

Impacto de los procesos de mezcla vertical en la capa límite atmosférica nocturna sobre las concentraciones de ozono en un valle tropical topográficamente complejo y altamente urbanizado

G. Alexis Ayala-Parra^{1,2}, Mauricio Ramírez^{1,2}, Manuel Zuluaga^{1,2}, Ana Zuleima Orrego³
1 SIATA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín.
2 Universidad EAFIT, Medellín.
3 Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín.

Antecedentes

- La turbulencia en la Capa Límite Atmosférica (CLA) mezcla el momentum, la masa y la energía entre el suelo y la atmósfera libre (Stull, 2012).
- Los Vientos Máximos Nocturnos de Bajo Nivel (VMNBN), modulados por la topografía, son un factor clave para la generación de turbulencia mecánica (Rider and Armendariz, 1971; Banta et al., 2022).
- El transporte turbulento descendente por cizalladura incrementa el ozono (O₃) superficial (Wei et al., 2023).

Métodos

- Las concentraciones de O₃ nocturnas en el Valle de Aburrá entre 2020 y 2024 fueron analizadas y clasificadas en categoría alta ($\frac{\Delta O_3}{\Delta t} > 5.5 \frac{\mu g}{m^3}$), baja ($\frac{\Delta O_3}{\Delta t} < 1.5 \frac{\mu g}{m^3}$) y media, basado en incrementos horarios, según He et al. (2022).
- Se excluyeron las noches con más de 0.1 mm de precipitación en dicho período, ya que es una fuente de Tablas Variables usadas para analizar la estructura dinámica de la CLA y la turbulencia superficial.

Variable	Ecuación	Instrumento
Cizalladura vertical del viento	$CVV = \frac{\Delta U}{\Delta z}$	Radar perfilador de vientos
Energía cinética de turbulencia	$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{w'^2} + \overline{v'^2})$	Red de micrometeorología
Flujo vertical de momentum	$\tau = -\rho \overline{w'u'}$	Red de micrometeorología

