

# Análisis de dispersión y absorción de PM<sub>2.5</sub> a 532 nm y 870 nm mediante un Photoacoustic Extinctionmeter (PAX) en la Ciudad de México y la Reserva Iztaccíhuatl-Popocatepetl

## Universidad Nacional Autónoma de México

### Facultad de Ciencias

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Laboratorio de Física Contemporánea I, Grupo 8248

Académicos: H. Alvares-Ospina <sup>a</sup>

Equipo. S. González-Juárez <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México



#### Resumen.

Se realizó un análisis de datos recolectados durante los meses de enero a marzo correspondientes a los coeficientes de absorción y dispersión a 532 y 870 nm, obtenidos por 2 equipos Photoacoustic Extinctionmeter (PAX). Estos dos equipos están ubicados en el instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (zona urbana) y en el Observatorio atmosférico Altzomoni (zona rural), ambos pertenecientes a la UNAM.

Tras haber calculado coeficientes derivados como el de extinción, albedo y visibilidad, se compararían los resultados para diferenciar las longitudes de onda y las diferentes sedes. Además de esto se exponen resultados promedios de las variaciones horarias, semanales y mensuales. Se identificó que en la madrugada del día 18 de febrero se tuvo una anomalía, al haber identificado valores muy bajos para ambos coeficientes en los 2 equipos al mismo tiempo.

#### Información del Reporte

##### Fecha:

26 de febrero de 2025

##### Palabras clave:

- Photoacoustic Extinctionmeter (PAX)
- PM<sub>2.5</sub>
- Coeficiente de absorción
- Coeficiente de dispersión
- Coeficiente de extinción
- Albedo de dispersión
- Visibilidad
- Ciudad Universitaria
- Reserva Natural Iztaccíhuatl - Popocatepetl

## 1. Marco teórico.

### PM (particulate matter)

El material particulado (MP) se refiere a una mezcla de partículas sólidas y gotitas líquidas suspendidas en el aire. Estas partículas pueden variar ampliamente en tamaño, forma y composición química. [1]. Las fuentes de PM pueden ser tanto naturales como antropogénicas (producidas por el hombre). Las fuentes naturales incluyen el polvo y el rocío marino, mientras que las fuentes antropogénicas incluyen las emisiones de los vehículos, los procesos industriales y la combustión de combustibles fósiles.

[2]

Clasificación por tamaño de partículas (PM):

- PM 10: Partículas con un diámetro de 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) o menos. Se las conoce como partículas gruesas y pueden incluir polvo, polen y esporas de moho. [3] Pueden causar problemas respiratorios y normalmente se filtran por la nariz y la garganta. [4]
- PM 2.5: Partículas con un diámetro de 2,5  $\mu\text{m}$  o menos. Se conocen como partículas finas y pueden incluir partículas de combustión, compuestos orgánicos y metales. [3] Son lo suficientemente pequeñas como para penetrar el tracto respiratorio y entrar al torrente sanguíneo, provocando enfermedades cardiovasculares y respiratorias. [4]

## S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

- c) Partículas ultrafinas (PUF o PM<sub>0,1</sub>): Partículas con un diámetro inferior a 0,1 μm. Estas partículas pueden penetrar las membranas celulares y entrar en el torrente sanguíneo, lo que supone importantes riesgos para la salud, como mutaciones del ADN y enfermedades cardiovasculares. [4]

### Ley de Beer-Lambert

Es un principio fundamental de la espectroscopia que describe la relación entre la concentración de una sustancia en una solución y la cantidad de luz absorbida por la solución. [5]

La ley establece que la absorbancia de un elemento es proporcional a su concentración, su coeficiente de extinción molar y la longitud del camino recorrido por la luz. Matemáticamente, se expresa como:

$$A(\nu) = \epsilon(\nu)lc \quad (1)$$

donde  $A(\nu)$  es la absorbancia del elemento,  $\epsilon(\nu)$  es su coeficiente de extinción molar,  $l$  es la longitud del camino por el que pasa la luz y  $c$  es la concentración de la sustancia que se mide. [5]

Puede calcularse también como:

$$A = -\log_{10} \frac{I_1}{I_0} \quad (1)$$

Donde  $I_1$  y  $I_0$  son las intensidades luminosas saliente y entrante respectivamente. [6]

Esta ley también se aplica para describir la atenuación de la radiación solar al pasar a través de la atmósfera. En este caso hay dispersión de la radiación además de absorción. La ley de Beer-Lambert para la atmósfera se suele expresar:

$$I_n = I_0 \exp[-m(k_a + k_g + k_{NO_2} + k_\omega + k_{O_3} + k_r)] \quad (1)$$

Donde cada  $k_x$  es un coeficiente de extinción cuyo subíndice identifica la fuente de absorción o dispersión: [6]

- $a$  hace referencia a aerosoles densos (que absorben y dispersan)
- $g$  son gases uniformemente mezclados (principalmente dióxido de carbono y oxígeno molecular).

## Reporte de laboratorio rotativo

- $NO_2$  es dióxido de nitrógeno, debido principalmente a la contaminación (sólo absorbe)
- $\omega$  es la absorción producida por el vapor de agua
- $O_3$  es ozono (sólo absorción)
- $r$  es la dispersión de Rayleigh para el oxígeno molecular y nitrógeno
- $m$  es la masa de aire

### Coefficiente de Absorción

El coeficiente de absorción  $\alpha(\omega)$  es una propiedad óptica clave que describe la atenuación de la intensidad de la luz a medida que se propaga a través del material. Este coeficiente está directamente relacionado con la parte imaginaria de la constante dieléctrica  $\epsilon_2(\omega)$  a través de la ecuación (1):

$$\alpha = \left(\frac{\omega}{nc}\right) \epsilon_2(\omega) \quad (1)$$

, donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la luz,  $n$  es el índice de refracción y  $c$  es la velocidad de la luz. [7]

El efecto de la absorción de la radiación solar por ciertos gases como el ozono ( $O_3$ ), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) contribuye al coeficiente de absorción. Estos gases absorben parte de la radiación solar, lo que reduce la cantidad de luz que llega al observador y, por lo tanto, disminuye la visibilidad. [8]

- Ejemplos de fuentes humanas: Gases de efecto invernadero ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ) por quema de combustibles fósiles. Aerosoles de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y carbono negro (hollín) por industrias y vehículos. Compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) que forman smog fotoquímico.
- Ejemplos de fuentes naturales: Aerosoles de sal marina ( $NaCl$ ) y polvo mineral ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) por erosión eólica. Compuestos de azufre ( $SO_2$ ) de erupciones volcánicas. Compuestos orgánicos biogénicos (terpenos) liberados por la vegetación.

### Coefficiente de Dispersión

El efecto de dispersión de Rayleigh de las moléculas de gas, como el aire, contribuye al coeficiente de dispersión. Asimismo, la dispersión de la radiación solar por las partículas de aerosol en la

### S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

atmósfera también forma parte de este coeficiente de dispersión. [8]

El coeficiente de dispersión ( $\beta$ ) en la aproximación de Rayleigh describe cómo partículas mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz ( $d \ll \lambda$ ) redirigen la radiación incidente. A continuación, se muestra en la ecuación (2):

$$\beta = \frac{2\pi^2}{\lambda^4} \left| \frac{\varepsilon(\omega) - 1}{\varepsilon(\omega) + 2} \right|^2 \quad (2)$$

donde  $\varepsilon(\omega)$  es la constante dieléctrica compleja del material y  $\lambda$  la longitud de onda. [9]

- Ejemplos de Fuentes humanas: Partículas de carbono (hollín, carbono negro, COV) por combustión de diésel y quema de biomasa. Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) derivados de emisiones industriales ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ). Metales pesados (Pb, Cd, Hg) en aerosoles de fábricas y minería. Micro plásticos y partículas sintéticas por degradación de residuos.
- Ejemplos de fuentes naturales: Polvo mineral ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) proveniente de erosión eólica. Aerosoles marinos (NaCl, sales de magnesio) por evaporación del océano. Cenizas volcánicas (silicatos,  $\text{SO}_2$ , ceniza fina). Partículas biogénicas (polen, esporas, compuestos orgánicos emitidos por plantas).

### Coefficiente de Extinción

El coeficiente de extinción de partículas ( $B_{ext}$ ) determina la atenuación de la luz en la atmósfera y se define como la suma del coeficiente de dispersión ( $B_{scat}$ ) y el coeficiente de absorción ( $B_{abs}$ ), tal como se indica en la ecuación (2). [10]

$$B_{ext} = B_{scat} + B_{abs} \quad (2)$$

### Albedo de dispersión

El albedo de dispersión simple (SSA) es una medida importante de las propiedades ópticas de los aerosoles, que representa la relación entre el coeficiente de dispersión ( $B_{scat}$ ) y el coeficiente de extinción ( $B_{ext}$ ), se define matemáticamente como en la ecuación (3): [10]

$$SSA = \frac{B_{scat}}{B_{ext}} = \frac{B_{scat}}{B_{scat} + B_{abs}} \quad (3)$$

### Reporte de laboratorio rotativo

Un valor de SSA cercano a 1 indica que la dispersión domina sobre la absorción, mientras que un valor más bajo significa que la absorción es más importante. [10]

### Visibilidad

La ecuación de que corresponde a la visibilidad (visual range, VR) (4), muestra que el rango de visibilidad es inversamente proporcional a la extinción total de la luz,

$$VR = \frac{3.912}{B_{ext}} \quad (4)$$

El valor 3.912 en la ecuación de visibilidad es una constante conocida como la "constante de Koschmieder". La constante 3.912 se deriva de la ley de Koschmieder, que describe la relación entre la visibilidad y la extinción de la luz en la atmósfera. Esta constante representa el contraste mínimo perceptible por el ojo humano, que se asume como 0.02 o 2%. [10]

### Photoacoustic Extinctionmeter (PAX)

El Photoacoustic Extinctionmeter (PAX), desarrollado por Droplet Measurement Technologies (DMT, EE.UU.), es un instrumento avanzado que permite la medición continua y simultánea de los coeficientes de dispersión ( $B_{scat}$ ) y absorción ( $B_{abs}$ ) de aerosoles atmosféricos. En la parte frontal del PAX, el equipo cuenta con una pantalla táctil gráfica donde aparecerán los menús intuitivos y así poder acceder a datos en tiempo real e información sobre el estado del instrumento. [11]



Ilustración 1 PAX with Touch-Screen Display [11]

El PAX utiliza un módulo láser que opera en longitudes de onda de 532 nm y 870 nm y cuenta con un límite de detección para un promedio de 60 s es inferior a  $0,25 \text{ Mm}^{-1}$  para los coeficientes de absorción y dispersión. La incertidumbre en los coeficientes de dispersión y absorción medidos es de aproximadamente  $\pm 10\%$  y  $\pm 20\%$  respectivamente.

