

MONITOREO E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE PM₁₀, PM_{2.5} Y PM₁ EN EL ÁREA URBANA Y SUBURBANA DEL GRAN MENDOZA.

D. Allende¹, R. Pascual², M. Ruggeri³, C. Mulena⁴, E. Puliafito⁵.

Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA), Facultad Regional Mendoza – Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, (M5502AJE) Mendoza, Argentina. Tel: 54 261 5243003, david.allende@frm.utn.edu.ar
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Recibido 14/08/14, aceptado 27/09/14

RESUMEN: Debido a los efectos negativos asociados a las altas concentraciones de material particulado fino, este trabajo se enfocó en determinar las concentraciones y posibles fuentes asociadas de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ en el área del Gran Mendoza. En tal sentido, se midieron distribuciones de tamaño de material particulado, en esos rangos, en cinco sitios de monitoreo, en diferentes áreas del centro urbano. La concentración de partículas medida estuvo fuertemente asociada a las actividades urbanas y a también a la meteorología. Tal como sería esperable, en las zonas céntricas y residenciales las concentraciones de material particulado están influenciadas por la actividad vehicular. En zonas más cercanas al Piedemonte la recirculación de aerosoles en conjunto y posibles episodios de quema de RSU son probablemente responsables de las altas concentraciones medidas, especialmente en horas nocturnas.

Palabras clave: monitoreo de calidad de aire, aerosoles atmosféricos, emisiones vehiculares, emisiones fugitivas.

1. INTRODUCCIÓN

Varios estudios han probado que las partículas atmosféricas, en especial, las partículas secundarias de origen antrópico, poseen un gran impacto en la salud humana (Kampa y Castanas, 2008; Stanek et al., 2011). Por varios años, las normas de calidad para partículas en muchos países se basaron en monitoreo de la concentración en masa de Partículas Totales Suspendidas (conocidas por sus siglas en inglés, TSP: Total Suspended Particles) (Harrison y Yin, 2000; Monn et al., 1995). Sin embargo, debido a que una fracción muy relevante de las TSP está constituida por partículas no inhalables y con bajo impacto sobre enfermedades respiratorias y cardíacas, la relación entre efectos sobre la salud y niveles de TSP es mucho menor en comparación con la existente entre los niveles de material particulado con diámetros aerodinámicos menor a 10, 2.5 y 1 µm (PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁, respectivamente). Esto motivó, por ejemplo, la aplicación de monitoreo de PM₁₀ y PM_{2.5} en las normas de calidad de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1987, 2004). Posteriormente, la Unión Europea siguió la misma tendencia al reemplazar la norma de calidad de aire basada en TSP por PM₁₀. Actualmente, en Mendoza de acuerdo con la Ley 5100, por el decreto reglamentario 2404/89 si bien se habla de particulado total, hoy se interpreta ese número para PM₁₀. Actualmente, existe claramente una tendencia para desarrollar estrategias de monitoreo de PM_{2.5} adicionalmente a PM₁₀ debido a su relación más directa con los efectos sobre la salud (Polichetti et al., 2009) y para evitar interferencias con partículas de origen natural. Por otro lado, emisiones de actividades industriales y algunas emisiones fugitivas poseen un gran impacto en la calidad de aire, con emisiones en el rango de tamaños 2.5-10 µm. En escala global, las emisiones antrópicas de material particulado no exceden el 10% del total de emisiones de partículas, estando el resto constituido por emisiones naturales primarias (Hansen, 2005; Haywood y Boucher, 2000; Kiehl et al., 2000). Asimismo, dentro de las emisiones de aerosoles antrópicos, la distribución de tamaños suele ser bimodal y usualmente con rangos > 2.5 µm.

