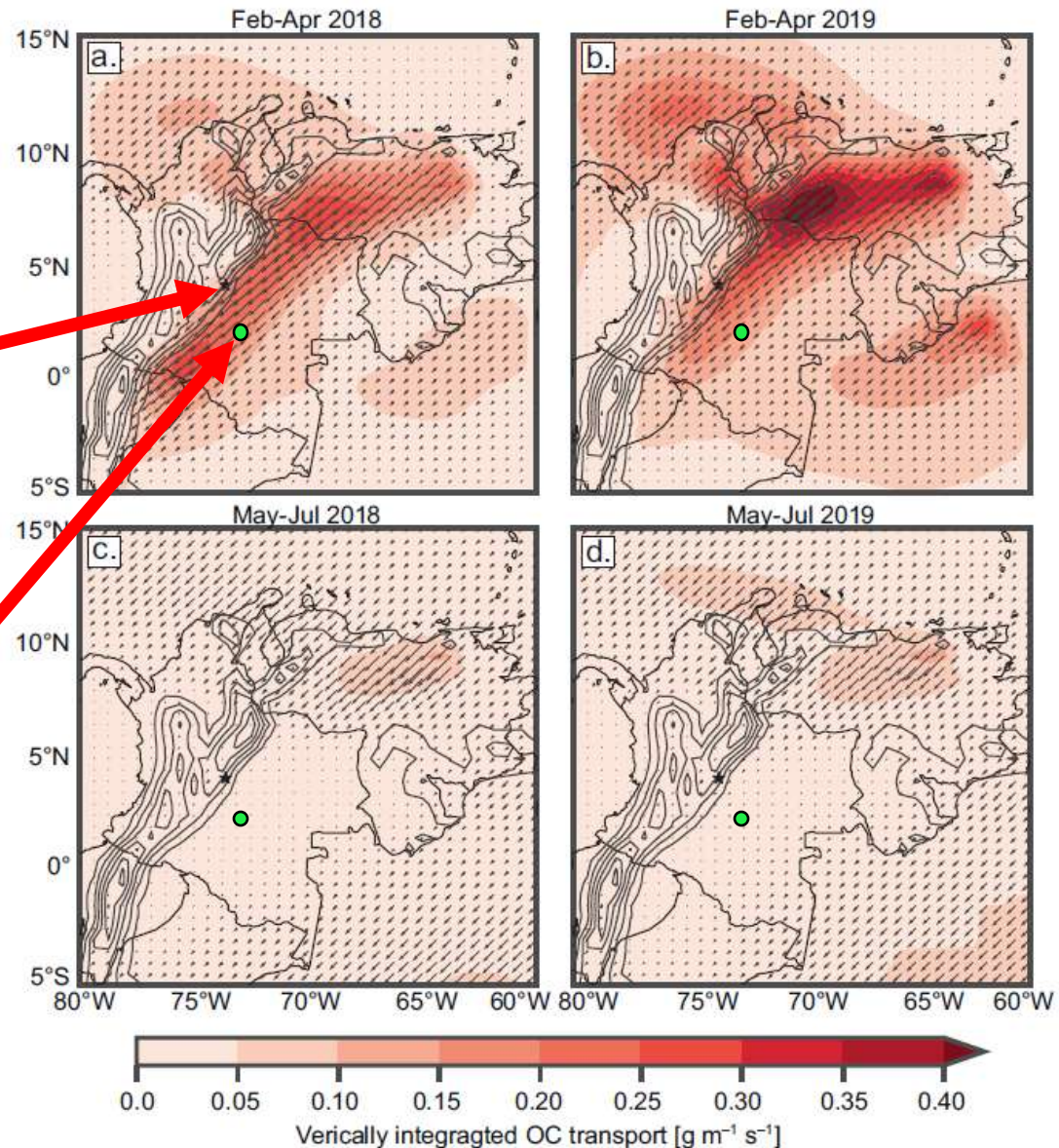


Se encontró que el mes de marzo reporta los niveles más altos de PM₁₀ (y ozono)

Calidad del aire en Villavicencio

Los **altos niveles de contaminación** que se midieron en Villavicencio cada **Marzo**, se deben a la combinación de los **incendios forestales (BB)** de Venezuela y Colombia con el **Chorro del Orinoco (OLLJ)**