[12]

El PAX utiliza el método fotoacústico para medir el coeficiente de absorción de los aerosoles. Este método se basa en la detección de ondas de presión iniciadas por la emisión de energía de las partículas absorbentes cuando son iluminadas por una fuente de luz. Esto permite una medición directa de la absorción de los aerosoles sin necesidad de asumir propiedades ópticas. [12]

El PAX también incluye una cámara de dispersión basada en la técnica de nefelometría. Este sistema mide la luz dispersada por las partículas de aerosol en un rango angular de 6° a 174°. A partir de estas mediciones de dispersión, el PAX puede determinar el coeficiente de dispersión de los aerosoles. [12]

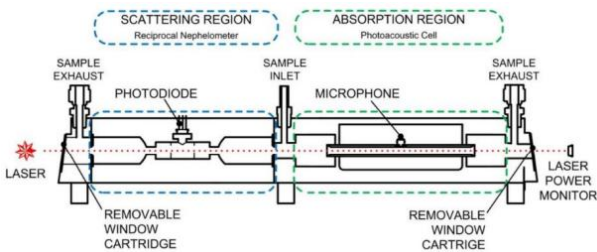


Ilustración 2 Medición de absorción y dispersión de luz [11]

2. Experimentación

Se llevó a cabo la comprensión del funcionamiento del Photoacoustic Extinctionmeter (PAX) y los principios teórico-metodológicos asociados a su aplicación en la medición de aerosoles atmosféricos. Estas actividades se realizaron en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y en la Facultad de Ciencias, ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Como parte del estudio, se analizaron datos recolectados durante los meses de febrero y marzo en dos zonas:

- 1. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.
- 2. Observatorio atmosférico Altzomoni, UNAM, Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.



Ilustración 3. Ciudad Universitaria [13]



Ilustración 4. Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl [14]

Los conjuntos de datos fueron proporcionados por el Dr. Harry Álvarez Ospina, a partir de la extracción de datos obtenidas por el equipo PAX. Estos conjuntos serían analizados utilizando Scripts en Python.

2.1. Ciudad Universitaria

El primer conjunto de datos correspondía al periodo del 20 de enero del 2025 al 1 de marzo del mismo año, con el equipo PAX ubicado en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM.

El archivo contaba con un total de 11808 datos, en los cuales teníamos las columnas referentes a las mediciones de los coeficientes de absorción y dispersión a 532 y 870 nm, por lo que contábamos con 5 columnas incluyendo la fecha.

Tabla 1. Valores faltantes por columna en el conjunto de datos de Ciudad Universitaria.

Fecha	0
Bscat-PAX-532	1284
Babs-PAX-532	1284
Bscat-PAX-870	25
Babs-PAX-870	25

Lo primero que se realizo fue darle formato temporal a la primera columna y luego ordenar todo el conjunto en relación con el tiempo. En este caso se decidió realizar para asegurar que los datos se encontraran en orden temporal.

Se pasaron todos los valores nulos a 0, esto para poder realizar operaciones mediante la utilización de Numpy. Después de esto se convertirían todos los valores negativos a 0.

Para filtrar los datos que contaban con anomalías se obtuvo la media y la desviación estándar de cada columna, el método de limpieza de datos identifica y elimina valores atípicos que están a más de 3 desviaciones estándar de la media. Luego de esto se calcularon los coeficientes de extinción, albedo y visibilidad, tanto para 532 como para 870 nm. Esto mediante las ecuaciones (2), (3) y (4). Este procedimiento se realizaba si y solo si, tuviéramos el dato de absorción y dispersión. A continuación, pasamos todos los valores correspondientes a 0 y  $\pm\infty$  a NA, lo cual representa un valor faltante o no disponible en el conjunto de datos.

Con esto logramos tener un archivo listo para analizar y graficar los resultados.

2.2. Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Este conjunto contaba con 20 archivos, los correspondían del día 10 de febrero del 2025 al 1 de marzo del mismo año, con el equipo PAX ubicado en la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Todos los archivos contenían 1344 datos, excepto uno que tenía 1345. Por ello, se realizó la concatenación de todos ellos y se convirtió la primera columna de fechas al formato de tiempo, con el fin de ordenar un único archivo con 26,881 datos en orden cronológico. A diferencia del primer conjunto, este solo incluía los valores de absorción y dispersión para 870 nm, así como columnas adicionales de extinción, albedo y visibilidad. No obstante, estas últimas fueron eliminadas, quedando finalmente un archivo con tres columnas: fecha, absorción y dispersión.

Tabla 2. Valores faltantes por columna en el conjunto de datos de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Fecha	0
Bscat-PAX-870	0
Babs-PAX-870	0

La limpieza de datos se continuo de la misma forma que se comentó para el conjunto anterior, pero trabajando únicamente con datos de 870nm.

3. Resultados y análisis

Ya contando con ambos conjuntos de datos en el formato requerido, de decidió graficar la serie temporal de todas las fechas, el promedio de por hora, el promedio por día de la semana y el promedio por mes. A partir de esto se realizará un análisis de los resultados obtenidos, tanto para el conjunto de ciudad universitaria, como para el conjunto de la reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

3.1. Ciudad Universitaria

A continuación, se muestran las gráficas de las series temporales obtenidas del conjunto del periodo del 20 de enero del 2025 al 1 de marzo del mismo año en Ciudad Universitaria:

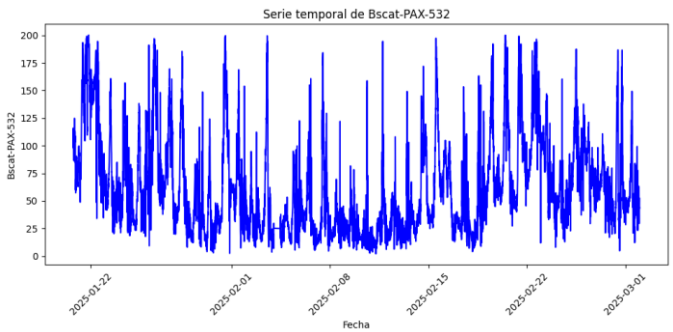


Ilustración 5. Serie temporal de dispersión a 532 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.

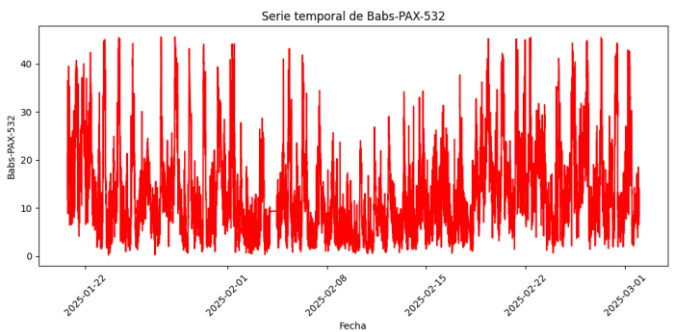
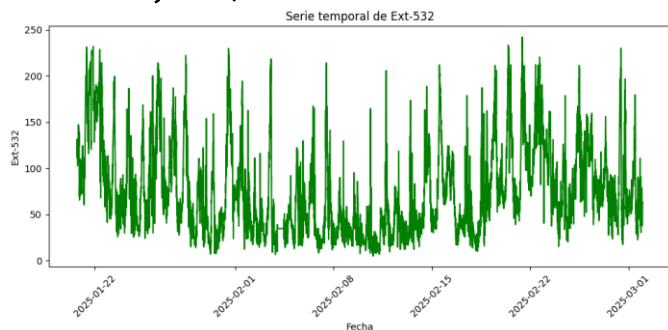
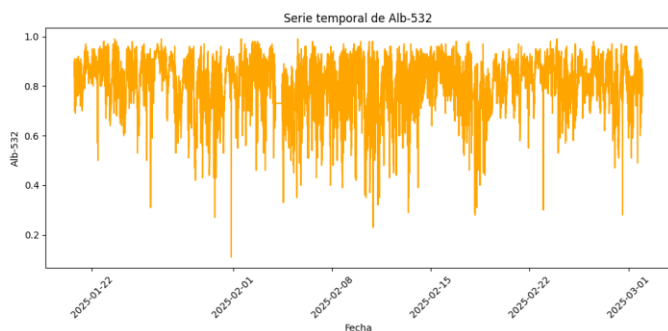


Ilustración 6. Serie temporal de absorción a 532 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.

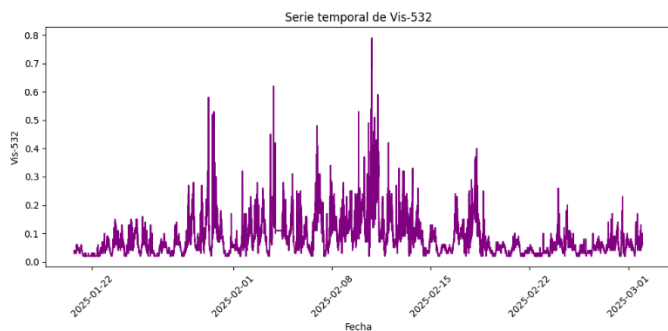




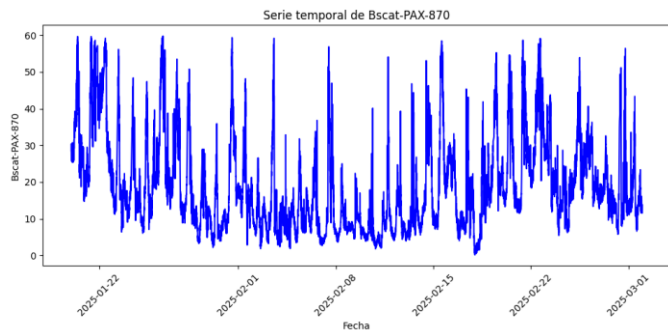
*Ilustración 7. Serie temporal de extinción a 532 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.*



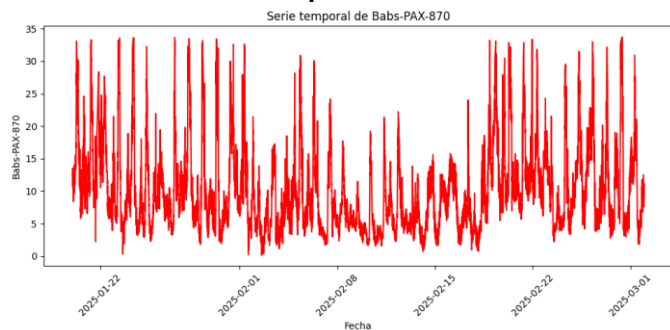
*Ilustración 8. Serie temporal de albedo a 532 nm del conjunto de Ciudad Universitaria*