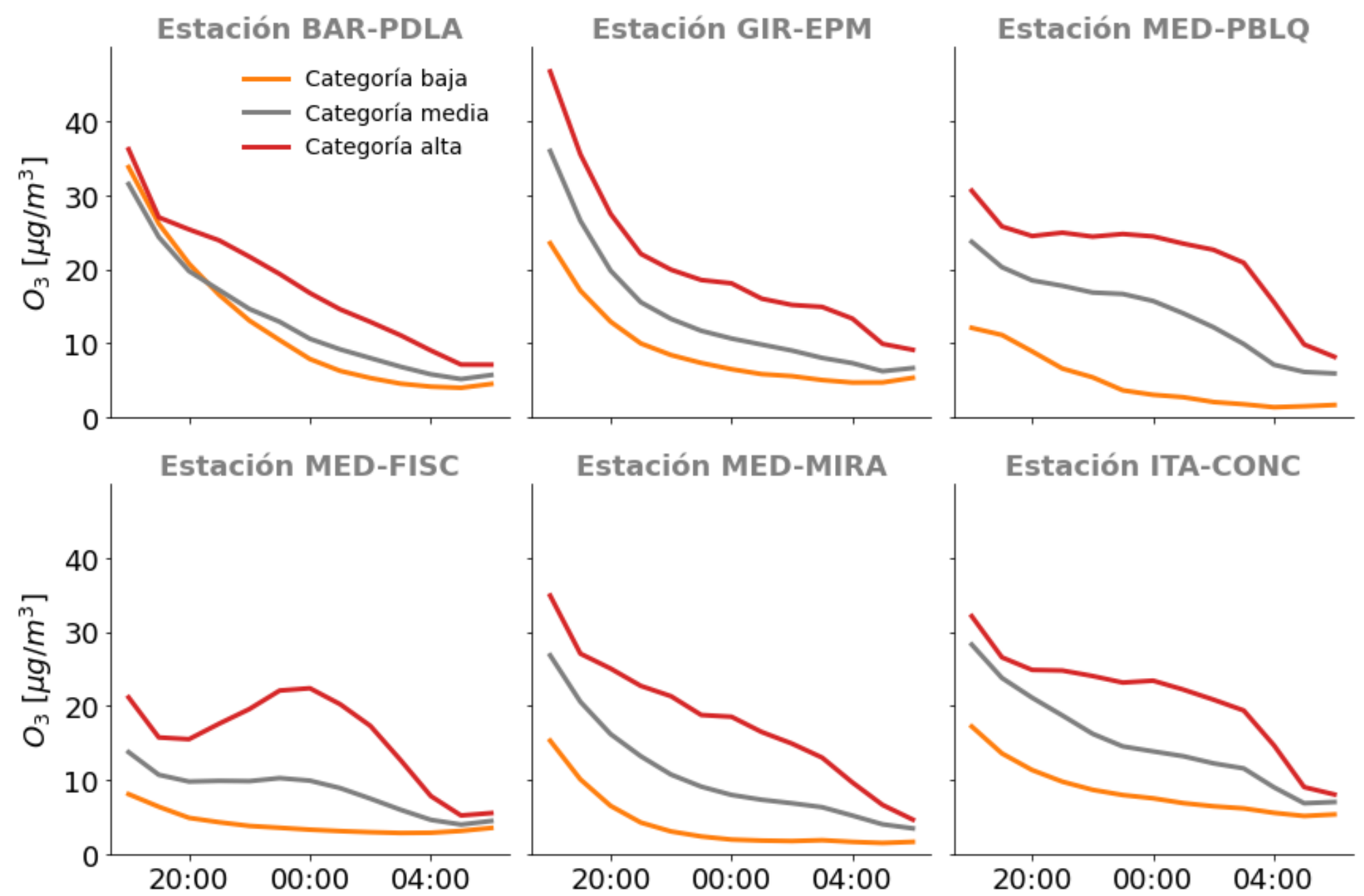


Figura 1. Ciclo nocturno de O₃ para cada una de las tres categorías.