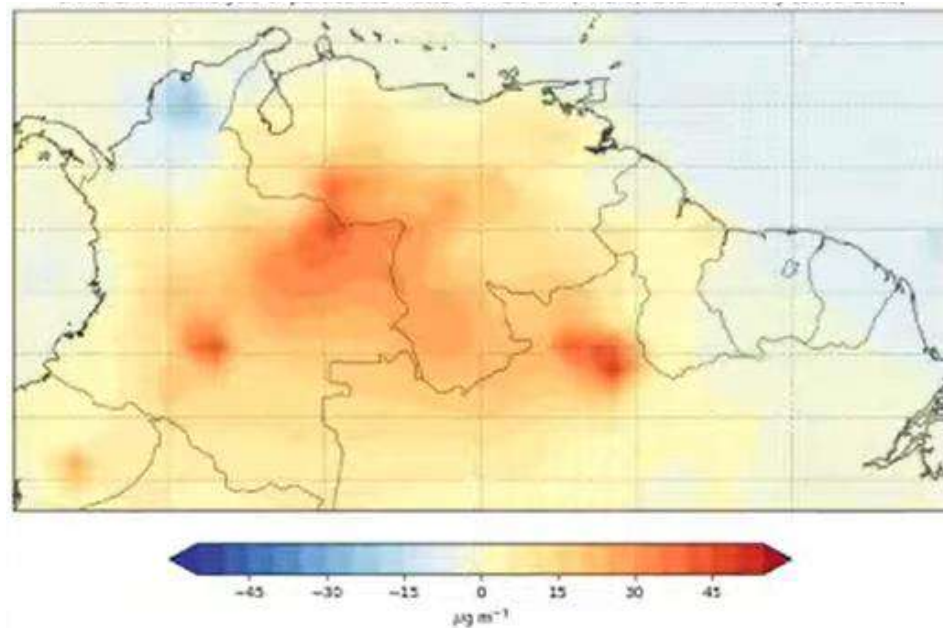
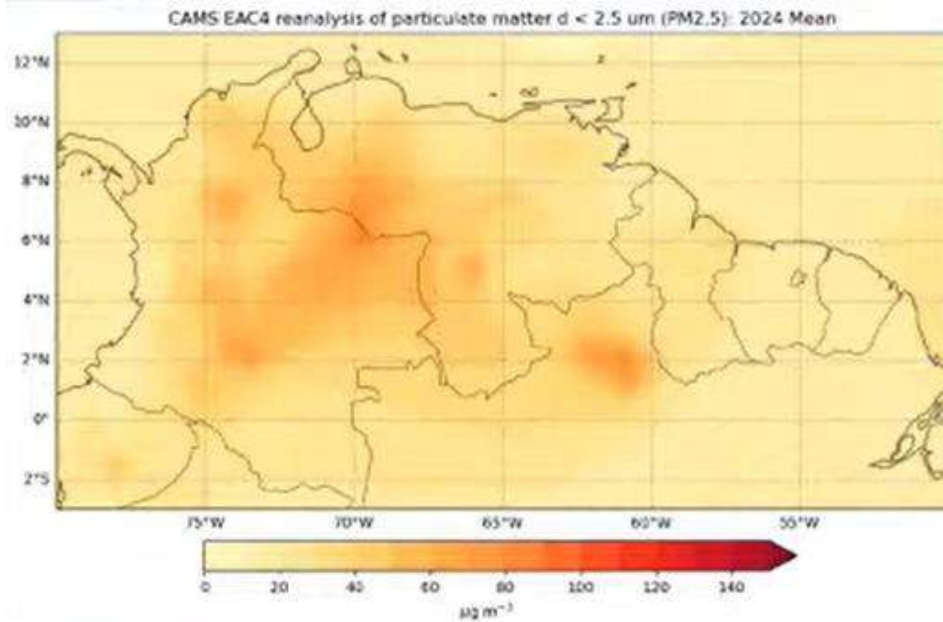
¿Puede la BB + OLLJ impactar el noroeste del Amazonas?