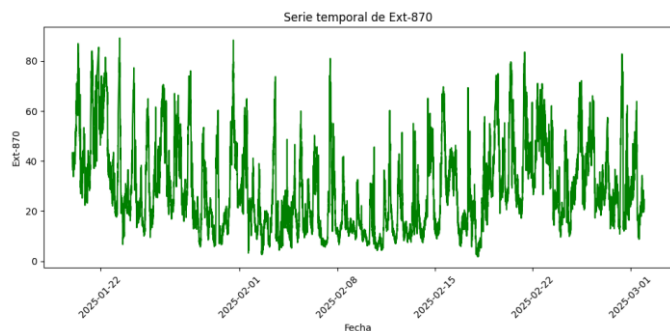
*Ilustración 9. Serie temporal de visibilidad a 532 nm del conjunto de Ciudad Universitaria*



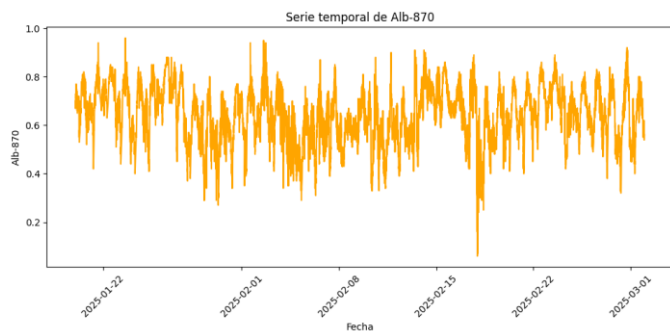
*Ilustración 10. Serie temporal de dispersión a 870 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.*



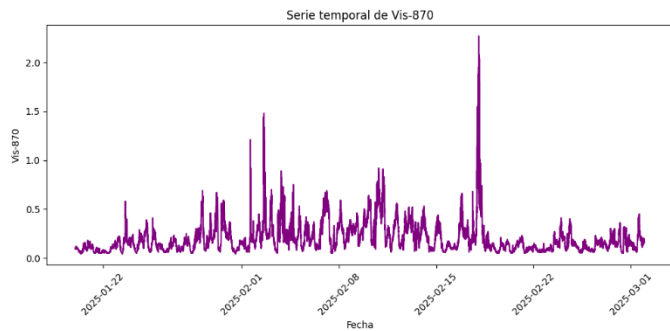
*Ilustración 11. Serie temporal de absorción a 870 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.*



*Ilustración 12. Serie temporal de extinción a 870 nm del conjunto de Ciudad Universitaria.*



*Ilustración 13. Serie temporal de albedo a 870 nm del conjunto de Ciudad Universitaria*



*Ilustración 14. Serie temporal de visibilidad a 870 nm del conjunto de Ciudad Universitaria*

S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

En las tablas 3 y 4 podemos apreciar a más detalle los valores de máximos y mínimos para 532 nm y 870 nm respectivamente, para cada columna.

Tabla 3. Valores de interés para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm.

	Máximo	Mínimo	Media
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	200.18	2.096	63.14
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	45.6	0.222	12.86
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	242.14	4.94	76.01
Albedo [Adimensional]	0.99	0.11	0.81
Visibilidad [km]	0.79	0.02	0.08

Tabla 4. Valores de interés para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm.

	Máximo	Mínimo	Media
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	59.76	0.211	18.35
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	33.74	0.136	9.63
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	89.2	1.72	27.98
Albedo [Adimensional]	0.96	0.06	0.64
Visibilidad [km]	2.27	0.04	0.21

Comparando los valores obtenidos en las tablas 3 y 4, podemos notar que fueron mayores para 532 nm en cada una de las tres columnas mostradas. Además, en la ilustración 14 se observa que hay valores que sobresalen significativamente en la gráfica de visibilidad para 870 nm el día 18 de febrero, siendo esta anomalía más evidente en dicha gráfica, aunque está presente en todo el conjunto, como vemos en los valores mínimos de las tablas. A primera vista, podría pensarse que se trata de un problema relacionado con la limpieza de datos, posiblemente debido a una falla del PAX al capturar la información, cuestión que abordaremos más adelante con mayor detalle. Para profundizar en esta comparación, se pueden graficar las dispersiones y absorciones, considerando que los

Reporte de laboratorio rotativo

valores de extinción, albedo y visibilidad derivan directamente de estos.

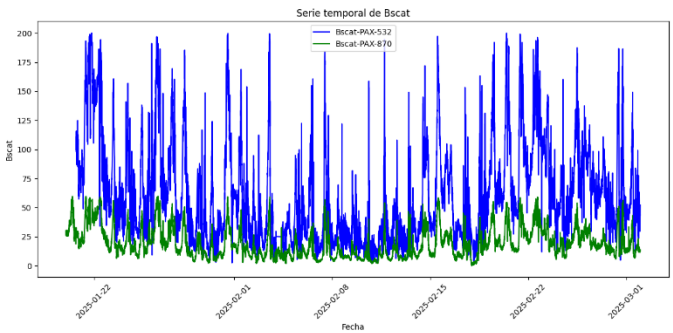


Ilustración 15. Comparación de serie temporal de las dispersiones del conjunto de Ciudad Universitaria. En azul tenemos para 532 nm y en verde para 870 nm.

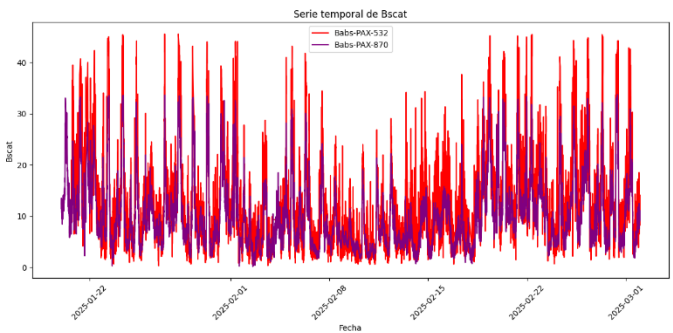
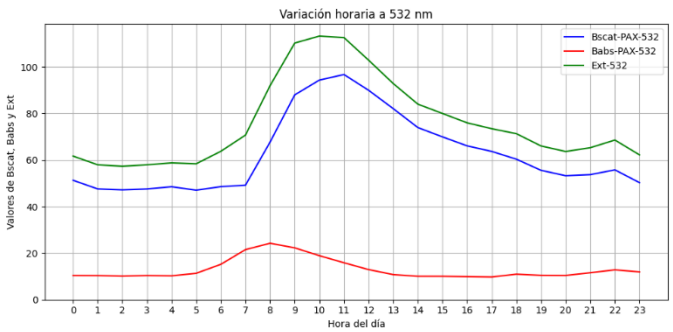


Ilustración 16. Comparación de serie temporal de las absorciones del conjunto de Ciudad Universitaria. En rojo tenemos para 532 nm y en morado para 870 nm.

3.1.1. Promedio por hora (Ciudad Universitaria)

Podemos obtener el promedio de cada columna para cada hora del día, en las ilustraciones a continuación se realizan las gráficas.



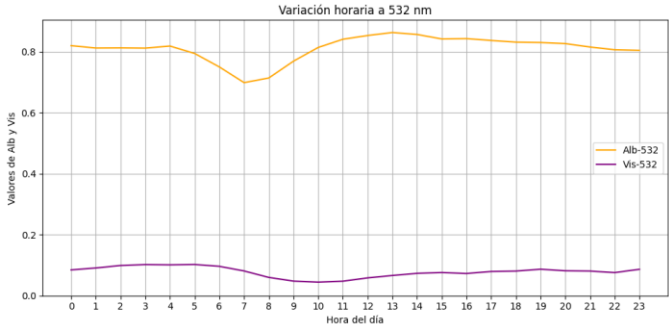


Ilustración 17. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 540 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

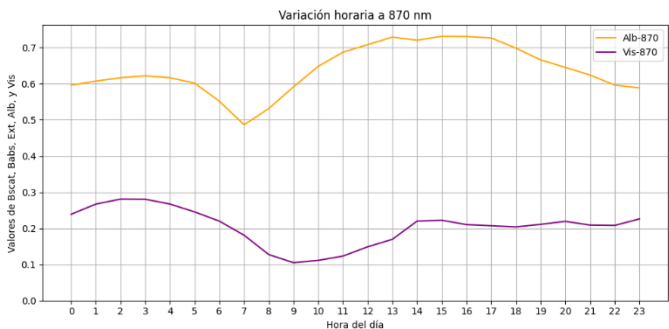
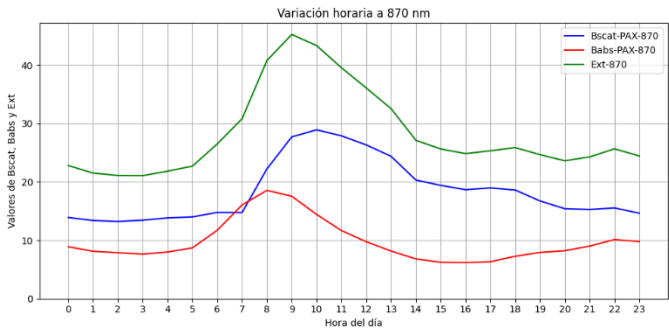


Ilustración 18. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

En las siguientes tablas podemos apreciar los valores máximos y mínimos para cada columna.

Tabla 5. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm

	Máx.	Mín.
Dispersión [ $Mm^{-1}$ ]	96.68 a las 11	47.02 a las 5
Absorción [ $Mm^{-1}$ ]	24.23 a las 8	9.75 a las 17
Extinción [ $Mm^{-1}$ ]	113.19 a las 10	57.29 a las 2
Albedo	0.86 a las 13	0.69 a las 7

[Adimensional]		
Visibilidad [km]	0.1 a las 5	0.04 a las 10

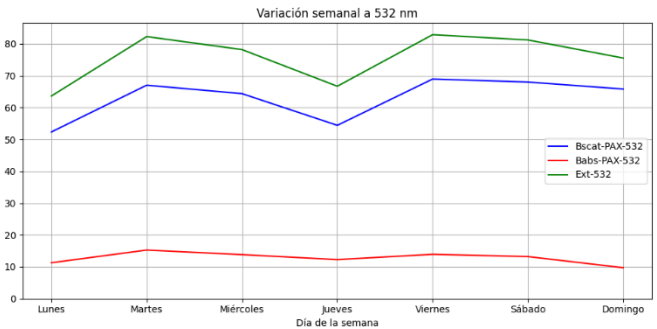
Tabla 6. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm

	Máx.	Mín.
Dispersión [ $Mm^{-1}$ ]	28.92 a las 10	13.22 a las 2
Absorción [ $Mm^{-1}$ ]	18.55 a las 8	6.18 a las 16
Extinción [ $Mm^{-1}$ ]	45.26 a las 9	21.08 a las 3
Albedo	0.73 a las 15	0.48 a las 7
[Adimensional]		
Visibilidad [km]	0.28 a las 2	0.1 a las 9

Como podemos ver, los valores más altos de dispersión se presentan por la mañana, antes del mediodía, mientras que los más bajos ocurren durante la madrugada, entre las 2 y 5 de la mañana. En cuanto a la absorción, sus valores máximos se registran unas horas antes del pico de dispersión, y los mínimos entre las 2 y 6 de la tarde. La extinción, al ser la suma de dispersión y absorción, sigue un comportamiento similar al de la dispersión, ya que esta última predomina en la combinación. Esto mismo se refleja en el albedo, cuyos valores se acercan más a 1, indicando una mayor proporción de dispersión en la interacción de la radiación con la atmósfera.