Resultados

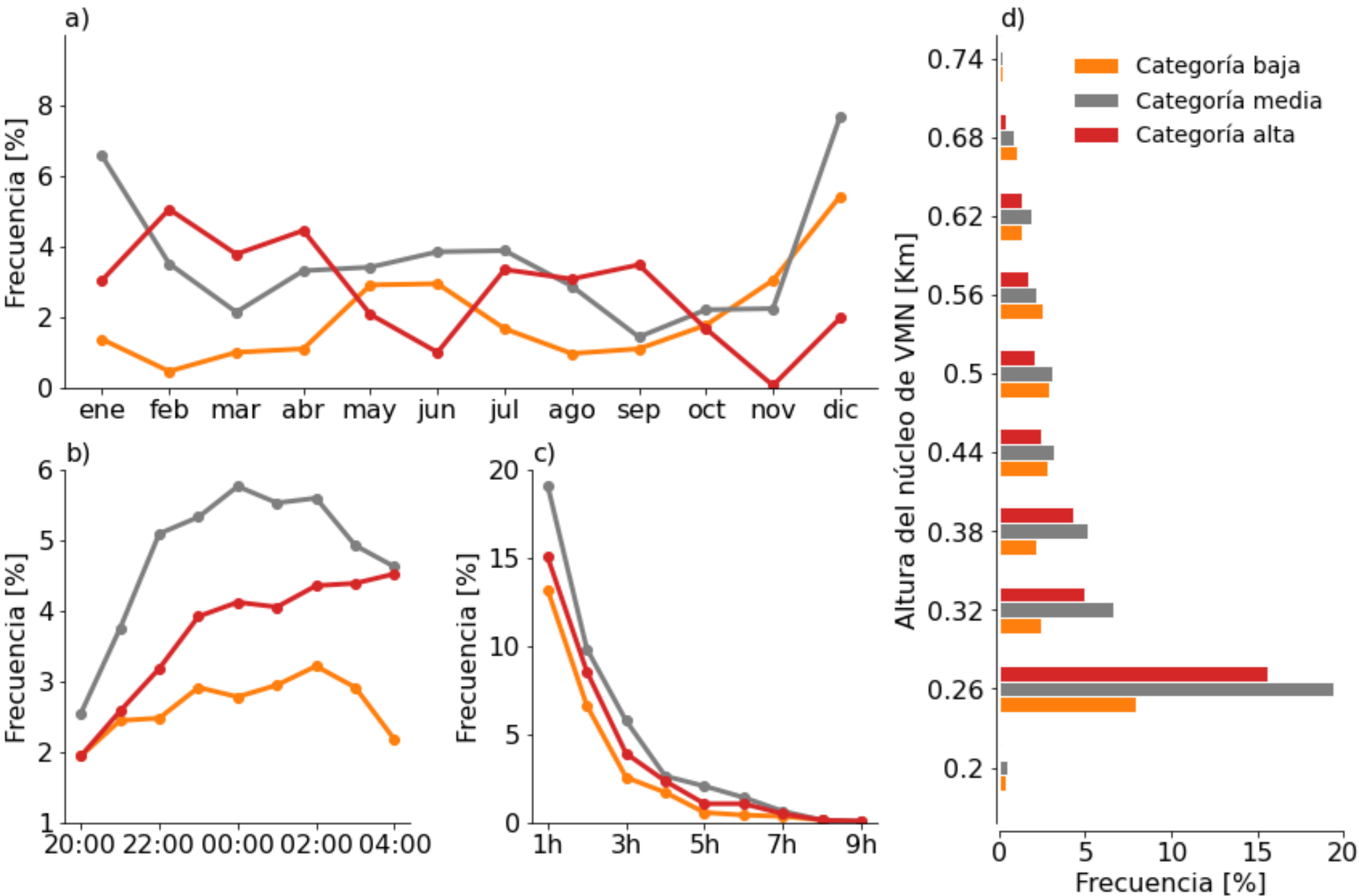


Figura 2. Caracterización estadística de los Vientos Máximos Nocturnos de Bajo Nivel (VMNBN). a) Frecuencia mensual, b) frecuencia horaria, c) duración y d) altura del núcleo de máxima velocidad.