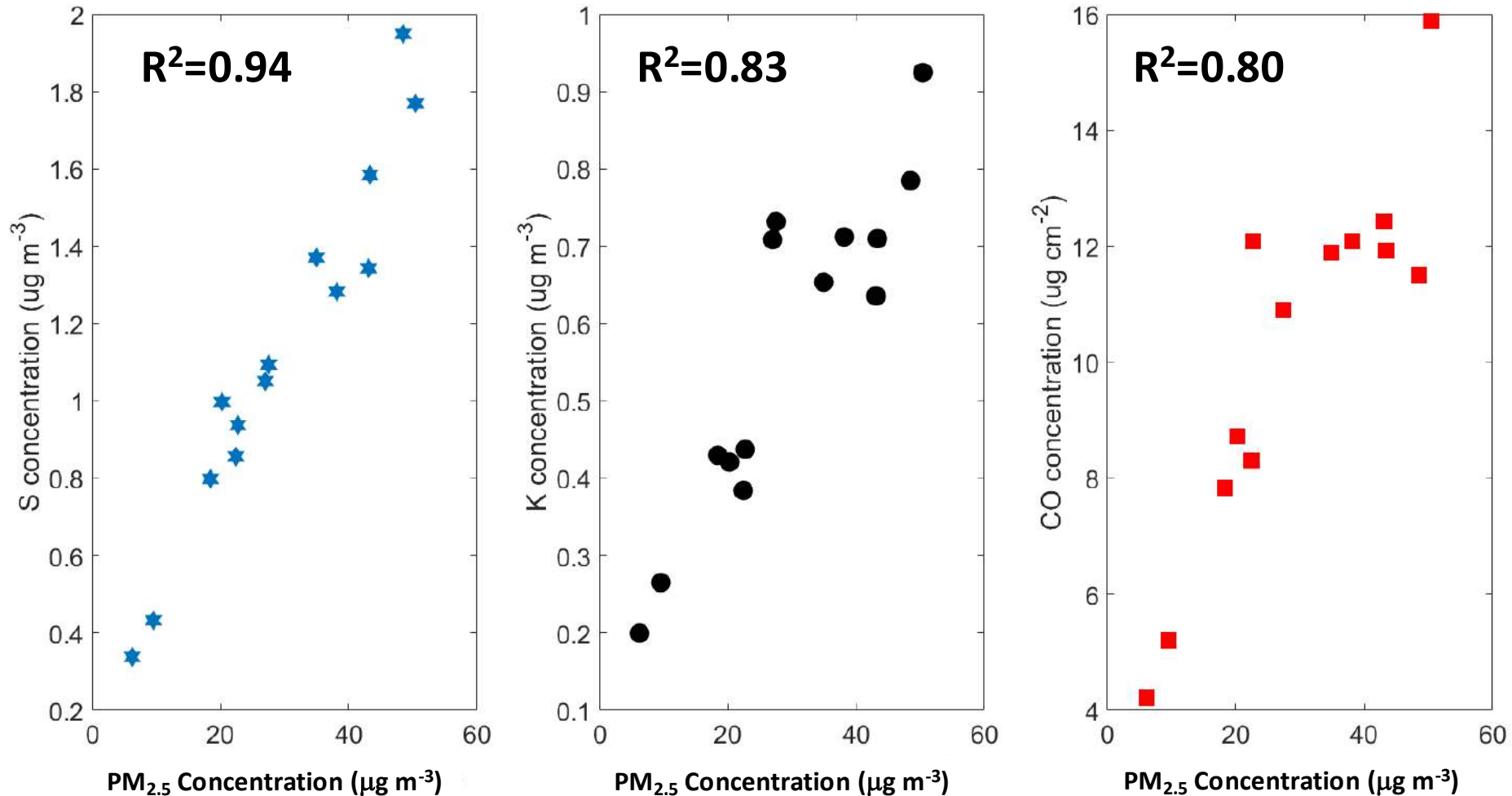
Fuente de contaminación

Los datos de reanálisis (CAMS) muestran una gran concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en marzo de 2024 a lo largo de la cuenca del Río Orinoco, llegando hasta el Noroeste del Amazonas.

Si bien cerca de El Trueno se presentaron incendios, la gran mayoría se concentraban en las llanuras Colombianas y Venezolanas, impactando regiones muy lejanas a su punto de emisión.