### 3.1.2. Promedio por día de la semana (Ciudad Universitaria)

Ahora veamos el promedio de cada columna para cada día de la semana, en las ilustraciones a continuación se realizan las gráficas.





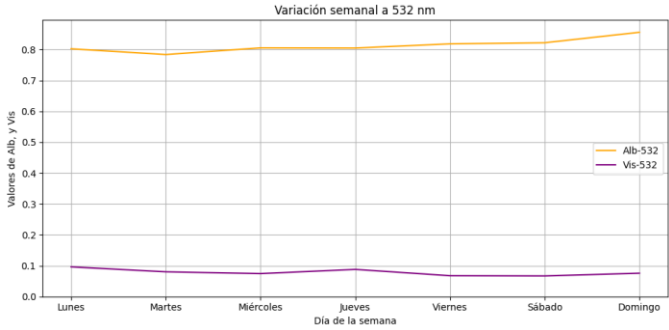


Ilustración 19. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

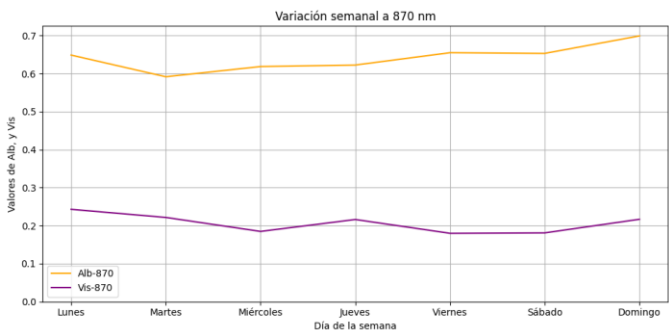
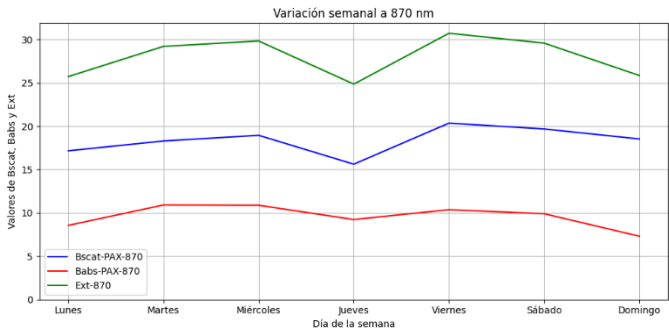


Ilustración 20. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

En las siguientes tablas podemos apreciar los valores máximos y mínimos para cada columna.

Tabla 7. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm

	Máx.	Mín.
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	68.94 en vie.	52.33 en lun.
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	15.26 en mar.	9.72 en dom.
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	82.86 en vie.	63.61 en lun.
Albedo	0.85 en dom.	0.78 en mar.

[Adimensional] Visibilidad [km]	0.09 en lun.	0.06 en sáb.
---------------------------------------	--------------	--------------

Tabla 8. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm

	Máx.	Mín.
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	20.34 en vie.	15.61 en jue.
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	10.91 en mar.	7.31 en dom.
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	30.71 en vie.	24.84 en jue.
Albedo [Adimensional]	0.69 en dom.	0.59 en mar.
Visibilidad [km]	0.24 en lun.	0.18 en vie.

Observamos que, en el caso de los valores máximos, estos coinciden en un mismo día para ambas longitudes de onda; sin embargo, en lo que respecta a los valores mínimos, no se presenta ninguna coincidencia entre ellas.

### 3.1.3. Promedio por mes (Ciudad Universitaria)

Ahora veamos el promedio de cada columna para cada mes del año, en las ilustraciones a continuación se realizan las gráficas.

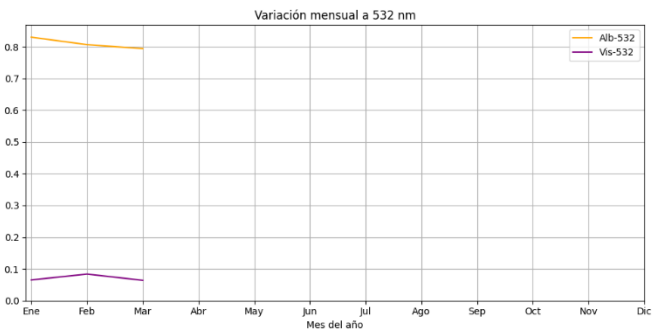
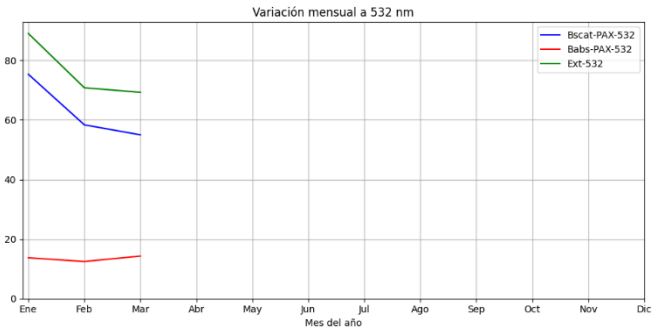


Ilustración 21. Valores promedio de cada mes para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

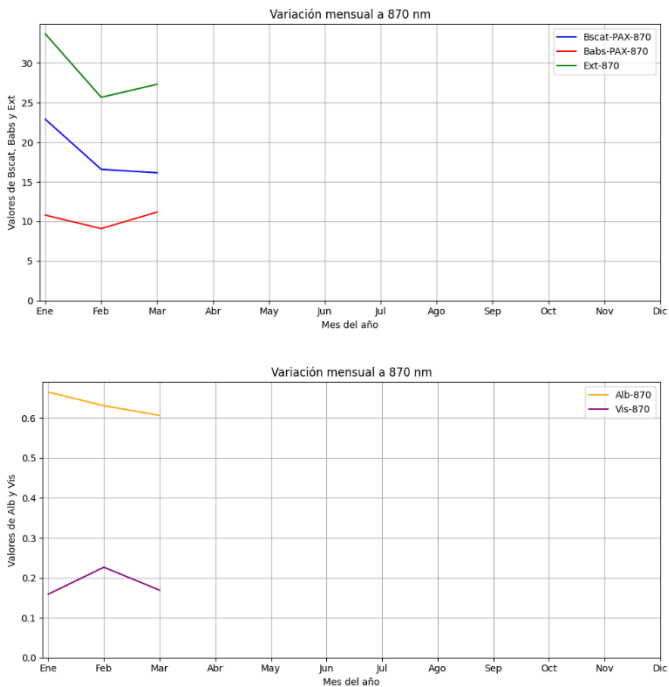


Ilustración 22. Valores promedio de cada mes para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

En las siguientes tablas podemos apreciar los valores de cada mes para cada columna.

	Enero	Febrero	Marzo
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	75.32	58.35	54.99
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	13.7	12.46	14.28
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	89.03	70.8	69.27
Albedo [Adimensional]	0.83	0.81	0.79
Visibilidad [km]	0.06	0.08	0.06

	Enero	Febrero	Marzo
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	22.89	16.57	16.14
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	10.79	9.09	11.17
Extinción	33.69	25.67	27.32

	Reporte de laboratorio rotativo		
[Mm <sup>-1</sup> ]			
Albedo	0.66	0.63	0.61
[Adimensional]			
Visibilidad	0.16	0.23	0.17
[km]			

Si bien se contó con una cantidad limitada de datos para realizar un análisis mensual que permita estudiar los cambios a lo largo del año, se observa que en enero se registraron valores significativamente más altos de dispersión y absorción en comparación con febrero y marzo, cuyos valores resultaron ser bastante similares entre sí. Esto para ambas longitudes de onda.

### 3.2. Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl

A continuación, se muestran las gráficas de las series temporales obtenidas del conjunto del periodo del 10 de febrero del 2025 al 1 de marzo del mismo año en la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl:

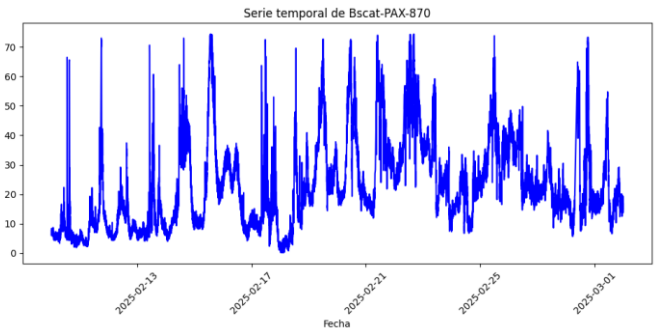


Ilustración 23. Serie temporal de dispersión a 870 nm del conjunto de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

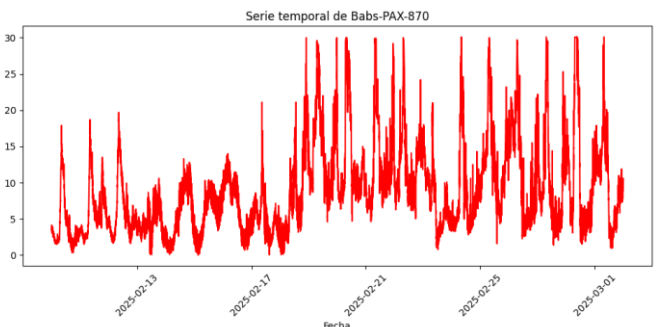


Ilustración 24. Serie temporal de absorción a 870 nm del conjunto de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl

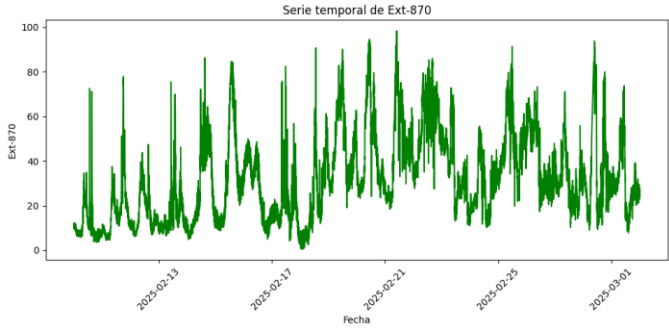


Ilustración 25. Serie temporal de extinción a 870 nm del conjunto de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl