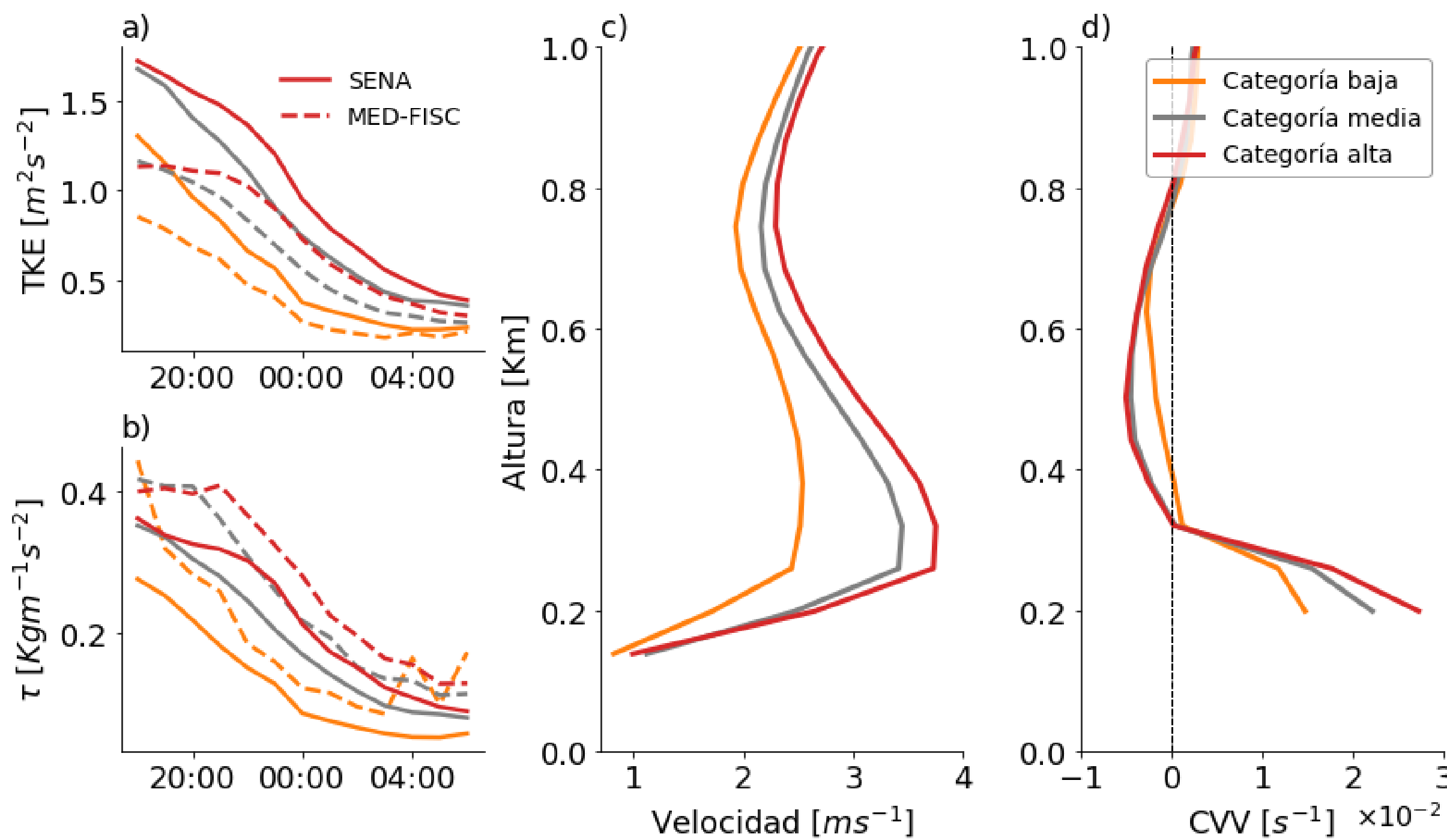


Figura 3. Ciclos nocturnos de (a) energía cinética de turbulencia (TKE) y (b) flujo vertical de momentum (τ). Perfiles medios nocturnos de (c) velocidad del viento y (d) cizalladura vertical del viento (CVV).

