

# Tecnologías basadas en microsensores para estudios de calidad del aire

Michel Grutter\*<sup>1</sup>, Armando Retama<sup>1</sup>, Olivia Rivera<sup>2</sup>, Jaime Contreras<sup>1</sup>, Omar López<sup>1</sup>, Sandra Porras<sup>1</sup>, Thania Arredondo<sup>1</sup>, Eugenia González del Castillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

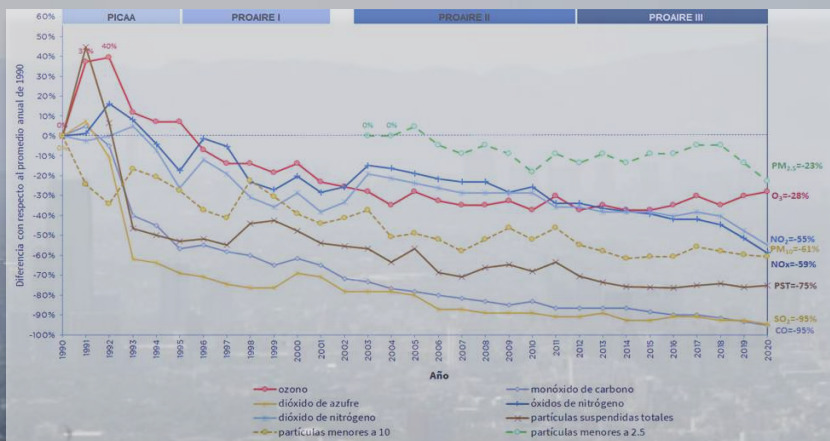
<sup>2</sup> Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA – CDMX)



\* grutter@unam.mx

## Objetivos

- Evaluar el desempeño de tecnologías basadas en microsensores para el monitoreo de la calidad del aire en las condiciones ambientales de la Ciudad de México
- Obtener información cuantitativa sobre algunas métricas de desempeño para dispositivos de bajo costo
- Desarrollar un protocolo de evaluación siguiendo las mejores prácticas que pueda emplearse o mejorarse en ejercicios posteriores



## Proyecto SECTEI/190/2021

EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE



GOBIERNO DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO

SECRETARÍA DEL  
MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN,  
CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

**Componente 1:** Ejercicio de evaluación de un conjunto de dispositivos comerciales basados en microsensores contra equipos de referencia, en dos sitios de la Ciudad de México con características meteorológicas y ambientales diferentes.

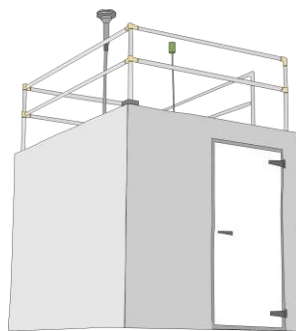
**Componente 2:** Instalación de una red de monitoreo utilizando dispositivos de microsensores y documentar la experiencia con el propósito de desarrollar una metodología para el despliegue de redes de monitoreo basadas en dispositivos de bajo costo.



## Equipos de referencia

### Ventajas

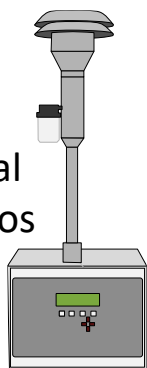
- Datos confiables
- Estabilidad
- Útiles para el seguimiento en la implementación de políticas públicas
- Alertar la población
- Métodos con reconocimiento para realización de investigaciones específicas



US\$ 110,000

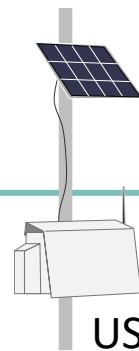
### Desventajas

- Altos costos
- Sitios limitados de medición
- Poca representatividad espacial
- Limitado número de parámetros
- Requieren certificación

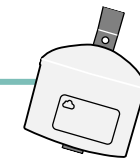


US\$ 5,000

## Algunos tipos de microsensores

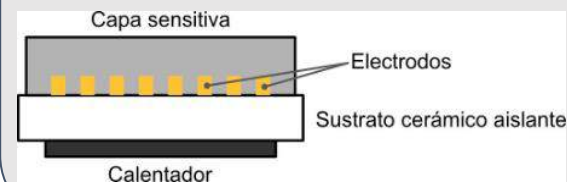


US\$ 15,000

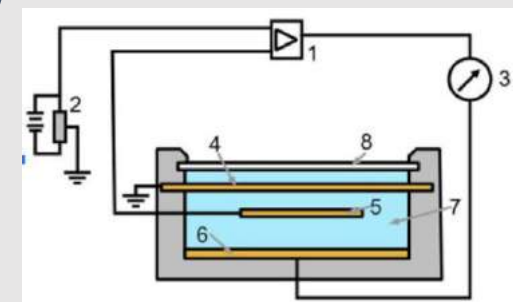


US\$ 250

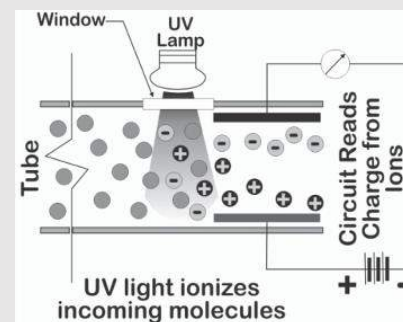
### Sensores de óxidos metálicos



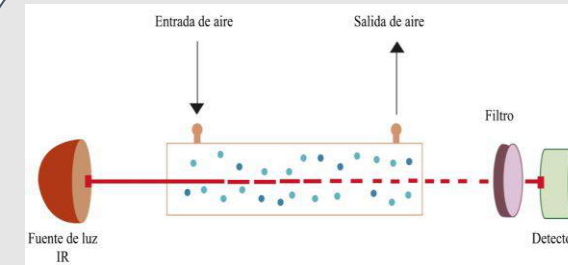
### Sensores Electroquímicos



### Detectores de fotoionización

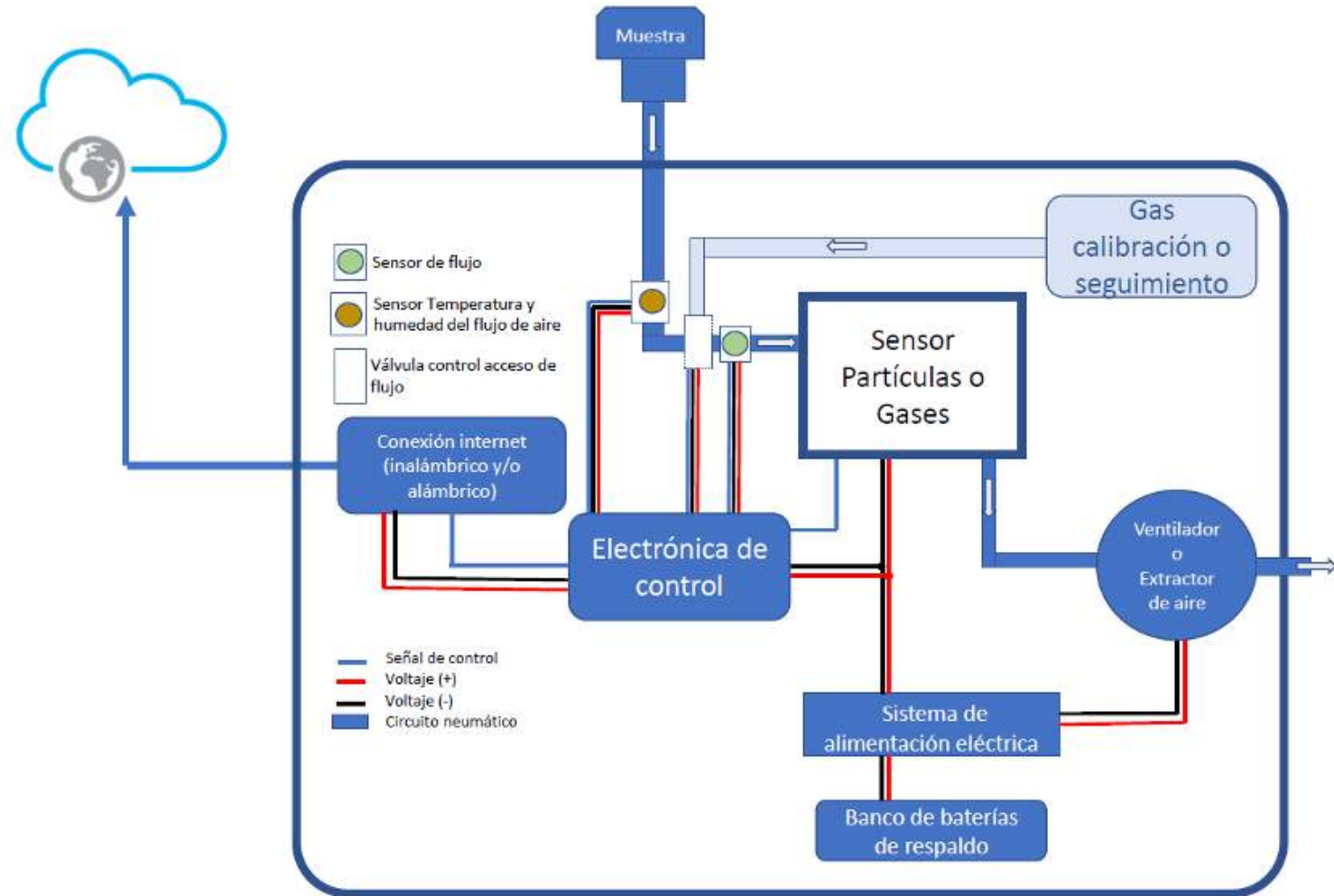


### Sensores Ópticos



## Integración de los sistemas de microsensores S $\mu$ S

- Tratamiento de señal
- Registro
- Almacenamiento
- Transmisión de datos
- QC/QA