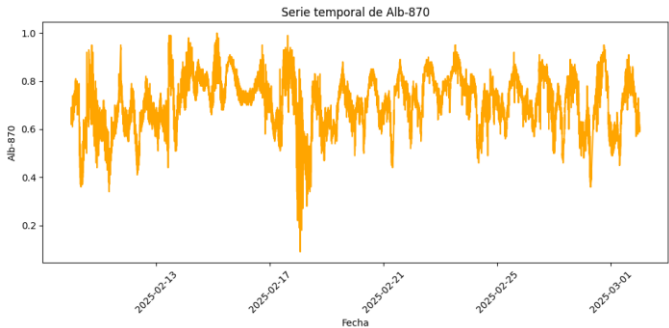


Ilustración 26. Serie temporal de albedo a 870 nm del conjunto de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

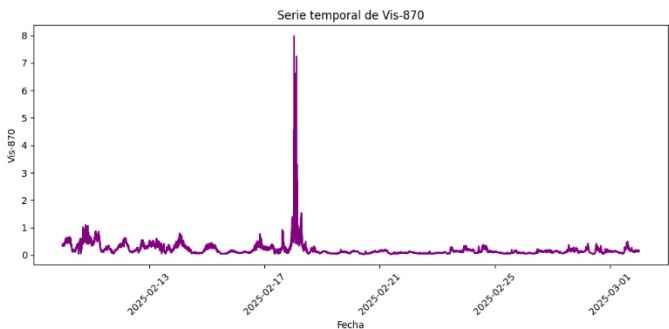


Ilustración 27. Serie temporal de visibilidad a 870 nm del conjunto de la reserva natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

En las siguiente tabla podemos apreciar a más detalle los valores de máximos y mínimos para 870 nm, para cada columna.

Tabla 11. Valores de interés para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm.

	Máximo	Mínimo	Media
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	74.4	0.09	22.49
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	30.1	0.01	8.48
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	98.3	0.49	30.98
Albedo	1.0	0.09	0.71

<i>[Adimensional]</i>			
<i>Visibilidad</i> <i>[km]</i>	7.98	0.04	0.2

Nuevamente podemos observar que los valores de mínimo son muy drásticos, lo que se ve reflejado en la ilustración 27, donde hay valores que sobresalen significativamente en la gráfica de visibilidad para 870 nm el día 18 de febrero, siendo esta la misma anomalía observada para el equipo PAX de ciudad universitaria en el mismo día. Por lo que esto evidencia un acontecimiento climatológico o intervención humana y no un error de limpieza de datos.

3.2.1. Promedio por hora (Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl)

Podemos obtener el promedio de cada columna para cada hora del día, en la ilustración a continuación se realiza las gráfica.

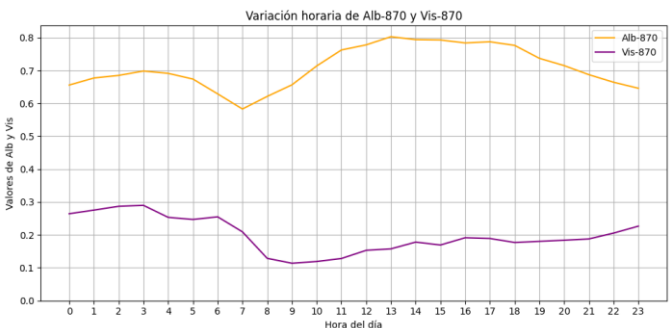
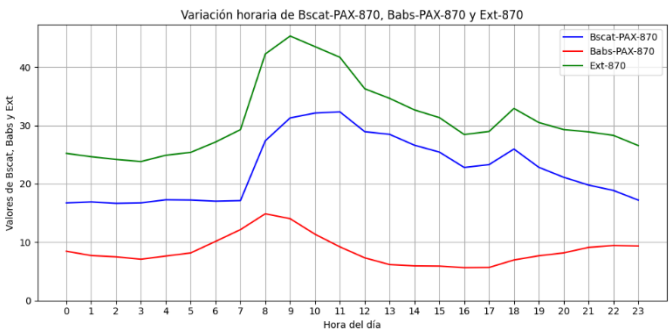


Ilustración 28. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

En las siguiente tabla podemos apreciar los valores máximos y mínimos para cada columna.

S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

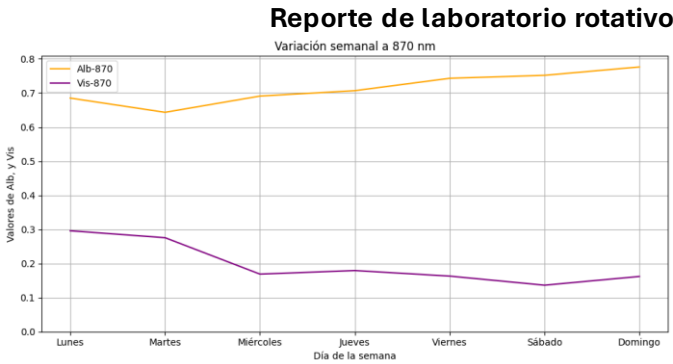
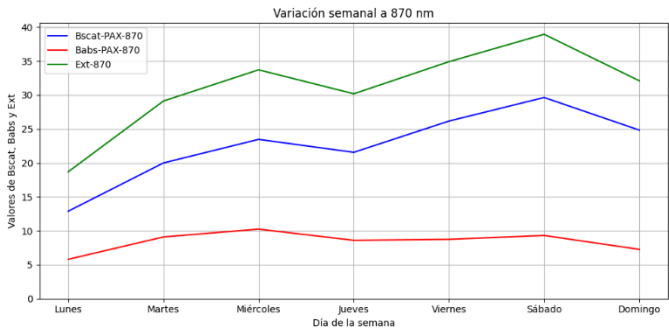
**Tabla 12. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada hora del día para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm**

	Máx.	Mín.
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	32.32 a las 11	16.89 a las 1
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	14.86 a las 8	5.63 a las 16
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	45.31 a las 9	23.81 a las 3
Albedo [Adimensional]	0.8 a las 13	0.58 a las 7
Visibilidad [km]	0.29 a las 3	0.11 a las 9

Se observa que los niveles más altos de dispersión ocurren durante las horas de la mañana, antes del mediodía, mientras que los más bajos se presentan en la madrugada, aproximadamente entre las 12 y las 4 a.m. En el caso de la absorción, los valores máximos se alcanzan unas horas antes del pico de dispersión, y los mínimos se sitúan entre el mediodía y las 5 de la tarde. La extinción, al resultar de la suma entre dispersión y absorción, muestra una tendencia similar a la de la dispersión, dado que esta tiene un mayor peso en el total. Esta relación también se evidencia en el albedo, cuyos valores tienden a acercarse a 1, lo que indica una predominancia de la dispersión en la interacción de la radiación con la atmósfera.

### 3.2.2. Promedio por día de la semana (Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl)

Pasemos a ver el promedio de cada columna para cada día de la semana, en la ilustración a continuación se realizan la gráficas.



**Ilustración 29. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm.** Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad.

En la siguiente tabla podemos apreciar los valores máximos y mínimos para cada columna.

**Tabla 13. Valores de máximos y mínimos del promedio de cada de cada día de la semana para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm**

	Máx.	Mín.
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	29.63 en sáb.	12.88 en lun.
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	10.24 en mié.	5.8 en lun.
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	38.94 en sáb.	18.69 en lun.
Albedo [Adimensional]	0.77 en dom.	0.64 en mar.
Visibilidad [km]	0.29 en lun.	0.13 en sáb.

Podemos notar que es muy similar la forma de la grafica a la mostrada en la ilustración 20. Sin embargo, se tienen picos de máximos y mínimo un poco variados. Sin embargo, la similitud de tener un descenso en el jueves de mantiene.

### 3.2.3. Promedio por mes (Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl)

Ahora veamos el promedio de cada columna para cada mes del año, en la ilustración a continuación se realizan las gráficas.

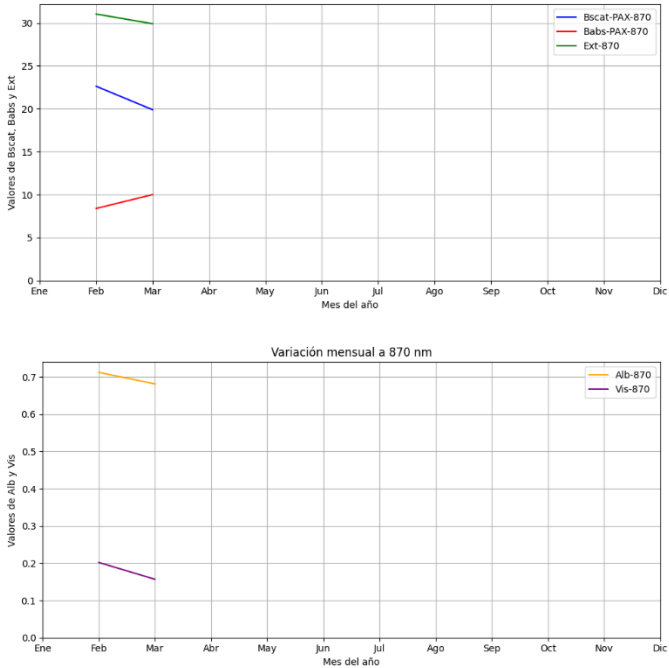


Ilustración 30. Valores promedio de cada mes para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm. Azul – dispersión, rojo – absorción, verde – extinción, naranja – albedo, morado – visibilidad

En las siguientes tablas podemos apreciar los valores de cada mes para cada columna.

Tabla 14. Valores promedio de cada mes para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm

	Febrero	Marzo
Dispersión [Mm <sup>-1</sup> ]	22.63	19.9
Absorción [Mm <sup>-1</sup> ]	8.4	10.01
Extinción [Mm <sup>-1</sup> ]	31.03	29.91
Albedo [Adimensional]	0.71	0.68
Visibilidad [km]	0.20	0.16

En este caso, se dispone de aún menos datos correspondientes a distintos meses, por lo que las conclusiones son limitadas; sin embargo, puede señalarse que ambos meses presentan resultados muy similares entre sí.

#### 4. Discusión de resultados

El objetivo principal de esta práctica fue interpretar los resultados obtenidos a partir de las

#### Reporte de laboratorio rotativo

mediciones realizadas con el equipo PAX. Por ello, en esta sección se destacarán los aspectos más relevantes y se brindarán posibles justificaciones que expliquen por qué se obtuvieron dichos resultados.