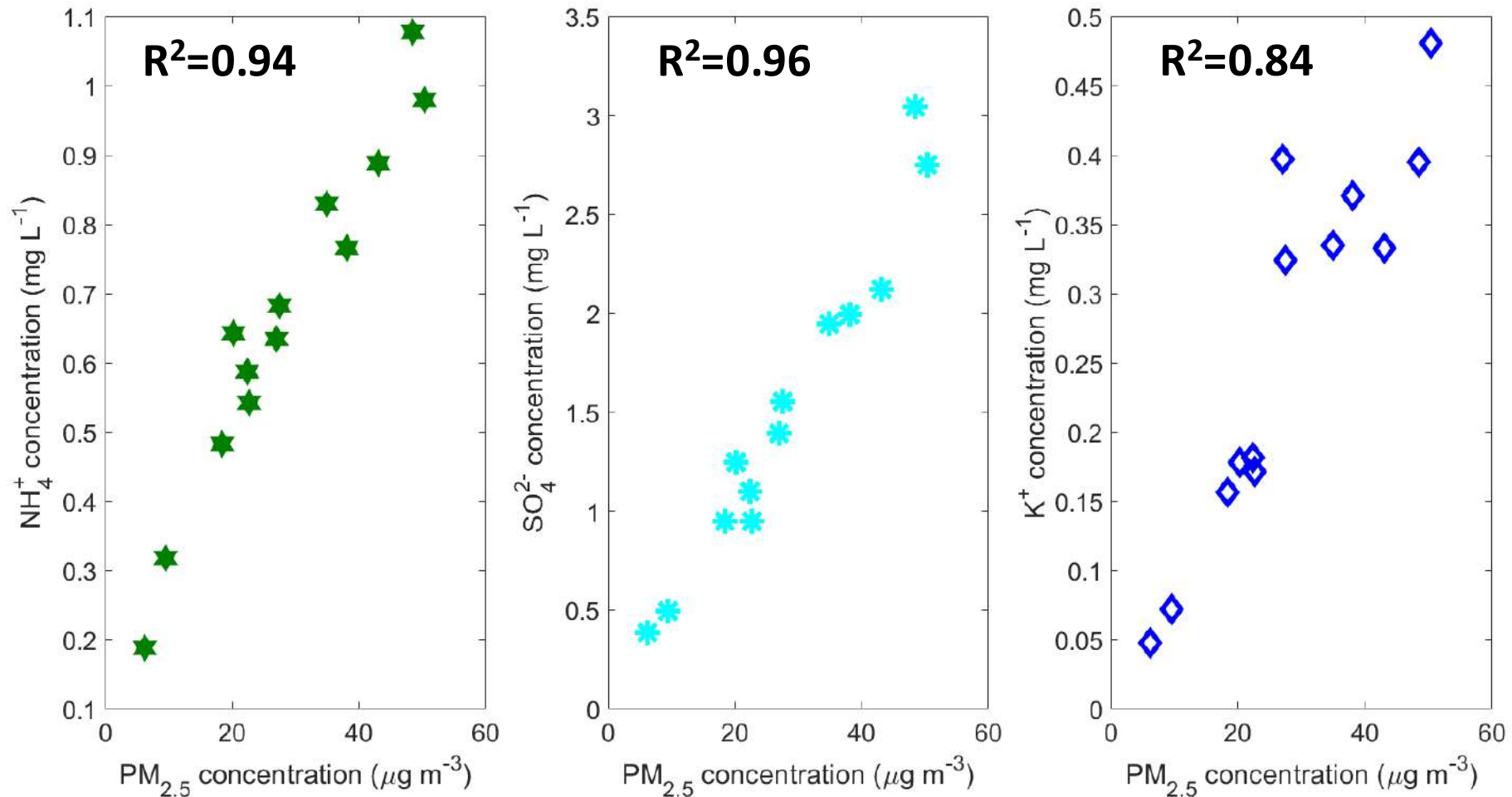


Fuente de contaminación