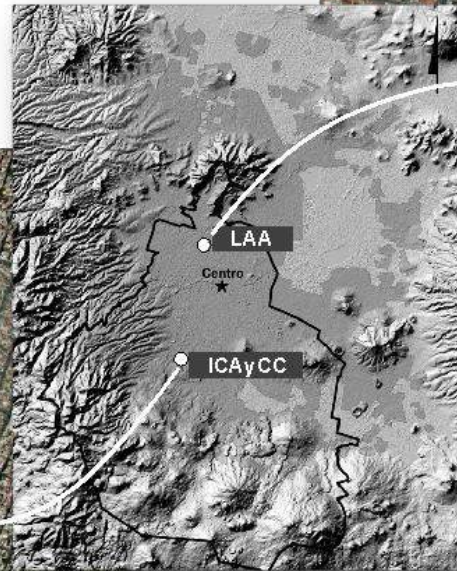


# Componente 1. Evaluación de dispositivos de microsensores

## Norte

Vallejo, laboratorio LAA del SIMAT

Lat: 19°29'01"N, long: 99°08'49"O, alt: 2245 msnm  
25 de marzo – 20 de mayo de 2022



## Sur

C. U., azotea del ICAyCC

Lat: 19°19'34", long: 99°10'34", alt: 2280 msnm  
23 de mayo – 1 de julio de 2022

## Proceso

- 1) Convocatoria
- 2) Registro de participantes
- 3) Recepción de equipos
- 4) Campañas de medición
- 5) Análisis de datos
- 6) Elaboración de informe



## Evaluación: los dispositivos

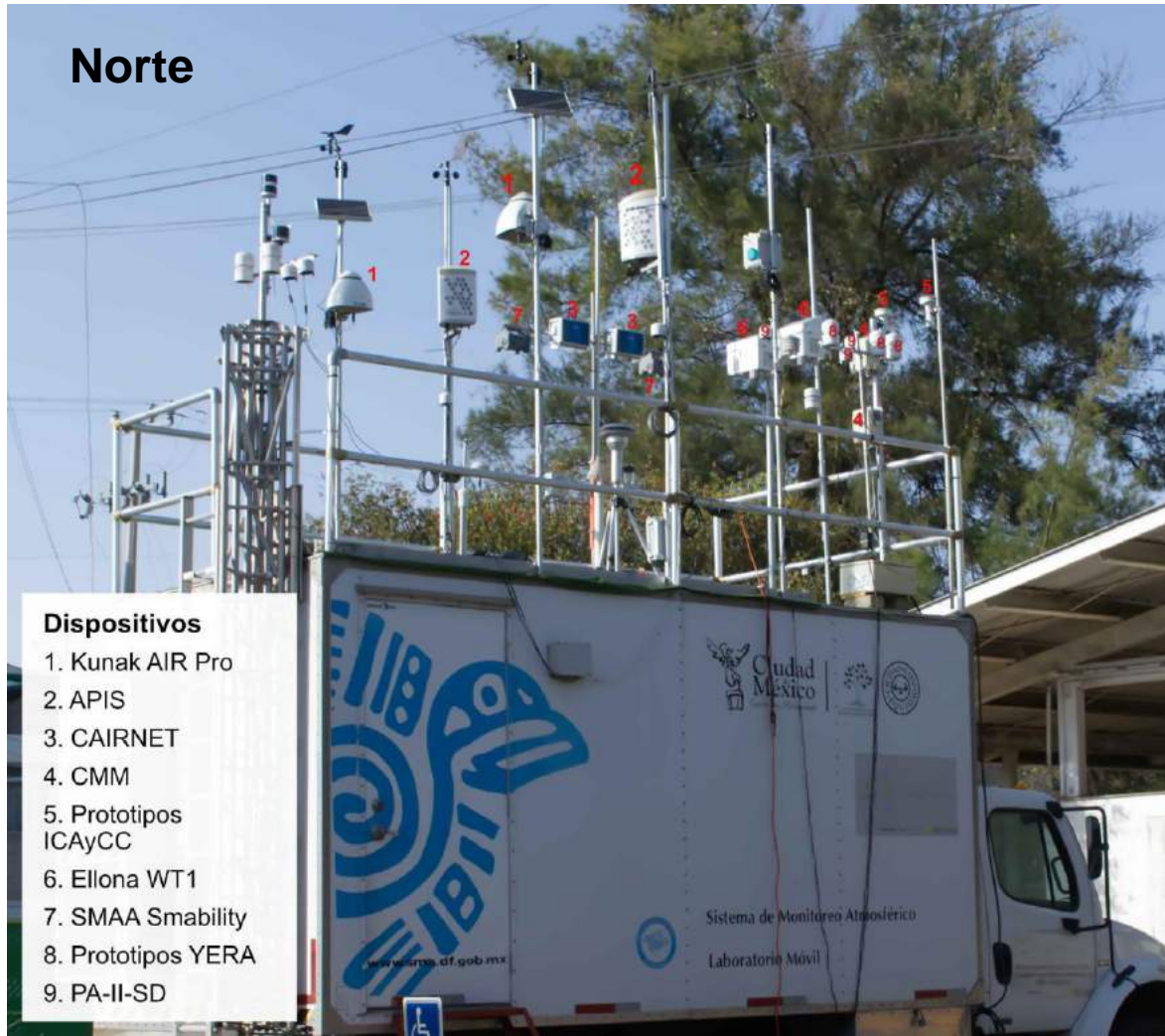
| Marca               | Modelo   | Configuración para contaminantes  |
|---------------------|----------|---|
| Ellona              | WT1      | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>                       |
| ENVEA               | Cairnet  | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>                       |
| Kunak               | Air Pro  | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> |
| Smability           | SMAA     | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub> , CO                                    |
| Tisch               | APIS     | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> |
| PurpleAir           | PA-II-SD | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub>  |
| Centro Mario Molina | CMM      | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub>                   |
| DIY - ICAyCC        | MPBU     | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , COV  |
| DIY - Particular    | YERA     | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> , O <sub>3</sub>   |





# Despliegue

## Norte



### Dispositivos

1. Kunak AIR Pro
2. APIS
3. CAIRNET
4. CMM
5. Prototipos ICAyCC
6. Ellona WT1
7. SMAA Smability
8. Prototipos YERA
9. PA-II-SD