El siguiente estudio presenta los primeros resultados de una campaña de monitoreo de PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁ en diferentes áreas del Gran Mendoza, enfocado en analizar concentraciones en el área urbana y suburbana y detectar las fuentes de emisión, como así patrones diarios y horarios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio. Características generales

El centro urbano del Gran Mendoza está ubicado al oeste de la República Argentina, en el piedemonte de la Cordillera de Los Andes, ocupando un área de 16692 km². El área metropolitana se extiende de forma casi regular hacia el Nordeste, Este y Sur, mientras que las estribaciones de la Cordillera, impiden el crecimiento en las direcciones Norte y Oeste. Se trata de la cuarta aglomeración del país con 1230000 habitantes, siendo la más importante fuera de la Pampa Húmeda.

¹ Becario postdoctoral UTN

² Becaria en formación doctoral ANPCYT

³ Becaria en formación doctoral CONICET

⁴ Becaria en formación doctoral CONICET

⁵ Investigador Independiente CONICET

La calidad de aire en esta zona urbana se encuentra influenciada por varias fuentes de contaminantes, destacándose la influencia de dos centros industriales, el intenso tráfico vehicular, emisiones fugitivas y, en menor medida, fuentes residenciales. La ciudad se ubica en una zona árida a semiárida, de precipitaciones bajas (120-400 mm anuales), principalmente en meses de verano. La cercanía de la Cordillera de Los Andes tiene una fuerte influencia en la meteorología y en la calidad de aire locales, debido a la circulación típica valle-montaña de variación diaria (Puliafito et al., 2011).

La velocidad de viento media anual es alrededor de 2.6 m/s con un 26% de calmas. Las direcciones predominantes son S, S-SW, E-SE y E. El área presenta baja humedad relativa (50%), baja incidencia de niebla y pocos días cubiertos (65-75 días/año).

En este estudio se realizaron mediciones en cinco locaciones con diferentes características (ver Figura 1 y Tabla 1). Variables meteorológicas fueron tomadas por estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro2 ubicadas en cada punto de monitoreo (M_X).

Sitio	Nombre	Localización	Características
M1	Centro	32°53'S; 68°50'W	Zona compacta, central administrativa y comercial, con alta densidad edilicia, sobre dos calles principales.
M2	Guaymallén	32°54'S; 68°47'W	Región central del centro urbano. Zona residencial de alta densidad urbana. A 300 metros de principales accesos a la ciudad.
M3	Godoy Cruz	32°55'S; 68°51'W	Región central del centro urbano. Zona residencial de densidad urbana media.
M4	Parque	32°53'S; 68°52'W	Área densamente vegetada, a 800 metros de las calles principales de la ciudad.
M5	Luján de Cuyo	32°59'S; 68°52'W	Zona residencial suburbana. Área de densa vegetación.

Tabla 1. Información detallada de los sitios de monitoreo seleccionados.



Figura 1. Ubicación de los sitios de monitoreo y su contexto en el plano del Gran Mendoza.

En cuanto a los sitios de monitoreo y su contexto en el plano del Gran Mendoza, el sitio M1 es un punto céntrico del entramado urbano. Se ubica muy cerca de fuentes de tipo vehicular, en su gran mayoría, debido a que está rodeada por las principales avenidas de la zona. M2 es un punto ubicado en una zona residencial de alta densidad urbana con fuentes cercanas de emisiones vehiculares y a 1.5 km aproximadamente de vertederos no controlados de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). El punto de monitoreo M3 está posicionado al Sur de una zona densamente poblada y al Este de una franja altamente natural, como lo es el Pedemonte. Es una zona de tipo residencial media, donde las principales fuentes de contaminación son las emisiones vehiculares y la quema de basura generada a menos de 2 km de distancia.

M4 es un espacio altamente vegetado, que se encuentra ubicado al Oeste de la zona urbana más densa del Gran Mendoza y al Este del Pedemonte. Las emisiones vehiculares provenientes de las principales calles ubicadas en las inmediaciones del Parque y la quema de basura a 1.3 km del lugar, son las principales fuentes probables cercanas a este punto. Finalmente, M5 es una zona residencial, rodeada tanto de zonas naturales como de carreteras donde se destacan las fuentes vehiculares. Algunas de las calles circundantes se encuentran sin asfaltar por lo que se considera que la resuspensión de polvo puede ser una contribución muy relevante a la calidad de aire local.