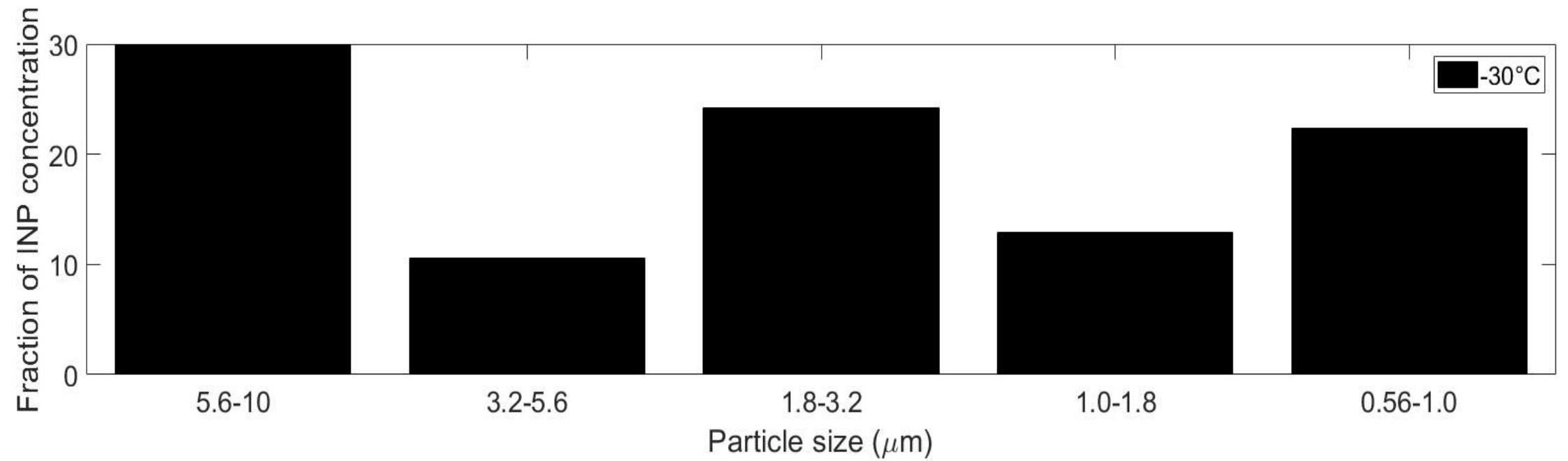
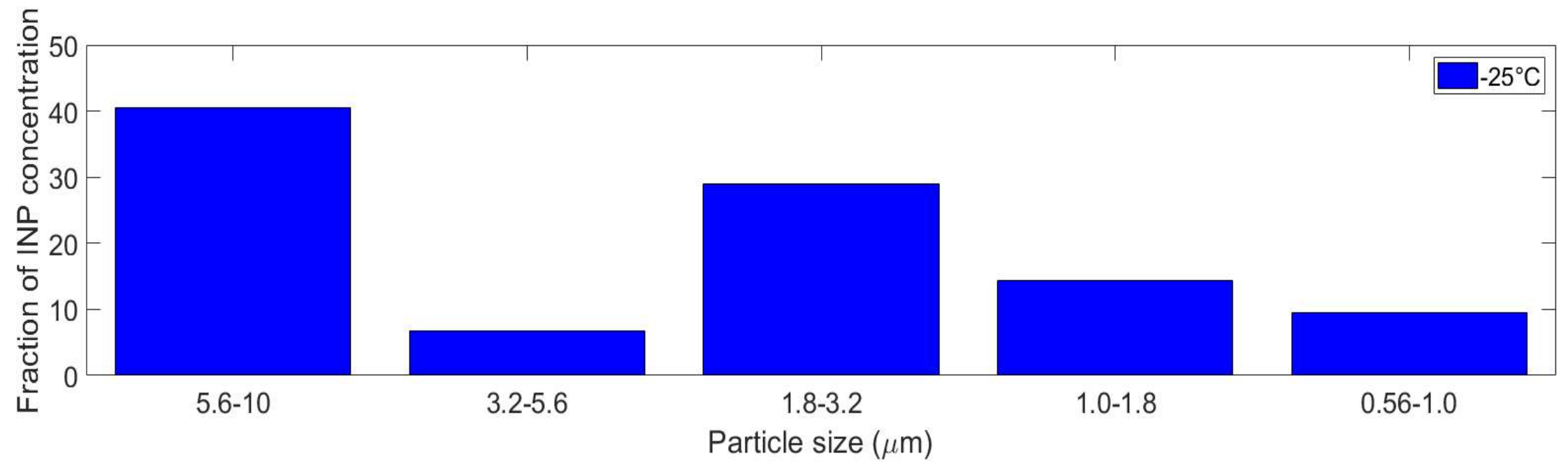