## Sur



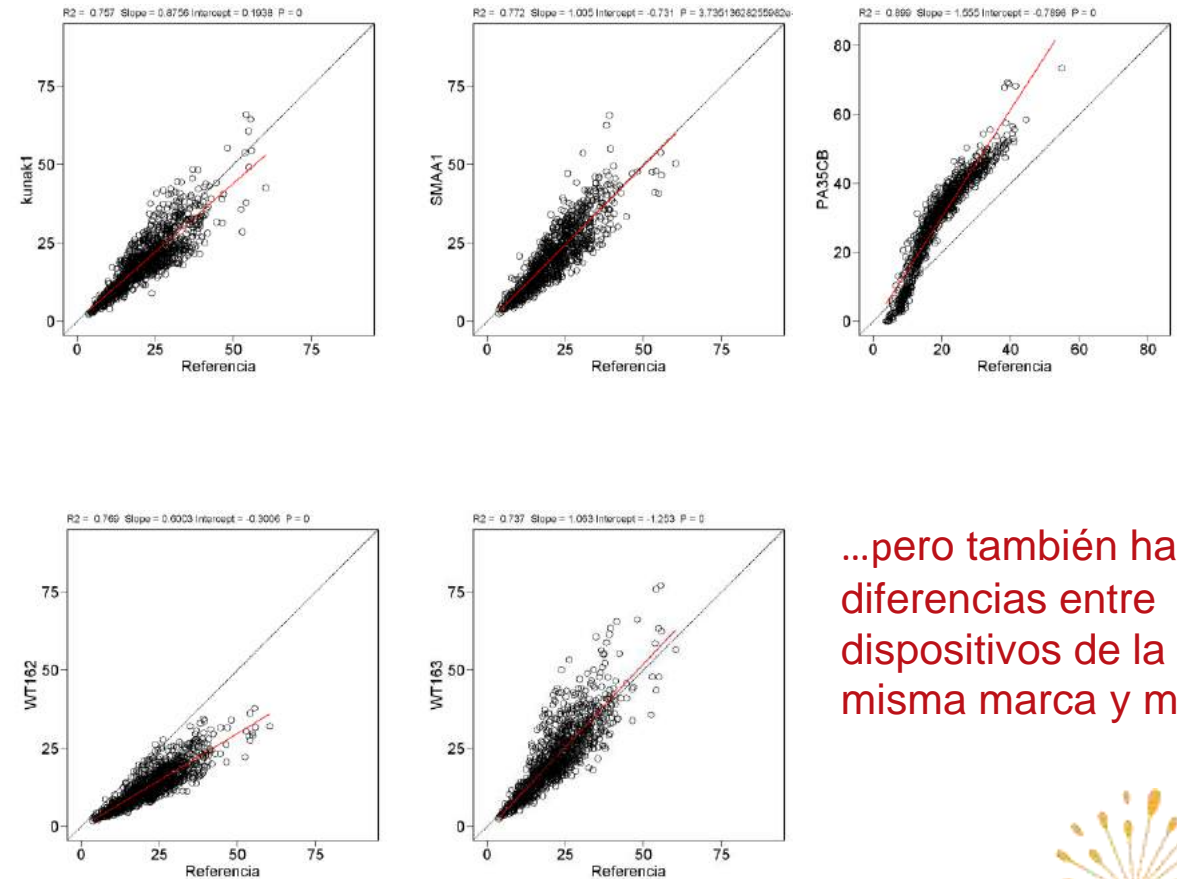
### Dispositivos

1. APIS APM01
2. CMM Airlab
3. Ellona WT1
4. ENVEA Cairnet
5. Kunak AIR Pro
6. PurpleAir
7. Smability SMAA
8. Prototipo MPBU
9. Prototipo YERA

## Análisis de datos

- Los datos se procesaron y analizaron siguiendo las recomendaciones de los documentos de la US EPA para la prueba básica (base test):
  - Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors.
  - Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Ozone Air Sensors
- Las **métricas** calculadas fueron:
  - Sesgo y linealidad ( $R^2$ , m, b), error (RMSE, NRMSE), precisión (desviación estándar y coeficiente de variación).
- Adicionalmente se estimaron los coeficientes de **correlación** (Spearman y de Kendall).
- Se evaluó el **efecto meteorológico** graficando los valores normalizados contra la temperatura y humedad relativa.

Encontramos diferencias en la respuesta entre dispositivos de distintas marcas (y diferente sensor)



...pero también hay diferencias entre dispositivos de la misma marca y modelo





# PM2.5

## Análisis de datos

### Información del evaluador

**Institución:** Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-UNAM, Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire-SEDEMA

**Ubicación del sitio de prueba:** Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México

Lat.: 19.326° Long.: -99.176° Altitud: 2290 m

### Información del dispositivo SMABILITY

**Marca y modelo:** SMABILITY modelo SMAA  
**Versión de firmware:** —

**Intervalo de muestreo:** 5 minutos

**Números de serie:** SMAA-1, SMAA-2

**Problemas identificados durante el despliegue:**

El dispositivo SMAA-2 presentó algunas intermitencias en la transmisión de datos.

### Información del equipo de referencia para PM<sub>2.5</sub>

**Marca y modelo:** Teledyne API modelo T-API640x  
**Número de serie:** 492

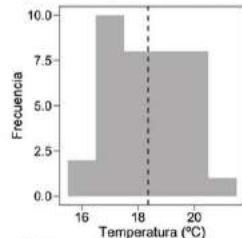
**Intervalo de muestreo:** 1 minuto

**Fecha de calibración:** 20 de enero de 2022

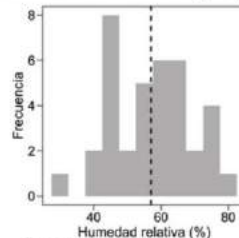
**Fecha de verificación del flujo:** 23 de mayo de 2022

**Observaciones:** La respuesta del equipo se ajustó contra un FRM.

### Temperatura y humedad ambientales durante el despliegue

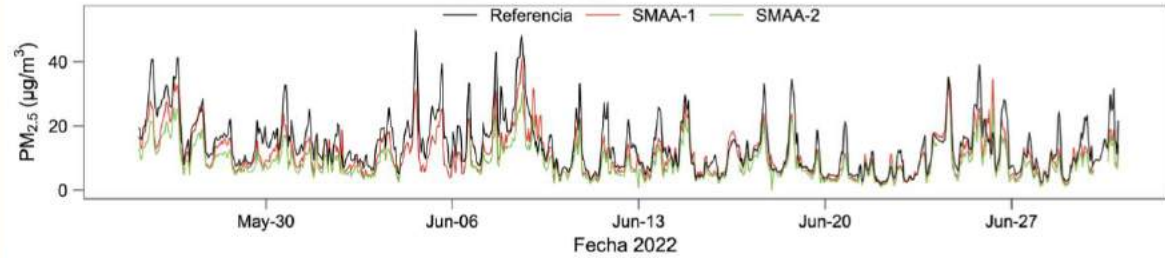


Número de periodos de 24 horas fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

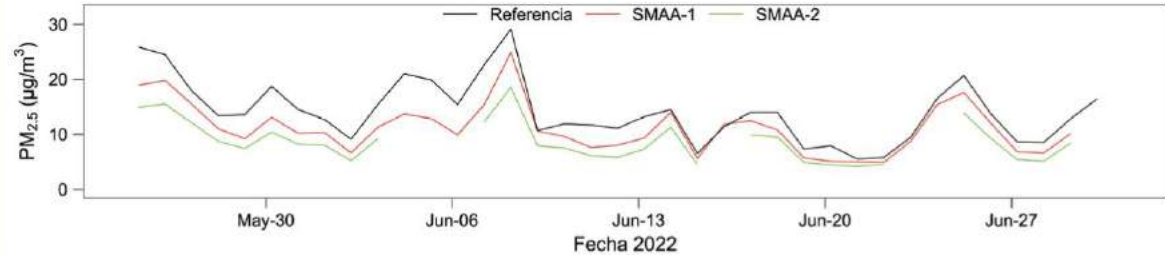


Número de periodos de 24 horas fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

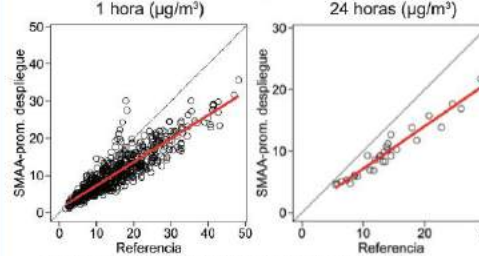
### Serie de tiempo, promedio de 1 hora



### Serie de tiempo, promedio de 24 horas

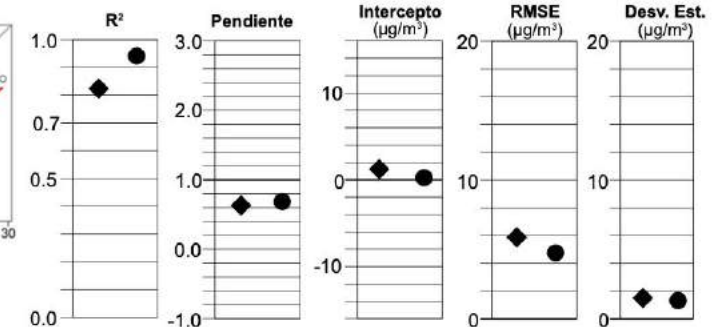


### Comparación con el equipo de referencia

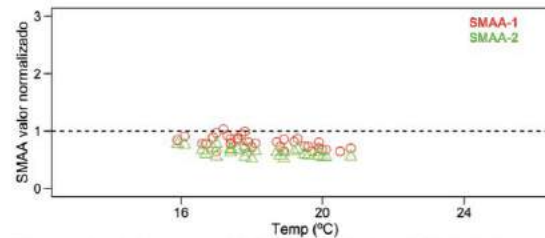


Intervalos de concentraciones medidas por el equipo de referencia (µg/m³): 1.7 a 49.9 (1-h), 5.5 a 29.1 (24-h)  
Número de periodos de 24 horas con concentraciones mayores a la NOM (>41 µg/m³): 0