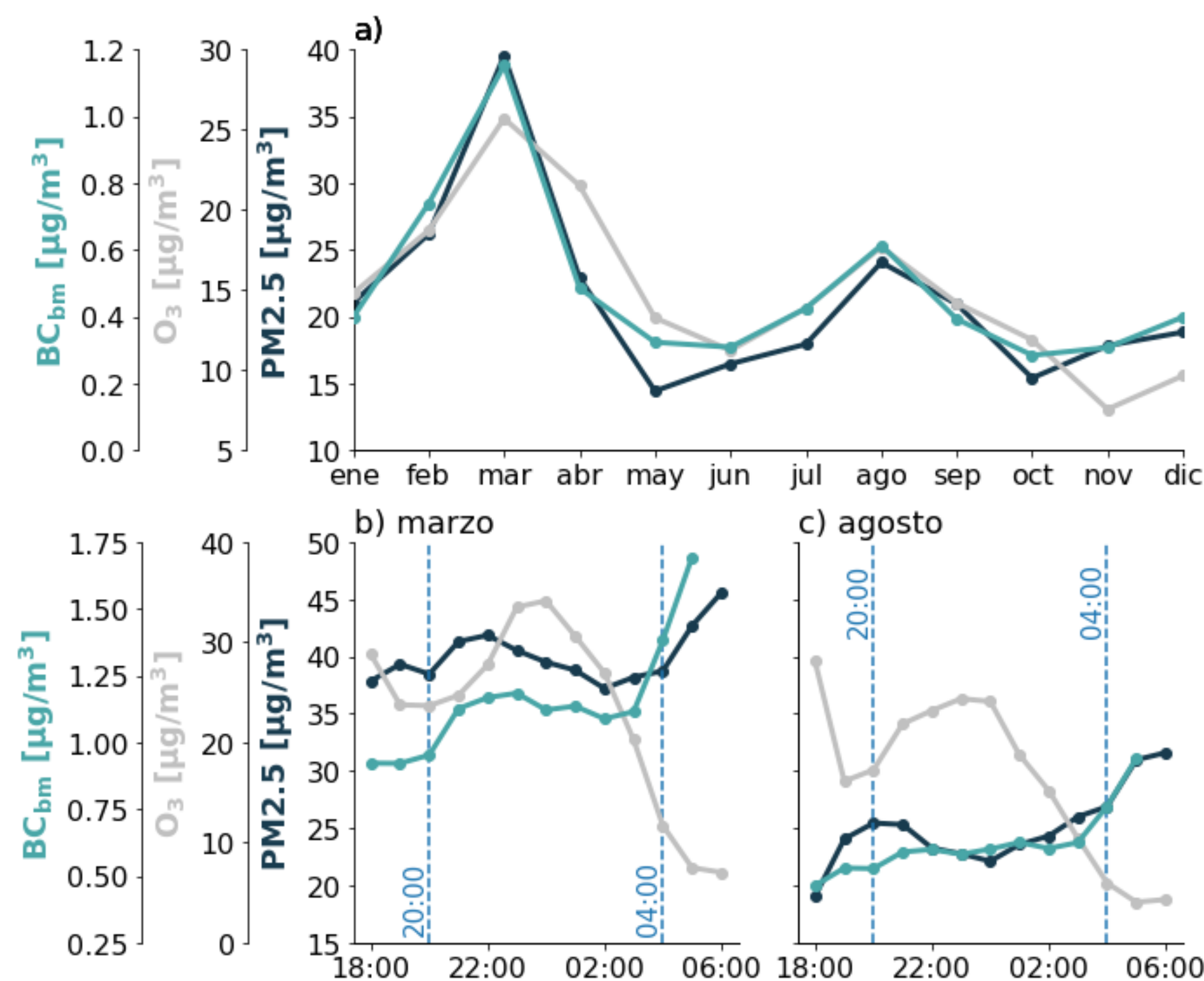


Figura 4. a) Ciclos anuales medios nocturnos de BC_{bm} , O₃ y PM2.5. Ciclos medios nocturnos correspondiente a los meses de (b) marzo y (c) agosto.

- Las noches con altas concentraciones de O₃, cuyo pico ocurre alrededor de la medianoche, coincidieron con eventos de VMNBN, caracterizados por una altura del núcleo de ~260 m (Fig. 2d), duración de 1 hora (Fig. 2c) y velocidad media de 3.8 m/s (Fig. 3c).
- La producción de turbulencia mecánica nocturna debido a los VMNBN bajo concentraciones elevadas de O₃ superficial es considerable, sugiriendo un transporte turbulento descendente de este contaminante (Fig. 3d y 1).
- Los VMNBN presentan un patrón bimodal anual (Fig. 2a), que coincide con los picos nocturnos de O₃, PM2.5 y BC_{bm} en los meses de marzo y agosto (Fig. 4).
- Estos VMNBN son un mecanismo físico de advección y mezcla nocturna, cuya mayor intensidad en marzo parece amplificada por el transporte regional de contaminantes (Fig. 4b), a diferencia de agosto (Fig. 4c), cuando esta influencia es mínima y la carga contaminante, reducida.

Implicaciones

- Los patrones atmosféricos en múltiples escalas pueden intensificar episodios nocturnos de contaminación en el Valle de Aburrá.
- La comprensión de la turbulencia nocturna y el rol de los VMNBN puede alimentar modelos numéricos que anticipen eventos de mala calidad del aire.
- La detección de condiciones atmosféricas nocturnas propicias para acumulación de ozono y otros contaminantes puede servir como insumo para sistemas de alerta.
- Comprender la dinámica atmosférica es crucial para fortalecer la gestión ambiental y mejorar las estrategias de mitigación de la contaminación.
- El transporte de contaminantes desde otras regiones resalta la necesidad de cooperación interinstitucional para controlar las emisiones.

Referencias