En la tablas 3 y 4, apreciamos que los valores de dispersión y absorción de partículas PM2.5 para ciudad universitaria, son más intensas a 532 nm que a 870 nm. Esto puede ser debido a la dependencia de la longitud de onda. La dispersión de la luz por partículas pequeñas es más eficiente a longitudes de onda más cortas. Este fenómeno, conocido como dispersión de Rayleigh, implica que la luz azul (longitud de onda más corta) se dispersa más que la luz roja (longitud de onda más larga). Por lo tanto, a 532 nm (verde), la dispersión es más pronunciada que a 870 nm (infrarrojo cercano). [15]

Además, esto concuerda con los mencionado en el artículo “Carbonaceous particles and PM2.5 optical properties in Mexico City during the ACU15 campaign”, donde se nos menciona que las partículas de PM2.5 contienen carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC). Los estudios realizados en la Ciudad de México mostraron que la eficiencia de absorción de masa (MAE) varía con la proporción OC/EC y la longitud de onda. Se encontró que los valores de MAE son mayores a 532 nm que a 870 nm, indicando una absorción más eficiente a la longitud de onda más corta. [16]

También es posible reconocer en las ilustraciones para 870 nm de ambas regiones una diferencia, pues los valores de absorción fueron más altos en la zona urbana (Ciudad Universitaria) a comparación de la zona rural (Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl). Esto es debido a que en las ciudades hay más vehículos, industrias, construcciones y otras fuentes que emiten partículas (aerosoles) y gases contaminantes al ambiente.

Además de que, las partículas en suspensión, como el hollín, el polvo, la ceniza y los compuestos orgánicos volátiles, contribuyen significativamente al aumento de la absorción y dispersión de la radiación solar [17]. No obstante, según el reporte mensual del volcán Popocatepetl correspondiente a enero de 2025, en comparación con diciembre de 2024 se observó una disminución en la actividad volcánica: el tremor se redujo, al igual que las emisiones de gases y ceniza, aunque se registró un ligero aumento en el número de exhalaciones. A pesar de ello, se concluye que la



### S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

actividad continúa bajo un régimen de conducto abierto, lo que indica una relativa estabilidad [18]. Por su parte, el informe de febrero reporta una disminución adicional en la actividad respecto a enero, reflejada en una baja en los registros de tremor, eventos de periodo largo y emisiones de ceniza. En contraste, se observó un aumento en los eventos volcanotectónicos, aunque las manifestaciones siguen enmarcándose en un régimen de conducto abierto [19]. Finalmente, en marzo se mantuvo una actividad similar a la de febrero, destacando la constancia en la frecuencia de los eventos de periodo largo y otros parámetros relacionados [20]. Siendo todo este un argumento que apoya aún más el planteamiento de el haber obtenido valores más altos para el caso de la ciudad.

Ahora vamos a comentar lo sucedido el día 18 de febrero del 2025, en el cual es apreciable valores anormales en comparación con el resto de los días. Sin embargo, esta complicación no fue debido a una causa de la limpieza de datos, pues esto termino siendo descartado al obtener la misma anomalía para diferentes equipo en diferentes ubicaciones. Para obtener información más precisa y enfocada, tendremos que realizar una comparación con datos de alguna otra estación que cuente con un equipo similar y que podemos obtener ese mismo día. En base a eso existe dos casos:

1. No se obtiene la anomalía. Esto sería indicador de que en la madrugada del día 18 de febrero, fueron manipulados los equipos PAX, ya sea para obtención de datos, limpieza, correcciones; el punto es que esto habría provocado que no lograra trabajar de forma habitual y detectara esos valores tan bajos.
2. Se obtiene la anomalía. Este sería el caso más emocionante, pues quiere decir que no fue culpa del equipo y en realidad hubo algo diferente. Para este caso nos salimos mucho del tema a tratar de nuestro reporte, pero sería interesante seguir con dicha búsqueda para hallar una posible causa. Pues indicaría que el evento que causo la anomalía, contribuyo en limpiar el medio ambiente.

A continuación, se presentan las gráficas correspondientes a ese día, así como sus comparaciones con otro día del mismo mes. Esto se muestra tanto para ambas longitudes de onda en

### Reporte de laboratorio rotativo

Ciudad Universitaria como para los 870 nm en la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

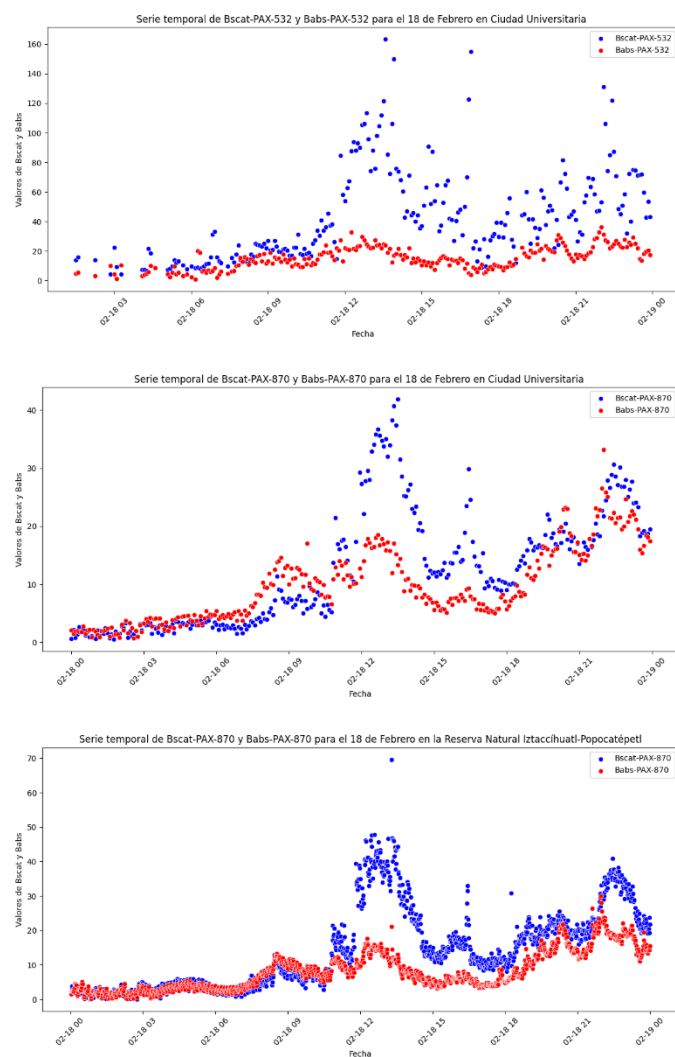
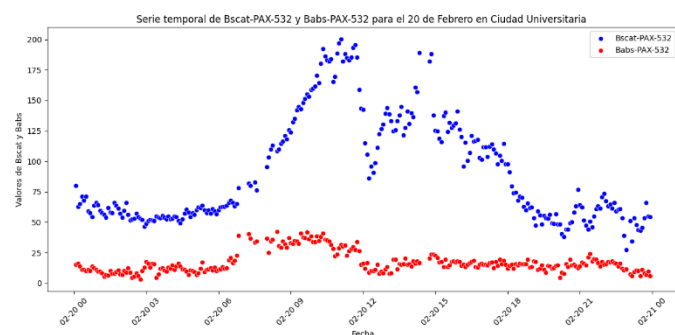


Ilustración 31. Series temporales de dispersión y absorción para el 18 de febrero.



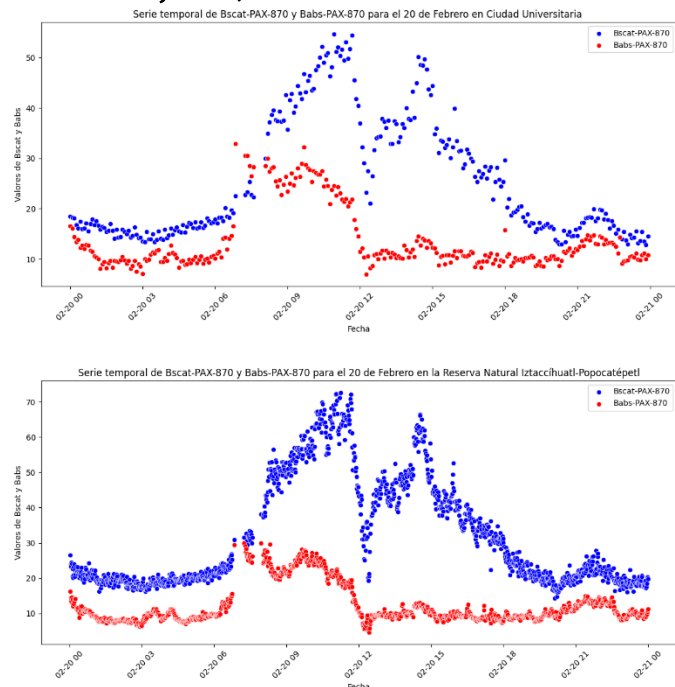


Ilustración 32. Series temporales de dispersión y absorción para el 20 de febrero.

Podemos observar que durante la madrugada del 18 de febrero se registraron valores significativamente bajos en los coeficientes de dispersión y absorción, en comparación con otros días, como por ejemplo el 20 de febrero. Precisamente esta sección de valores reducidos del día 18 es donde se identificaron las anomalías en las gráficas obtenidas en los resultados.

Por otro lado, es importante analizar la distribución observada el día 20 de febrero, ya que nos sirve como ejemplo para entender por qué se presentan diferencias a lo largo del día en los coeficientes de absorción y dispersión.

En este caso, notamos que a partir de las 6 de la mañana comienza un incremento en la absorción. Esto se debe al inicio de las principales actividades de combustión, como el aumento del tráfico vehicular y la operación de algunas industrias. Este incremento continúa hasta alcanzar un pico durante las horas pico matutinas, tras lo cual empieza a disminuir, probablemente porque la mayoría de las personas ya ha llegado a sus destinos laborales y se reduce la quema de combustibles asociada al tránsito.

Más adelante, se observan dos nuevos repuntes en la absorción, alrededor de las 14:00 y 20:00 horas, lo cual podría estar relacionado con el

regreso de las personas a sus hogares. Durante estos momentos, se intensifica nuevamente el uso de vehículos, lo que genera otro aumento en las emisiones de partículas absorbentes.

En cuanto a la dispersión, se espera que siga un comportamiento parcialmente distinto. Al inicio del día, durante la madrugada, la atmósfera suele estar más estable y fría, lo que limita la mezcla del aire y mantiene las partículas acumuladas cerca del suelo. Por eso, la dispersión en ese momento es baja. A medida que avanza la mañana y la temperatura aumenta, se desarrollan corrientes térmicas que mejoran la ventilación y mezcla vertical, facilitando así la dispersión de partículas.

Generalmente, la dispersión alcanza su punto máximo entre el mediodía y las primeras horas de la tarde, tal como se puede observar en las gráficas, cuando el calentamiento solar es más intenso y se favorece una mayor mezcla vertical de la atmósfera. Estas condiciones permiten que las partículas se mantengan suspendidas por más tiempo y se dispersen con mayor facilidad.