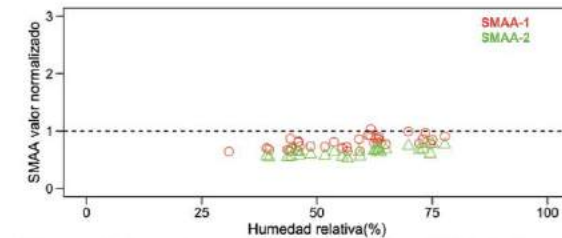
### Métricas de desempeño



### Efecto de las condiciones ambientales



Número de datos (prom. 24-h): SMAA-1=37, SMAA-2=30  
Temperatura promedio: 18.3 °C



Número de datos (prom. 24-h): SMAA-1=37, SMAA-2=30  
Humedad relativa promedio: 57 %



# PM2.5

## Análisis de datos

### Estadísticas

|   | Número de datos pareados |          | Promedio ± desv. est. |            | Mediana |          | Mín (Máx)  |            |
|---|--------------------------|----------|-----------------------|------------|---------|----------|------------|------------|
|   | 1 hora                   | 24 horas | 1 hora                | 24 horas   | 1 hora  | 24 horas | 1 hora     | 24 horas   |
| Referencia ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 769                      | 30       | 14.0 ± 8.4            | 13.9 ± 6.0 | 12.2    | 13.3     | 1.7 (48.2) | 5.5 (29.1) |
| SMAA-1 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )     | 769                      | 30       | 11.0 ± 6.6            | 10.9 ± 4.9 | 9.2     | 10.3     | 1.2 (41.0) | 4.9 (24.9) |
| SMAA-2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )     | 769                      | 30       | 8.7 ± 5.1             | 8.7 ± 3.7  | 7.4     | 8.1      | 0.0 (30.2) | 4.2 (18.5) |
| ---                                     | ---                      | ---      | ---                   | ---        | ---     | ---      | ---        | ---        |

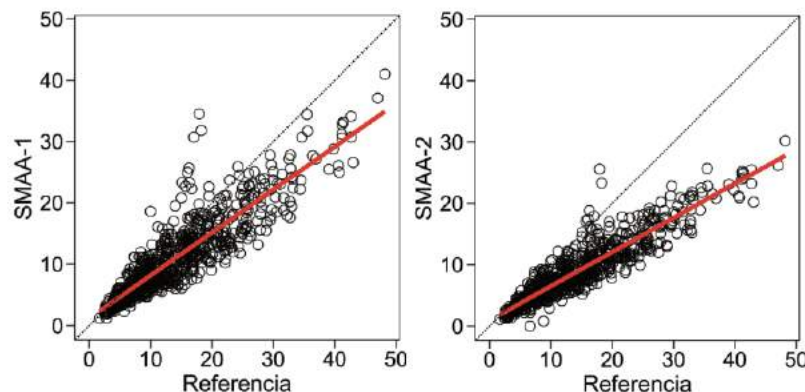
### Resultados de la evaluación

|                         | Sesgo y linealidad |          |           |          |   |          |                    |               |
|-------------------------|--------------------|----------|-----------|----------|---|----------|--------------------|---------------|
|                         | $R^2$              |          | Pendiente |          | Intercepto ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |          | Spearman (Kendall) |               |
|                         | 1 hora             | 24 horas | 1 hora    | 24 horas | 1 hora                                  | 24 horas | 1 hora             | 24 horas      |
| SMAA-1                  | 0.797              | 0.934    | 0.70      | 0.79     | 1.18                                    | 0.03     | 0.906 (0.738)      | 0.948 (0.826) |
| SMAA-2                  | 0.849              | 0.936    | 0.56      | 0.59     | 0.91                                    | 0.43     | 0.924 (0.766)      | 0.961 (0.863) |
| ---                     | ---                | ---      | ---       | ---      | ---                                     | ---      | ---                | ---           |
| Promedio del despliegue | 0.827              | 0.937    | 0.63      | 0.69     | 1.05                                    | 0.23     | 0.919 (0.755)      | 0.954 (0.852) |

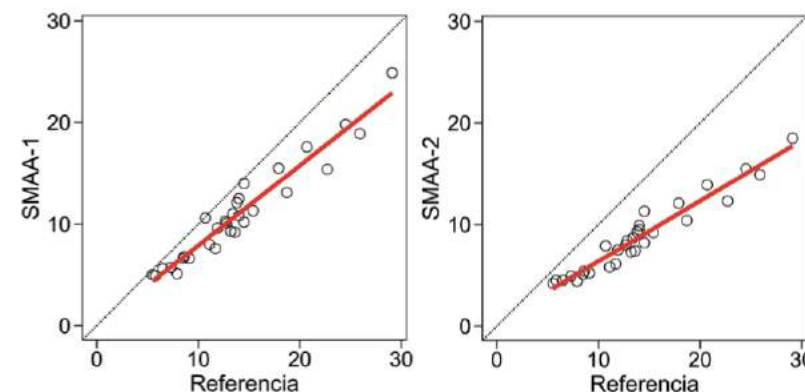
| Promedio del despliegue ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Error                             |          |           |          | Precisión                               |          |        |          | Captura de datos (%) |          |    |    |
|--|-----------------------------------|----------|-----------|----------|---|----------|--------|----------|----------------------|----------|----|----|
|  | RMSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |          | NRMSE (%) |          | Desv. est. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |          | CV (%) |          |                      |          |    |    |
|  | 1 hora                            | 24 horas | 1 hora    | 24 horas | 1 hora                                  | 24 horas | 1 hora | 24 horas | 1 hora               | 24 horas |    |    |
|  | 9.8                               | 9.8      | 5.9       | 4.8      | 42.2                                    | 34.2     | 1.5    | 1.3      | 14.9                 | 13.2     | 86 | 79 |

### Gráficos de regresión individuales para los dispositivos contra el equipo de referencia

Promedios de 1 hora ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



Promedios de 24 horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



## Partículas PM2.5

| Dispositivo   | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Linealidad     |      |       | Error                                |              | Precisión                          |           | S     | $\tau$ | Datos<br>% |
|---|--|----------------|------|-------|--------------------------------------|--------------|------------------------------------|-----------|-------|--------|------------|
|   |  | R <sup>2</sup> | m    | b     | RMSE<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | NRMSE<br>(%) | DE<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | CV<br>(%) |       |        |            |
| <b>Sitio de evaluación: LAA, promedio de 1 hora (promedio= 21.6 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>    |  |                |      |       |                                      |              |                                    |           |       |        |            |
| CMM/Airlab  | 26.1                                     | 0.272          | 0.61 | 12.99 | 10.8                                 | 50.0         | 2.7                                | 10.5      | 0.644 | 0.463  | 90         |
| Ellona/WT1  | ---                                      | ---            | ---  | ---   | ---                                  | ---          | ---                                | ---       | ---   | ---    | ---        |
| ENVEA/Cairnet   | 18.4                                     | 0.821          | 0.92 | -1.33 | 5.0                                  | 23.2         | 0.5                                | 2.5       | 0.906 | 0.913  | 100        |
| Kunak/AIR pro   | 19.1                                     | 0.766          | 0.88 | 0.01  | 5.3                                  | 24.4         | 1.2                                | 6.3       | 0.886 | 0.716  | 97         |
| PurpleAir/II-SD   | 30.7                                     | 0.898          | 1.55 | -0.24 | 10.1                                 | 50.7         | 0.6                                | 2.1       | 0.973 | 0.861  | 78         |
| Smability/SMAA  | 18.4                                     | 0.795          | 0.91 | -0.94 | 5.6                                  | 26.4         | 2.5                                | 13.4      | 0.906 | 0.735  | 84         |
| YERA  | 19.0                                     | 0.878          | 1.13 | -3.35 | 3.1                                  | 15.8         | 0.6                                | 3.4       | 0.942 | 0.801  | 58         |
| <b>Sitio de evaluación: ICAYCC, promedio de 1 hora (promedio= 14.2 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |  |                |      |       |                                      |              |                                    |           |       |        |            |
| CMM/Airlab  | 17.9                                     | 0.344          | 0.32 | 14.03 | 8.5                                  | 70.5         | 1.4                                | 7.8       | 0.700 | 0.522  | 63         |
| Ellona/WT1  | ---                                      | ---            | ---  | ---   | ---                                  | ---          | ---                                | ---       | ---   | ---    | ---        |
| ENVEA/Cairnet   | 10.5                                     | 0.840          | 0.74 | 0.07  | 5.1                                  | 35.9         | 0.5                                | 4.9       | 0.925 | 0.766  | 100        |
| Kunak/AIR pro   | 11.5                                     | 0.828          | 0.90 | -1.28 | 4.5                                  | 31.9         | 0.6                                | 5.5       | 0.940 | 0.793  | 100        |
| MPBU  | 16.4                                     | 0.764          | 1.52 | -0.09 | 8.7                                  | 80.3         | 1.7                                | 10.3      | 0.811 | 0.641  | 27         |
| PurpleAir   | 18.1                                     | 0.851          | 1.44 | -2.39 | 6.0                                  | 42.6         | 0.3                                | 1.7       | 0.931 | 0.780  | 100        |
| Smability/SMAA  | 9.8                                      | 0.827          | 0.63 | 1.05  | 5.9                                  | 42.2         | 1.5                                | 14.9      | 0.919 | 0.755  | 86         |
| YERA  | 13.1                                     | 0.840          | 0.99 | -2.12 | 3.6                                  | 23.7         | 0.4                                | 2.7       | 0.922 | 0.759  | 77         |