Se encontraron altas correlaciones de los niveles de $PM_{2.5}$ con la concentración de azufre, potasio y carbono orgánico

Fuente de contaminación



También se encontraron altas correlaciones de los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ con la concentración de los iones amonio, sulfato y potasio



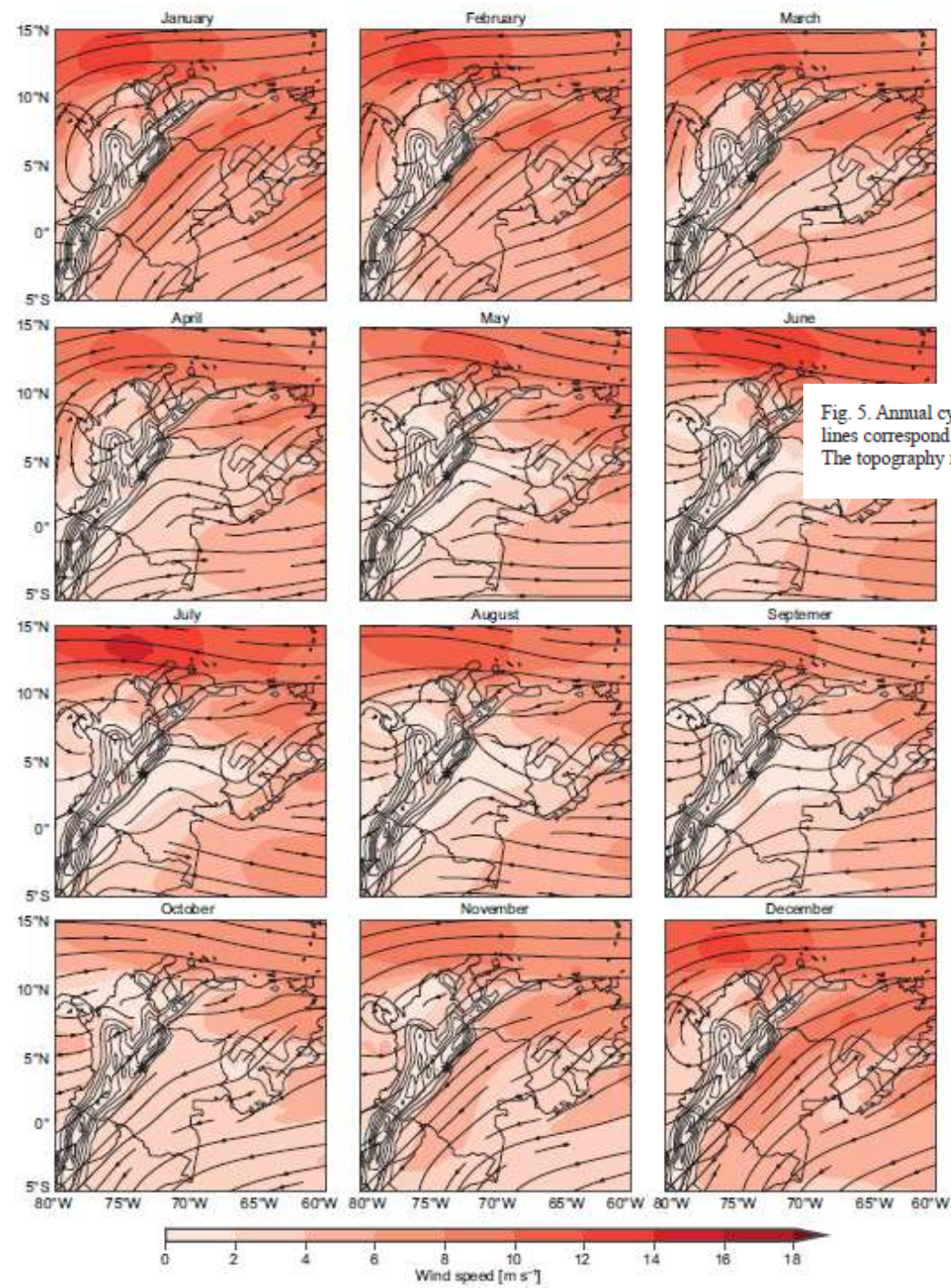


Fig. 5. Annual cycle of mean monthly winds in the layer between 950-800 hPa for the period 1980-2019. The lines correspond to streamlines pointing as the wind direction, and color contours correspond to wind speed. The topography is shown for reference as closed contours. Data from MERRA-2.