Además, se puede identificar un segundo pico de dispersión alrededor de las 14:00 horas en la zona urbana y cerca de las 15:00 horas en la Reserva Natural, lo cual podría estar asociado a nuevas emisiones derivadas de la actividad humana o industrial durante ese periodo. Otra posibilidad es que haya ocurrido una acumulación temporal de partículas en las capas bajas, las cuales fueron posteriormente redistribuidas por una turbulencia remanente o por cambios locales en la dirección del viento, generando ese repunte en la dispersión.

Al observar con mayor detalle las gráficas de ambas ubicaciones, notamos que la señal de Ciudad Universitaria es muy similar a la de la Reserva, pero desfasada aproximadamente una hora antes. Esta diferencia sugiere que probablemente las corrientes de viento transportaron las partículas desde la ciudad hacia la reserva, lo que explicaría el desfase temporal en las mediciones entre ambos sitios.

## 5. Conclusiones

Tras haber realizado la limpieza de datos usando Python, identificamos una anomalía. Sin embargo, al no saber aún si es problema del equipo o si en realidad sucedió esta, podemos decir que el equipo PAX y los

códigos han trabajado de forma exitosa, pues las siguientes conclusiones respaldan dicha información:

Se concluyo que los valores de dispersión y absorción de partículas PM<sub>2.5</sub> para ciudad universitaria, son más intensas a 532 nm que a 870 nm. Debido a que a 532 nm (verde), la dispersión es más pronunciada que a 870 nm (infrarrojo cercano). Además de que llegamos al mismo resultado del artículo "Carbonaceous particles and PM<sub>2.5</sub> optical properties in Mexico City during the ACU15 campaign" [16], el cual encontró que los valores de absorción son mayores a 532 nm que a 870 nm

En relación con las dos regiones se concluye que tuvimos valores más altos de dispersión en la reserva, debido a deberse a aerosoles volcánicos, en zonas volcánicas predominan partículas como: Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) formados a partir de SO<sub>2</sub> emitido por fumarolas o suelos ácidos y Silicatos finos (de ceniza erosionada) que, aunque son PM<sub>2.5</sub>, tienen alta reflectividad. Faltaría ver la composición o ver otras causas. Mientras que la absorción fue mayor para la ciudad, lo cual es evidente debido a que hay más vehículos, industrias, construcciones y otras fuentes que emiten partículas y gases contaminantes al ambiente.

Con respecto al promedio por día y las gráficas de cada día, se logro identificar el comportamiento de la grafica esperado, el cual corresponden a la actividad humana. Al analizar los picos y sus descensos, observamos las horas claves que corresponden a las mayores emisiones de contaminantes por la actividad humana, además de que justo cuando no hay actividad de personas (la madrugada) se tenían valores más bajos de contaminantes.

Para los promedios semanales se identificó que contábamos con caídas los lunes o jueves, aunque menores al 14%. Durante el promedio semanal los valores resultan más altos los fines de semana, con un valor máximo los sábados, mínimo los lunes, aumentando durante la semana con una pequeña caída los jueves al igual que el caso de la ciudad de México.

Para el caso mensual fue posible identificar que de enero a febrero se tiene una descenso en el coeficiente de dispersión para ambos equipo. Se nos comento que esto es debido a que empiezan las temporadas de vientos, lo cual provoca que se limpie nuestra

atmósfera. Por su parte para la absorción logramos identificar que para ciudad universitaria se tenía una gran diferencia entre el mes de enero y los meses de febrero y marzo. Esto puede que se deba a que el mes de enero es muy diferente, pues cuenta con un periodo vacacional y viene de muchas celebridades a causa del año nuevo. Mientras que febrero y marzo son meses muy similares.

Tras estos resultados y observaciones, podemos concluir que la realización de esta practica ha sido un éxito. La elaboración de la limpieza de datos y las gráficas, han sido parte fundamental para cumplir el objetivo. Hemos logrado identificar varias cosas a mejorar y a estudiar, pero sobre todo hemos comprendido el tema y fuimos capaces de obtener conclusiones de nuestro análisis.

## 6. Referencias

- [1] Tsai, H.-J., Wu, P.-Y., Huang, J.-C., & Chen, S.-C. (2021). Environmental Pollution and Chronic Kidney Disease. *International Journal of Medical Sciences*, 18(5), 1121–1129. <https://doi.org/10.7150/ijms.51594>
- [2] Viana, M., Querol, X., & Alastuey, A. (2006). Chemical characterisation of PM episodes in NE Spain. *Chemosphere*, 62(6), 947–956. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.048>
- [3] Ahmed, S., & Arocho, I. (2018). Emission of particulate matters during construction: A comparative study on a Cross Laminated Timber (CLT) and a steel building construction project. *Journal of Building Engineering*, 22, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.015>
- [4] Chiriaco, M. S., Rizzato, S., Primiceri, E., Spagnolo, S., Monteduro, A. G., Ferrara, F., & Maruccio, G. (2018). Optimization of SAW and EIS sensors suitable for environmental particulate monitoring. *Microelectronic Engineering*, 202, 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.10.008>
- [5] Shalaby, A. M., Othman, N. S., & Shalaby, M. (2024). Advanced chirped spectral modulation technique and particle swarm optimization algorithms for effective indoor air pollution detection and monitoring. *Alexandria Engineering Journal*, 95, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.023>
- [6] de, C. (2006). *Ley de Beer-Lambert*. Wikipedia.org; Wikimedia Foundation, Inc. [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Beer-Lambert](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Beer-Lambert)

- [7] Huang, Y., Jie, W., & Gangqiang Zha. (2012). Band gap, electronic and optical properties of Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>S: An ab initio study. *Journal of Alloys and Compounds*, 555, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.201>
- [8] Chang, D., Song, Y., & Liu, B. (2009). Visibility trends in six megacities in China 1973–2007. *Atmospheric Research*, 94(2), 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.05.006>
- [9] Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (1983). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley.
- [10] Zhu, C.-S., Cao, J.-J., Ho, K.-F., Antony Chen, L.-W., Huang, R.-J., Wang, Y.-C., Li, H., Shen, Z.-X., Chow, J. C., Watson, J. G., Su, X., Wang, Q., & Xiao, S. (2015). The optical properties of urban aerosol in northern China: A case study at Xi'an. *Atmospheric Research*, 160, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.008>
- [11] DMT. (2020). PAX Photoacoustic Extinctionmeter User Manual. Droplet Measurement Technologies.
- [12] Zawadzka, O., Posyniak, M., Nelken, K., Markuszewski, P., Chilinski, M. T., Czyzewska, D., Lisok, J., & Markowicz, K. M. (2017). Study of the vertical variability of aerosol properties based on cable cars in-situ measurements. *Atmospheric Pollution Research*, 8(5), 968–978. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.03.009>
- [13] Ciudad Universitaria. (2025). Flickr; Ciudad Universitaria | Ciudad Universitaria en México, DF. P... | Flickr. [https://www.flickr.com/photos/hotu\\_matua/4543698300](https://www.flickr.com/photos/hotu_matua/4543698300)
- [14] Gómez, J. (2023, June 6). *Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*. Global National Parks. <https://www.globalnationalparks.com/es/mexico/iztaccihuatl-popocatepetl/>
- [15] to, C. (2004, October 14). *light scattering by particles in a colloid*. Wikipedia.org; Wikimedia Foundation, Inc. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tyndall\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Tyndall_effect)
- [16] Santiago-de la Rosa, N., Prieto, C., Pavia, R., Peralta, O., **Alvarez-Ospina, H.**, Saavedra, I., Castro, T., García, R., Espinosa, M. de la L., Ortinez-Alvarez, A., Ruíz-Suárez, G., & Martínez-Arroyo, A. (2024). Carbonaceous particles and PM<sub>2.5</sub> optical properties in Mexico City during the ACU15 campaign. *Atmósfera*, 38, 369–380. <https://doi.org/10.20937/atm.53270>
- [17] Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S., Sherwood, S., Zhang, X., Stocker, Q., Plattner, G.-K., Tignor, M.,

Allen, S., & Boschung, J. (2013). *of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter07\\_FINAL-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter07_FINAL-1.pdf)

- [18] de, N. (2025). *Reporte mensual del volcán Popocatepetl, enero de 2025*. Gob.mx. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/reportemensual-del-volcan-popocatepetl-enero-de-2025>
- [19] de, N. (2025). *Reporte mensual del volcán Popocatepetl, febrero de 2025*. Gob.mx. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/reportemensual-del-volcan-popocatepetl-febrero-de-2025>
- [20] de, N. (2025). *Reporte mensual del volcán Popocatepetl, marzo de 2025*. Gob.mx. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/reportemensual-del-volcan-popocatepetl-febrero-de-2025>

## 7. Anexo

### Kramers-Kronig relations

Las relaciones de Kramers-Kronig son un conjunto de ecuaciones matemáticas que relacionan la parte real y la parte imaginaria de una función compleja, como la constante dieléctrica  $\varepsilon(\omega)$  de un material.

La parte real de la constante dieléctrica,  $\varepsilon_1(\omega)$ , y la parte imaginaria,  $\varepsilon_2(\omega)$ , están relacionadas a través de las relaciones de Kramers-Kronig, que se expresan matemáticamente como:

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega') d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{(\varepsilon_1(\omega') - 1) d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (6)$$

Donde P denota el valor principal de la integral.

Estas relaciones permiten calcular la parte real de la constante dieléctrica a partir de la parte imaginaria, y viceversa, sin necesidad de realizar mediciones experimentales independientes de ambas cantidades.