# Análisis de datos

## Información del evaluador

**Institución:** Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-UNAM, Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire-SEDEMA

**Ubicación del sitio de prueba:** Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México

Lat.: 19.326° Long.: -99.176° Altitud: 2290 m

## Información del dispositivo ENVEA

**Marca y modelo:** ENVEA modelo CAIRNET

**Versión de firmware:** ---

**Intervalo de muestreo:** 1 minutos

**Números de serie:** CXM22020313, CZM22020314

**Problemas identificados durante el despliegue:**  
No se identificaron problemas durante la operación.

## Información del equipo de referencia para O<sub>3</sub>

**Marca y modelo:** Teledyne API modelo 400E

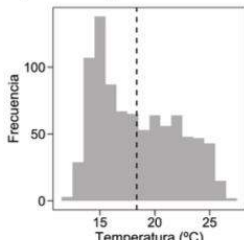
**Número de serie:** 1208

**Intervalo de muestreo:** 1 minuto

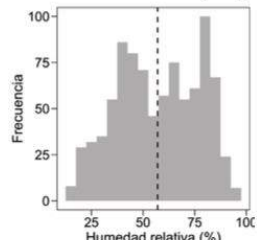
**Fecha de calibración:** 23 de mayo de 2022

**Observaciones:** El instrumento operó sin problemas, se realizaron verificaciones de la respuesta del instrumento una vez cada seis días.

## Temperatura y humedad ambientales durante el despliegue

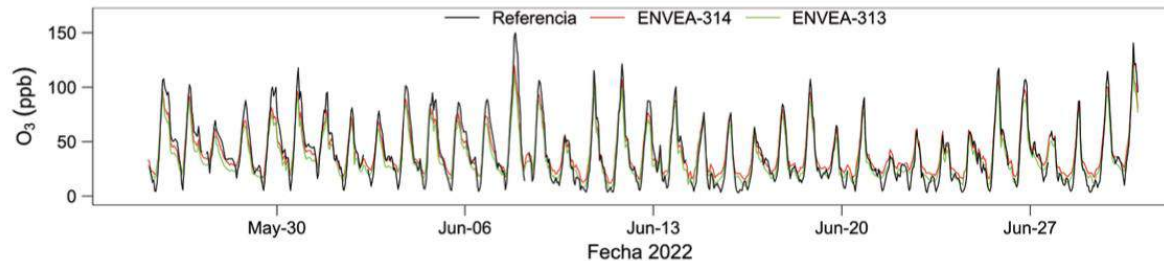


Número de periodos de 1 hora fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

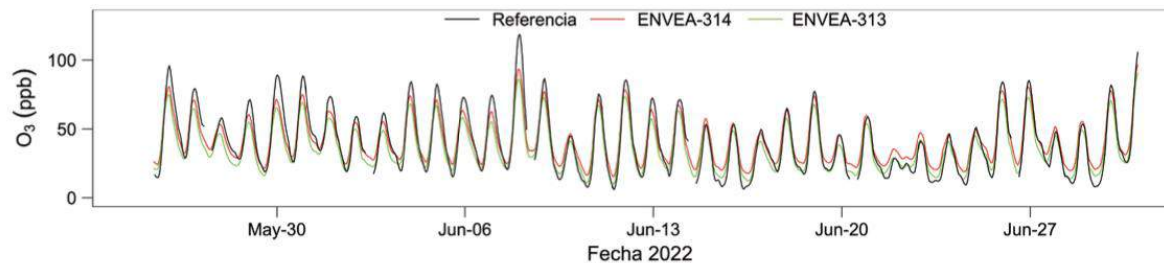


Número de periodos de 1 hora fuera del límite de temperatura recomendado por el fabricante: 0

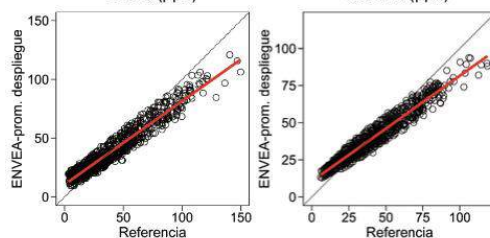
## Serie de tiempo, promedio de 1 hora



## Serie de tiempo, promedio de 8 horas

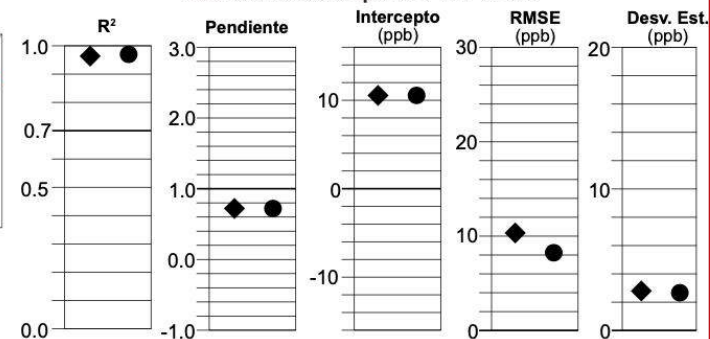


## Comparación con el equipo de referencia

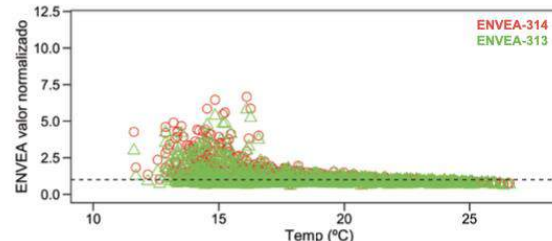


Intervalos de concentraciones medidas por el equipo de referencia (ppb): 3.1 a 149.8 (1-h), 6.0 a 118.6 (8-h)  
Número de periodos de 24 horas con concentraciones mayores a la NOM: 61 (1-h, 90 ppb), 142 (8-h, 65 ppb)

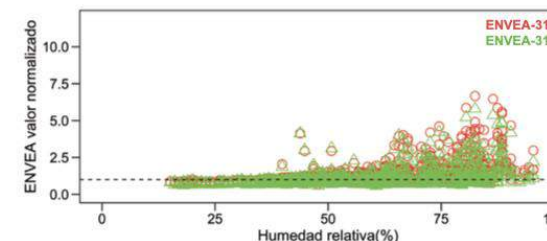
## Métricas de desempeño



## Efecto de las condiciones ambientales



Número de datos (prom. 1-h): ENVEA-313=877, ENVEA-314=877  
Temperatura promedio: 18.3 °C



Número de datos (prom. 1-h): ENVEA-313=877, ENVEA-314=877  
Humedad relativa promedio: 57 %





# Análisis de datos

## Estadísticas

|                  | Número de datos pareados |         | Promedio ± desv. est. |             | Mediana |         | Mín (Máx)    |             |
|------------------|--------------------------|---------|-----------------------|-------------|---------|---------|--------------|-------------|
|                  | 1 hora                   | 8 horas | 1 hora                | 8 horas     | 1 hora  | 8 horas | 1 hora       | 8 horas     |
| Referencia (ppb) | 877                      | 855     | 40.0 ± 28.1           | 40.4 ± 22.3 | 33.5    | 36.0    | 3.1 (149.8)  | 6.0 (118.6) |
| ENVEA-314 (ppb)  | 877                      | 855     | 41.6 ± 20.9           | 42.0 ± 16.5 | 34.9    | 38.7    | 11.8 (125.0) | 15.5 (96.8) |
| ENVEA-313 (ppb)  | 877                      | 855     | 36.2 ± 20.6           | 36.6 ± 16.3 | 30.0    | 33.3    | 6.6 (116.8)  | 10.1 (90.8) |
| ---              | ---                      | ---     | ---                   | ---         | ---     | ---     | ---          | ---         |