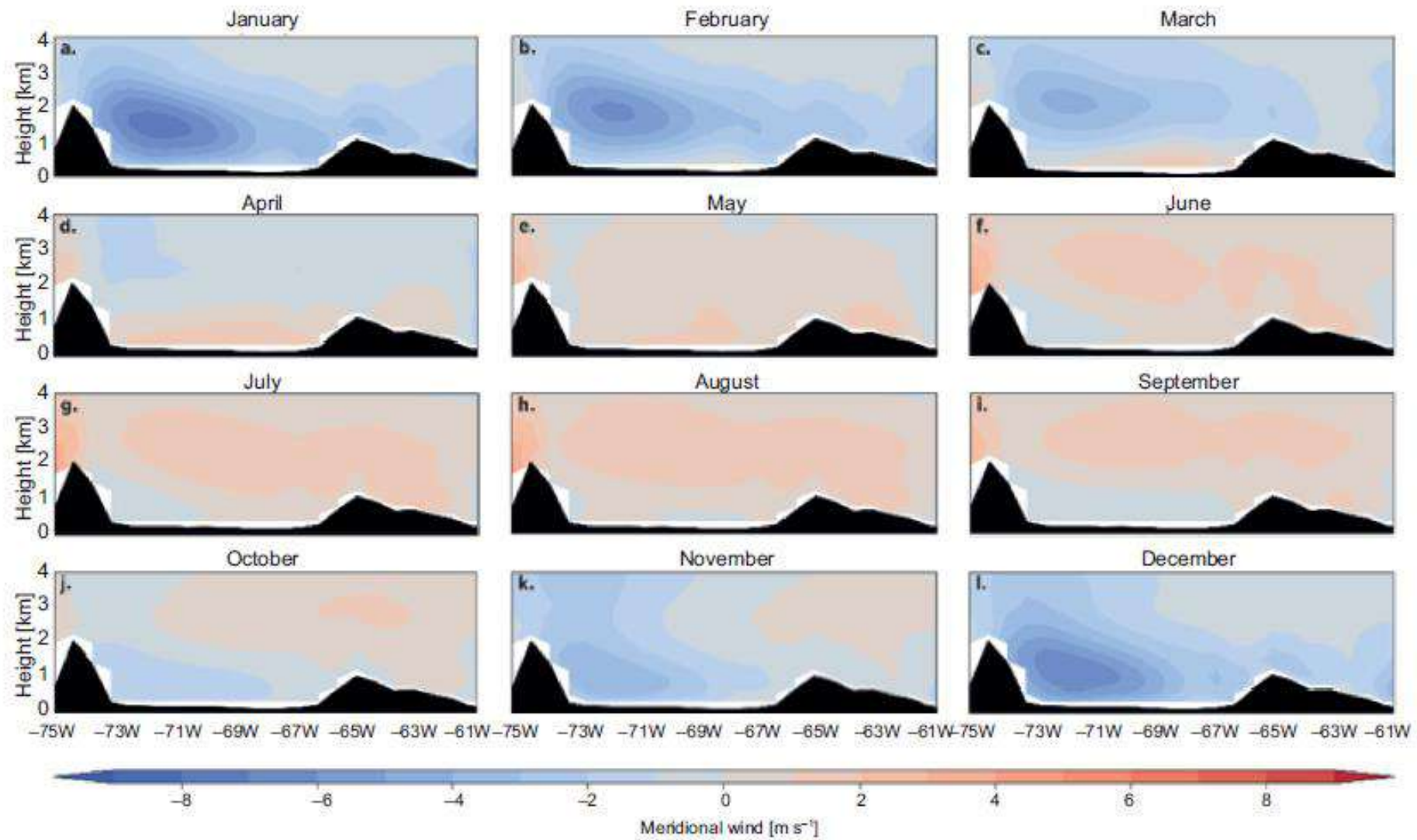


Fig. S4: Vertical Orinoco low level jet climatology.