[7]

### Ecuaciones para el índice de refracción y el coeficiente de extinción

Estas ecuaciones relacionan las partes real ( $n$ ) e imaginaria ( $k$ ) del índice de refracción complejo:

$$\tilde{n} = n + ik \quad (7)$$

### S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda

Con las componentes real  $\varepsilon_1$  e imaginaria  $\varepsilon_2$  de la constante dieléctrica compleja:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (8)$$

De modo que:

$$n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( [\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2]^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$k(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( [\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2]^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Estas relaciones surgen de la conexión entre el índice de refracción complejo y la constante dieléctrica compleja en un medio material:

$$\tilde{n}^2 = (n + ik)^2 = \varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (11)$$

$$n^2 - k^2 = \varepsilon_1, \quad 2nk = \varepsilon_2 \quad (12)$$

[7]

### PAX - External Features [11]



Ilustración 33 PAX Front Panel Features [11]

**Tabla 15. PAX Front Panel Features**

1	Power Switch
2	Touch-screen
3	Two USB ports

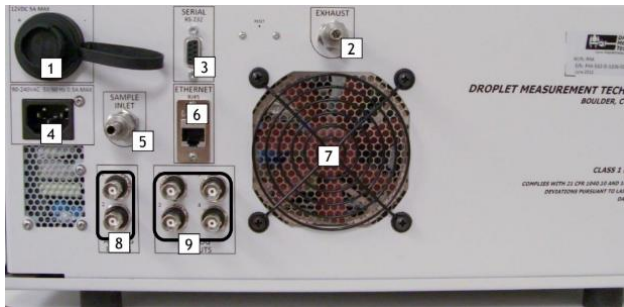


Ilustración 34 PAX Rear Panel Features [11]

**Tabla 16. PAX Rear Panel Features**

1	12V DC power connection
2	Exhaust—Swagelok® compression fitting for 1/4" tube
3	Nine-pin serial (RS-232) port

### Reporte de laboratorio rotativo

4	Power entry receptacle—AC (IEC C13)
5	Sample inlet—Swagelok® compression fitting for 1/4" tube
6	Ethernet port
7	Fan inlet
8	Analog Inputs (2X BNC)
9	Analog Outputs (4X BNC)

### PAX – Components [11]

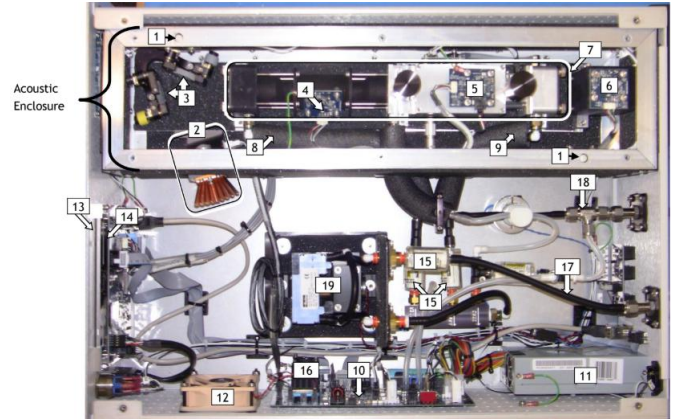


Ilustración 35. 870 nm PAX Interior with Components Labeled [11]

**Tabla 17. 870 nm PAX Interior with Components Labeled**

1	Laser interlock switches
2	Laser and mount
3	Laser mirrors
4	Scattering detector board
5	Microphone board
6	Laser power monitor
7	Cell
8	Nephelometer (scattering) flow
9	Absorption flow
10	Power distribution board
11	Power supply
12	Fan
13	Touchscreen display
14	Control board
15	Air filters
16	Laser driver
17	Exhaust line
18	Inlet line
19	Pump assembly



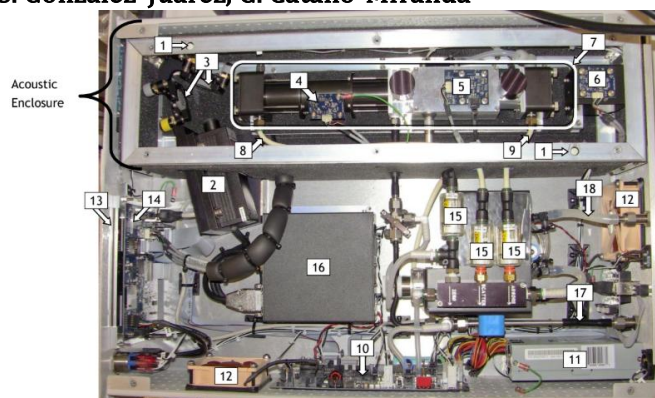


Ilustración 36. 532nm PAX Interior with Components Labeled [11]

**Tabla 18. 532nm PAX Interior with Components Labeled**

1	Laser interlock switches
2	Laser head
3	Laser mirrors
4	Scattering detector board
5	Microphone board
6	Laser power monitor
7	Cell
8	Nephelometer (scattering) flow
9	Absorption flow
10	Power distribution board
11	Power supply
12	Fans
13	Touchscreen display
14	Control board
15	Air filters
16	Laser power supply
17	Inlet line
18	Exhaust line

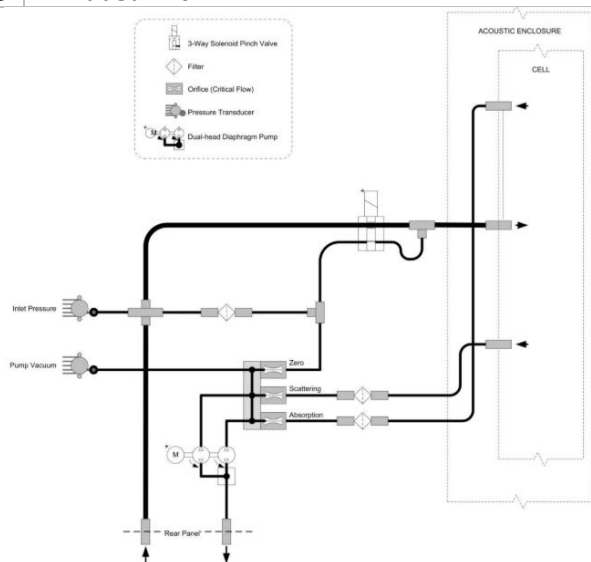


Ilustración 37 PAX flows. [11]

**Tabla 19. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 540 nm.**

Hr.	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
0	51.27	10.39	61.66	0.82	0.08
1	47.56	10.36	57.92	0.81	0.09
2	47.17	10.13	57.30	0.81	0.10
3	47.54	10.37	57.92	0.81	0.10
4	48.50	10.25	58.75	0.82	0.10
5	47.02	11.33	58.36	0.79	0.10
6	48.53	15.18	63.72	0.75	0.10
7	49.17	21.50	70.67	0.70	0.08
8	67.70	24.23	91.93	0.71	0.06
9	87.94	22.26	110.2	0.77	0.05
10	94.29	18.90	113.1	0.81	0.04
11	96.68	15.86	112.5	0.84	0.05
12	89.92	12.92	102.8	0.85	0.06
13	82.04	10.77	92.81	0.86	0.07
14	73.90	10.06	83.96	0.86	0.07
15	69.91	10.05	79.96	0.84	0.08
16	66.05	9.90	75.95	0.84	0.07
17	63.66	9.75	73.41	0.84	0.08
18	60.33	10.96	71.29	0.83	0.08
19	55.55	10.46	66.01	0.83	0.09
20	53.22	10.41	63.63	0.83	0.08
21	53.69	11.57	65.26	0.82	0.08
22	55.74	12.81	68.55	0.81	0.08
23	50.25	11.92	62.17	0.80	0.09

**Tabla 20. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm.**

Hr.	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
0	13.91	8.89	22.81	0.60	0.24
1	13.40	8.12	21.52	0.61	0.27
2	13.23	7.87	21.10	0.62	0.28
3	13.45	7.63	21.08	0.62	0.28
4	13.84	8.00	21.84	0.62	0.27
5	14.00	8.70	22.71	0.60	0.25
6	14.78	11.73	26.51	0.55	0.22

**S. González-Juárez, G. Cataño-Miranda**

7	14.76	16.06	30.82	0.49	0.18
8	22.23	18.55	40.79	0.53	0.13
9	27.71	17.55	45.27	0.59	0.11
10	28.92	14.44	43.36	0.65	0.11
11	27.90	11.67	39.57	0.69	0.12
12	26.34	9.76	36.10	0.71	0.15
13	24.39	8.17	32.55	0.73	0.17
14	20.32	6.81	27.13	0.72	0.22
15	19.42	6.23	25.65	0.73	0.22
16	18.67	6.18	24.85	0.73	0.21
17	18.98	6.33	25.33	0.73	0.21
18	18.61	7.27	25.88	0.70	0.20
19	16.74	7.93	24.67	0.67	0.21
20	15.41	8.22	23.62	0.65	0.22
21	15.28	9.01	24.29	0.62	0.21
22	15.54	10.13	25.67	0.60	0.21
23	14.65	9.79	24.44	0.59	0.23

**Tabla 21. Valores promedio de cada hora del día para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm.**

Hr.	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
0	16.73	8.45	25.21	0.66	0.26
1	16.90	7.71	24.64	0.68	0.28
2	16.65	7.49	24.18	0.69	0.29
3	16.73	7.08	23.82	0.70	0.29
4	17.26	7.63	24.89	0.69	0.25
5	17.22	8.16	25.38	0.67	0.25
6	17.02	10.14	27.16	0.63	0.25
7	17.12	12.15	29.27	0.58	0.21
8	27.37	14.87	42.23	0.62	0.13
9	31.29	14.02	45.31	0.66	0.11
10	32.12	11.36	43.49	0.71	0.12
11	32.32	9.20	41.67	0.76	0.13
12	28.93	7.32	36.28	0.78	0.15
13	28.47	6.16	34.63	0.80	0.16
14	26.61	5.95	32.65	0.79	0.18
15	25.43	5.91	31.34	0.79	0.17
16	22.80	5.64	28.44	0.78	0.19
17	23.29	5.67	28.96	0.79	0.19
18	25.96	6.95	32.91	0.78	0.18
19	22.83	7.67	30.50	0.74	0.18
20	21.12	8.17	29.29	0.71	0.18
21	19.79	9.11	28.89	0.69	0.19

**Reporte de laboratorio rotativo**

22	18.86	9.43	28.29	0.66	0.21
23	17.21	9.34	26.55	0.65	0.23

**Tabla 22. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 532 nm.**

Día	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
Lun.	52.33	11.28	63.61	0.80	0.10
Mar.	67.01	15.26	82.27	0.78	0.08
Mie.	64.36	13.83	78.19	0.81	0.07
Jue.	54.42	12.27	66.69	0.80	0.09
Vie.	68.94	13.92	82.87	0.82	0.07
Sáb.	68.00	13.21	81.21	0.82	0.07
Dom.	65.81	9.72	75.53	0.86	0.08

**Tabla 23. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de Ciudad Universitaria a 870 nm.**

Día	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
Lun.	17.16	8.56	25.71	0.65	0.24
Mar.	18.29	10.91	29.20	0.59	0.22
Mie.	18.94	10.88	29.82	0.62	0.18
Jue.	15.61	9.23	24.85	0.62	0.22
Vie.	20.35	10.37	30.71	0.66	0.18
Sáb.	19.67	9.90	29.57	0.65	0.18
Dom.	18.52	7.31	25.84	0.70	0.22

**Tabla 24. Valores promedio de cada día de la semana para el conjunto de la Reserva Natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 870 nm.**

Día	Dis. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Abs. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Ext. $\left[\frac{M}{m}\right]$	Alb.	Vis. [km]
Lun.	12.89	5.80	18.70	0.68	0.30
Mar.	19.99	9.09	29.11	0.64	0.28
Mie.	23.46	10.24	33.71	0.69	0.17
Jue.	21.56	8.60	30.18	0.71	0.18
Vie.	26.16	8.74	34.90	0.74	0.16
Sáb.	29.63	9.31	38.94	0.75	0.14
Dom.	24.83	7.27	32.09	0.78	0.16