## Resultados de la evaluación

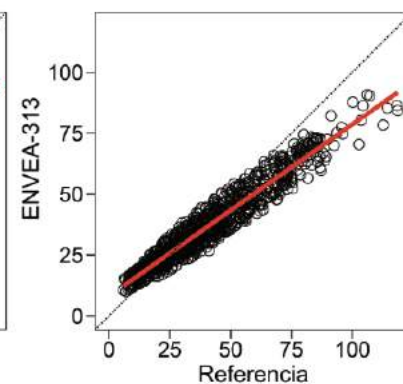
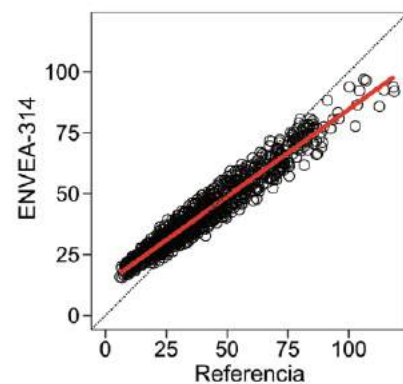
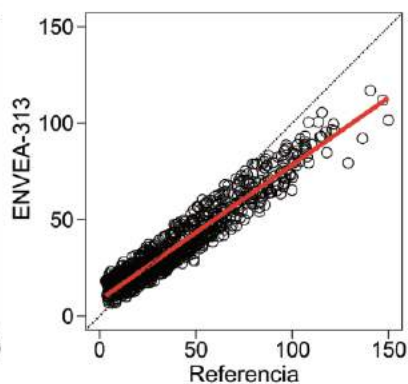
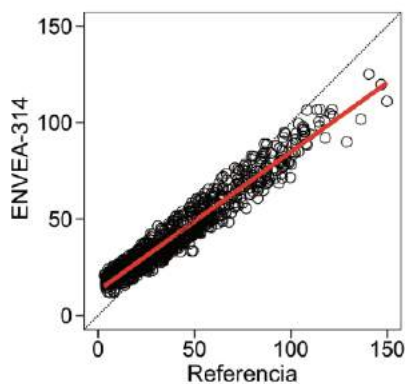
|                         | Sesgo y linealidad |         |           |         |                  |         |                    |               |
|-------------------------|--------------------|---------|-----------|---------|------------------|---------|--------------------|---------------|
|                         | R <sup>2</sup>     |         | Pendiente |         | Intercepto (ppb) |         | Spearman (Kendall) |               |
|                         | 1 hora             | 8 horas | 1 hora    | 8 horas | 1 hora           | 8 horas | 1 hora             | 8 horas       |
| ENVEA-314               | 0.937              | 0.945   | 0.72      | 0.72    | 12.85            | 13.00   | 0.958 (0.822)      | 0.970 (0.848) |
| ENVEA-313               | 0.916              | 0.931   | 0.70      | 0.71    | 8.25             | 8.10    | 0.938 (0.784)      | 0.961 (0.827) |
| ---                     | ---                | ---     | ---       | ---     | ---              | ---     | ---                | ---           |
| Promedio del despliegue | 0.928              | 0.939   | 0.71      | 0.71    | 10.55            | 10.55   | 0.950 (0.804)      | 0.967 (0.839) |

| Promedio del despliegue (ppb) | Error      |         |                  |         | Precisión |         |                      |         |     |
|-------------------------------|------------|---------|------------------|---------|-----------|---------|----------------------|---------|-----|
|                               | RMSE (ppb) |         | Desv. est. (ppb) |         | CV (%)    |         | Captura de datos (%) |         |     |
|                               | 1 hora     | 8 horas | 1 hora           | 8 horas | 1 hora    | 8 horas | 1 hora               | 8 horas |     |
| 38.9                          | 39.3       | 10.3    | 8.2              | 2.8     | 2.7       | 7.2     | 7.0                  | 100     | 100 |

## Gráficos de regresión individuales para los dispositivos contra el equipo de referencia

Promedios de 1 hora (ppb)

Promedios de 8 horas (ppb)



## Ozono (O<sub>3</sub>)

| Dispositivo   | Promedio (ppb) | Linealidad     |      |        | Error RMSE (ppb) | Precisión |        | S     | τ     | Datos % |
|---|----------------|----------------|------|--------|------------------|-----------|--------|-------|-------|---------|
|   |                | R <sup>2</sup> | m    | b      |                  | DE (ppb)  | CV (%) |       |       |         |
| <b>Sitio de evaluación: LAA, promedio de 1 hora (promedio= 39.8 ppb)</b>    |                |                |      |        |                  |           |        |       |       |         |
| CMM/Airlab  | 557.4          | 0.000          | 0.00 | 557.2  | 519.2            | 11.2      | 2.0    | 0.011 | 0.025 | 88      |
| APIS/APM01  | 34.3           | 0.865          | 0.98 | -3.37  | 14.9             | 5.8       | 17.0   | 0.931 | 0.766 | 97      |
| Ellona/WT1  | ---            | ---            | ---  | ---    | ---              | ---       | ---    | ---   | ---   | ---     |
| ENVEA/Cairnet   | 36.0           | 0.822          | 0.50 | 16.45  | 19.5             | 4.2       | 11.5   | 0.903 | 0.737 | 99      |
| Kunak/AIR pro   | 39.3           | 0.964          | 0.99 | 0.52   | 10.7             | 8.4       | 21.5   | 0.978 | 0.874 | 99      |
| Smability/SMAA  | 42.1           | 0.071          | 0.13 | 37.10  | 34.0             | 5.0       | 11.8   | 0.209 | 0.157 | 83      |
| <b>Sitio de evaluación: ICAyCC, promedio de 1 hora (promedio= 40.0 ppb)</b> |                |                |      |        |                  |           |        |       |       |         |
| CMM/Airlab  | 571.8          | 0.880          | 0.20 | 564.2  | 534.3            | 12.6      | 2.2    | 0.270 | 0.184 | 62      |
| APIS/APM01  | 17.0           | 0.833          | 0.71 | -11.50 | 26.1             | 2.8       | 16.6   | 0.950 | 0.807 | 100     |
| Ellona/WT1  | ---            | ---            | ---  | ---    | ---              | ---       | ---    | ---   | ---   | ---     |
| ENVEA/Cairnet   | 38.9           | 0.928          | 0.71 | 10.55  | 10.3             | 2.8       | 7.2    | 0.950 | 0.804 | 100     |
| Kunak/AIR pro   | 40.6           | 0.966          | 0.92 | 3.71   | 8.7              | 6.8       | 16.8   | 0.978 | 0.875 | 100     |
| Smability/SMAA  | 45.1           | 0.452          | 0.47 | 25.63  | 21.6             | 3.2       | 7.0    | 0.652 | 0.464 | 85      |



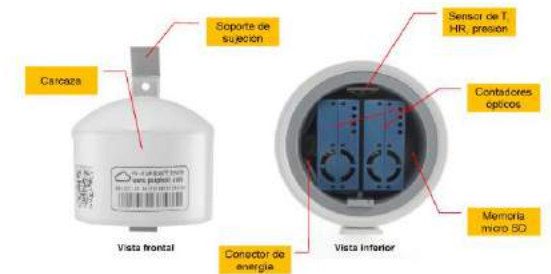
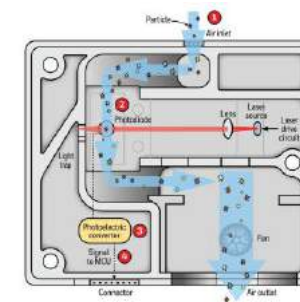
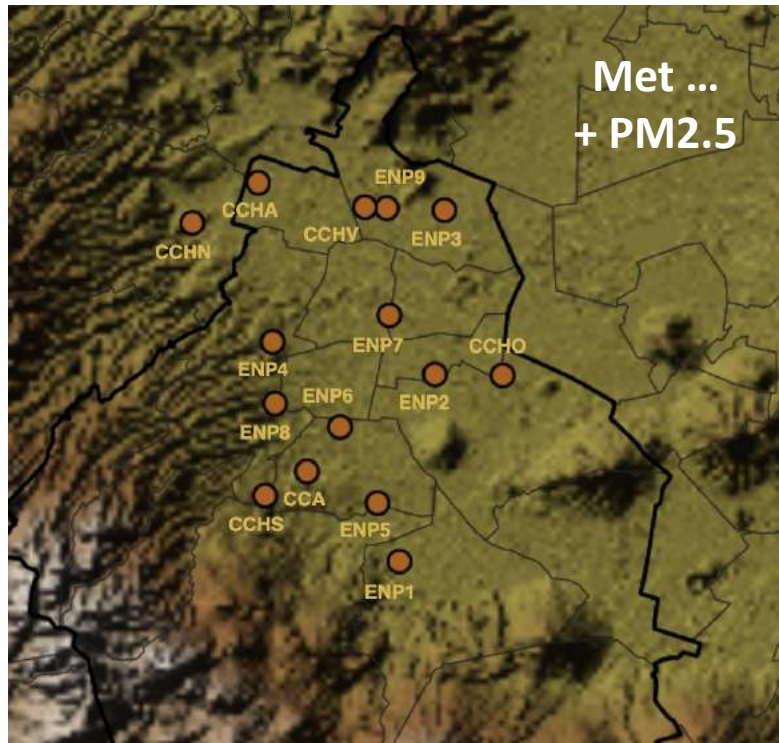


## Componente 2. Despliegue de una red piloto

Programa de estaciones  
Meteorológicas del Bachillerato  
Universitario (UNAM)



Capacitación a profesores de bachillerato



Esquema de un sensor óptico para PM (Imagen: <https://help.atmotube.com/technical/3-atmotube-pm/>).



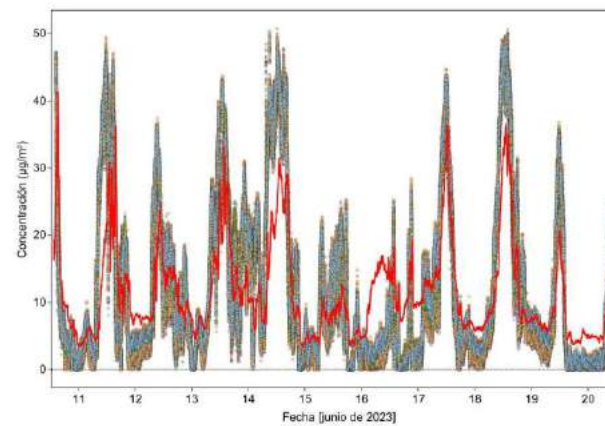
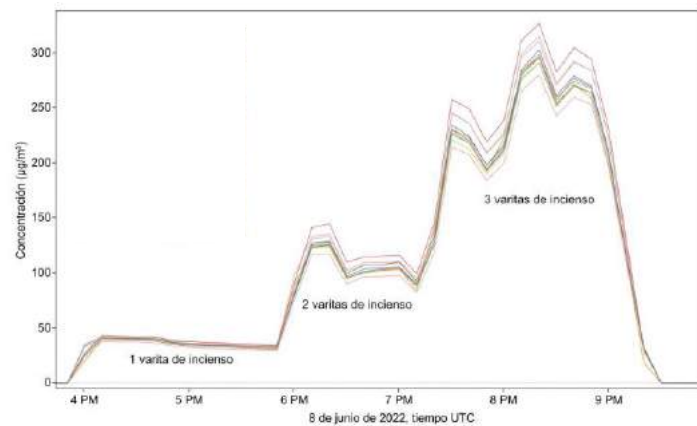
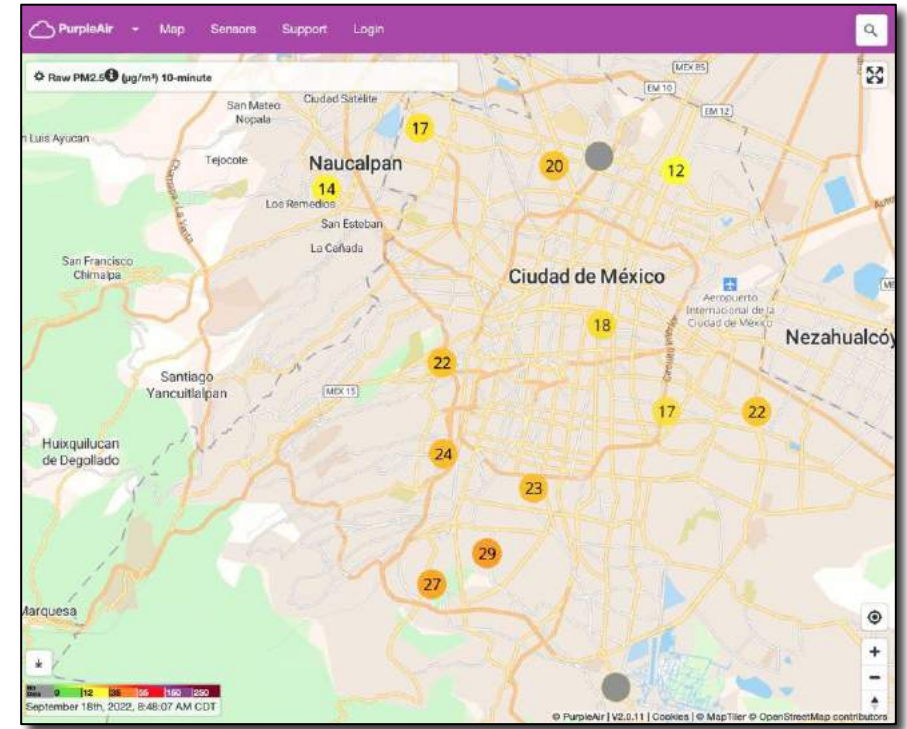
## Componente 2. Despliegue de una red piloto

### Verificación de dispositivos

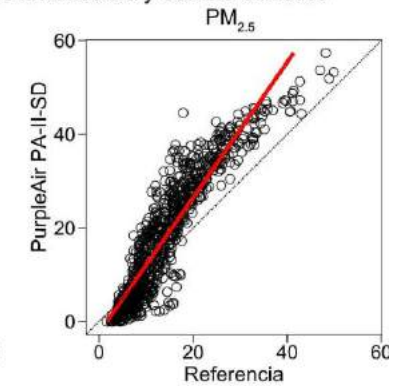
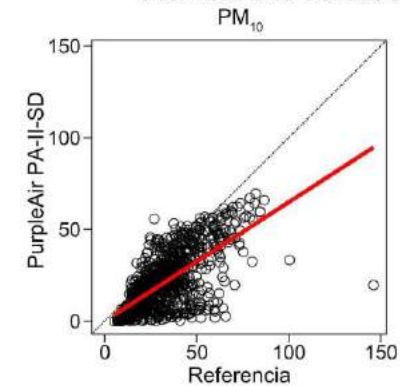
en condiciones controladas



en aire ambiente

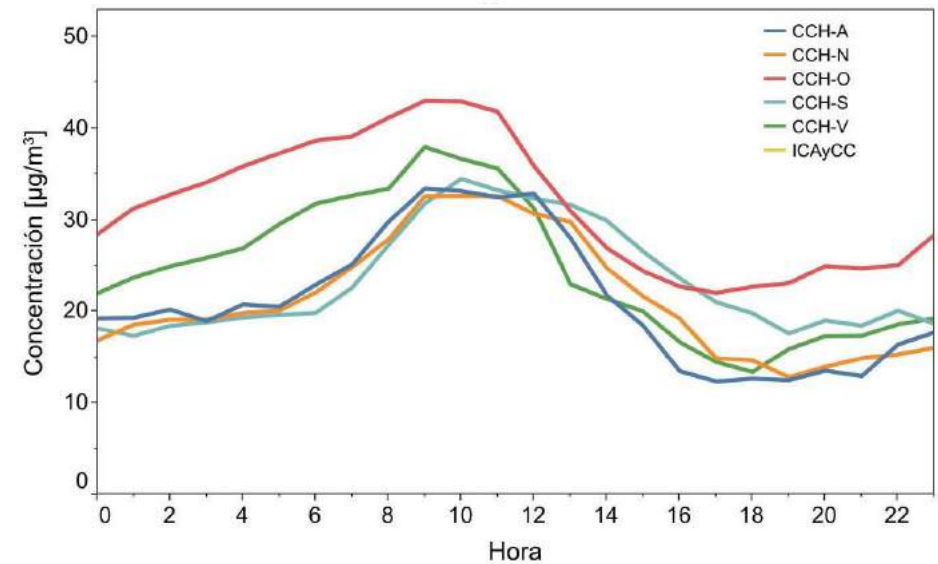
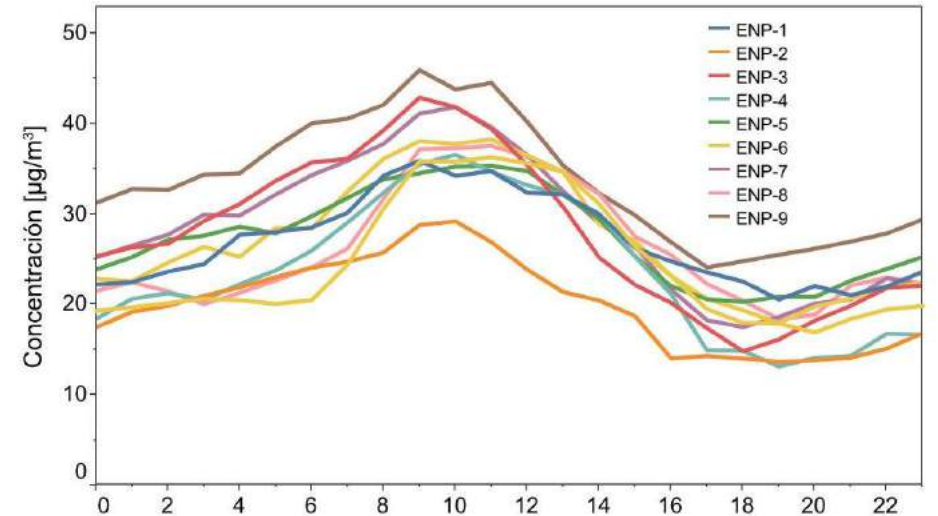
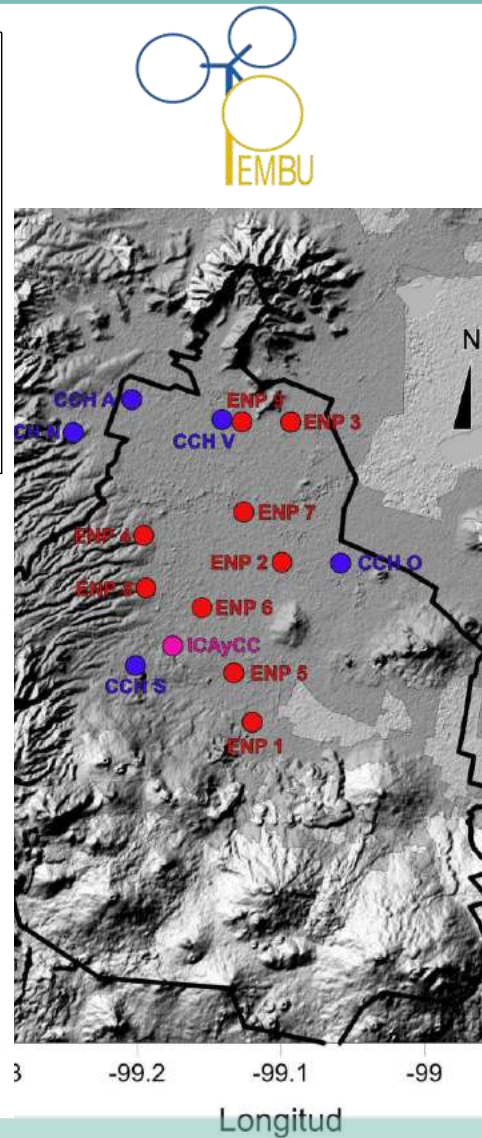
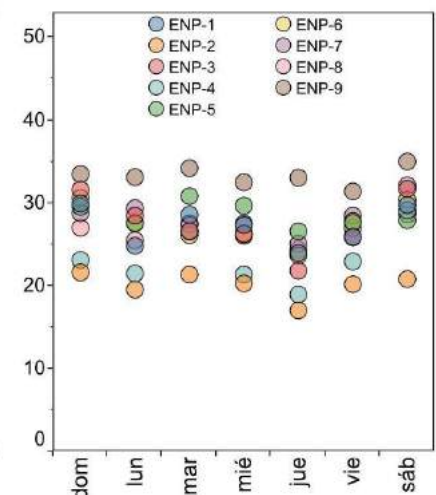
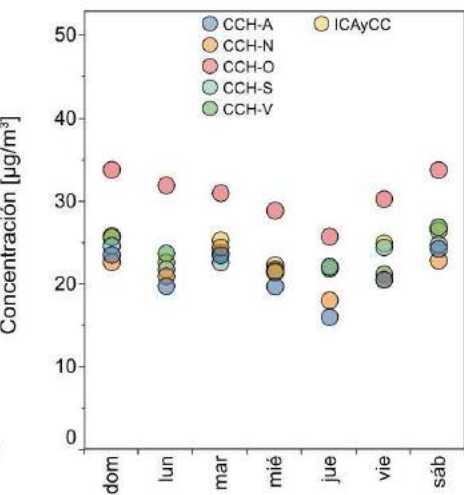
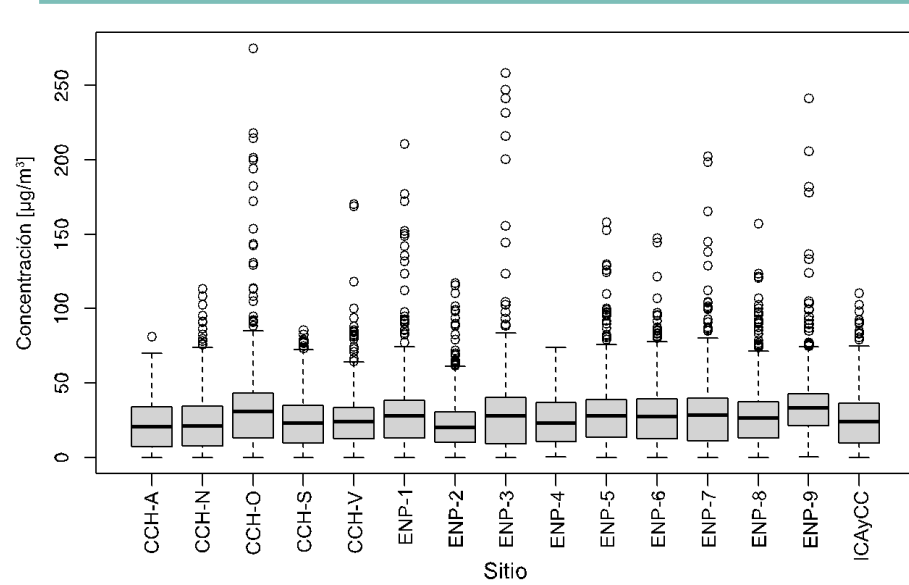


Sitio: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático



# Componente 2. Despliegue de una red piloto

## Programa de estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (UNAM)





## Conclusiones (Evaluación)

---

- El **precio** no necesariamente se equipara a la calidad de los resultados en términos de exactitud y precisión.
- Los sensores son dependientes de las **condiciones ambientales** por lo que cambios atmosféricos en humedad relativa y temperatura tienen un efecto sobre la medición de varios de estos contaminantes.
- En general, los equipos **multi-contaminantes** pueden sufrir de una mayor pérdida de datos debido a la interacción y dependencia interna de funciones de los sensores.
- **Post-procesamiento**, tomando en cuenta las variables ambientales, puede mejorar significativamente los resultados y ya varios desarrolladores están incluyendo en su tratamiento de datos correcciones de tipo multi-variable
- La **composición química y forma aerodinámica de las partículas** suspendidas en el aire tiene un efecto sobre la medición y cálculo de las concentraciones que reportan los sensores de bajo costo. Se esperan cambios en el desempeño cuando la mezcla de aire cambia significativamente.



## Conclusiones (Despliegue de una red de bajo costo)

---

- **Costo:** El ahorro conseguido para la compra inicial de algunos sensores requiere de inversión posterior para sufragar costos de adquisición de datos, mantenimiento, reparación y soporte técnico, que puede superar fácilmente la inversión inicial.
- **QA/QC:** Ninguno de los fabricantes o proveedores ofrecen servicios de aseguramiento y control de calidad, y el análisis de datos está limitado a las opciones del paquete de software. El análisis comparativo para diagnóstico y calibración con equipos de referencia, incluyendo un programa continuo de seguimiento, es parte de las **buenas prácticas** recomendadas en la operación de estas redes.
- **Parametros ambientales:** No todos los dispositivos incorporan mediciones meteorológicas, esto es recomendable en un sistema integral de medición, en algunos casos resulta crítico la información climatológica para el análisis e interpretación de las mediciones.
- **Red ciudadana vs. DIY:** Algunos desarrolladores establecen restricciones fuertes en el acceso de los datos de otros usuarios e inclusive de los sensores propios, lo que motiva el desarrollo de redes tipo *DIY*





*¡Gracias por su atención!*



Michel Grutter<sup>\*1</sup>, Armando Retama<sup>1</sup>, Olivia Rivera<sup>2</sup>, Jaime Contreras<sup>1</sup>, Omar López<sup>1</sup>, Sandra Porras<sup>1</sup>,  
Thania Arredondo<sup>1</sup>, Eugenia González del Castillo<sup>1</sup>



Contacto:

\* [grutter@unam.mx](mailto:grutter@unam.mx)

Más información:

<http://www.epr.atmosfera.unam.mx/Microsensores-2022/>