2.2. Instrumentos y análisis de datos

En este estudio, la distribución de tamaños de partículas se midió mediante el espectrómetro laser de aerosoles GRIMM 107, que proporciona curvas granulométricas entre 0.25 μm y 32 μm (Grimm y Eatough, 2009). En este equipo, las muestras de aire son llevadas directamente dentro de la celda de medición y las partículas son detectadas por dispersión de luz. El pulso de dispersión de luz de cada partícula se cuenta y la intensidad de esta señal se clasifica en un determinado tamaño de partícula. El instrumento se configuró para escanear las distribuciones de tamaño solamente para 10, 2.5 y 1 μm , en todos los sitios de monitoreo cada 1 minuto, durante un período mínimo de tres semanas. Los datos obtenidos con el espectrómetro se guardaron continuamente en una tarjeta de datos extraíble, para ser descargados al final de la medición y realizar su procesamiento y análisis.

3. RESULTADOS

Niveles de PM

El período de monitoreo fue realizado en distintas estaciones del año, diferentes días de la semana y a distintas horas del día, para poder capturar la evolución de una gran variedad de fuentes. Durante el tiempo de medición las condiciones meteorológicas no fueron constantes.

Los datos utilizados en los cálculos a continuación están basados en las mediciones de 1 minuto. Los valores medios (medianas, en este caso) obtenidos con el muestreo en cada sitio, se muestran en la Tabla 2. También se incluye una columna con el porcentaje concentraciones de material particulado superiores a 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Debido a que las concentraciones en los diferentes sitios de monitoreo, como así también las distribuciones de tamaños poseen valores muy diferentes, se agregó en todos los casos valores límites superior e inferior, obtenidos en un intervalo de confianza del 95%.

Sitio	PM ₁₀ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)			PM _{2.5} ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		PM ₁ ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	
	Mediana	Intervalo 95%	Porcentaje por encima de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Mediana	Intervalo 95%	Mediana	Intervalo 95%
M1-CENTRO	38.4	0.0 - 156.6	10.49 %	8.7	0.0 - 28.3	3.8	0.0 - 16.4
M2-GUAYMALLÉN	27.2	0.0 - 135.9	7.09 %	6.7	0.0 - 31.2	2.9	0.0 - 19.8
M3-GODOY CRUZ	49.8	0.0 - 203.4	15.92 %	15.4	0.0 - 53.7	10.0	0.0 - 37.1
M4-PARQUE	38.6	0.0 - 175.3	11.61 %	10.04	0.0 - 39.2	5.8	0.0 - 26.1
M5-LUJÁN DE CUYO	68.7	0.0 - 367.9	19.04 %	16.5	0.0 - 64.7	8.9	0.0 - 29.8

Tabla 2. Concentraciones obtenidas en cada punto de monitoreo, detallando para cada tamaño la mediana y el intervalo que comprende el 95% de los valores.

Un análisis de las distribuciones de tamaños para los sitios de monitoreo, para todo el período de muestreo, revela diferencias en las concentraciones en masa de partículas.

Las concentraciones de PM₁₀ en los sitios M3 y M5 son mucho más altas que las observadas en sitios altamente urbanos (M1, M2) o en el parque de la ciudad (M3). Asimismo, los puntos de monitoreo ubicados cerca de fuentes naturales (M3, M4, M5), poseen máximos más marcados que aquellos que están hacia el interior del centro urbano (M1, M2). Los valores analizados se deben a que las partículas más grandes son provenientes de fuentes naturales.

Las partículas PM₁ provienen en su mayoría de fuentes de combustión, por lo que no hay una gran diferencia entre los sitios urbanos, excepto en M3 en donde los valores son mucho más altos con altas posibilidades de deberse a la quema de residuos. En ambientes suburbanos los orígenes pueden ser diversos, como combustión de combustibles fósiles y quema de RSU.

Finalmente, tamaños de partículas PM_{2.5} manifiestan un comportamiento intermedio a los dos anteriores. Las emisiones vehiculares y por quema de biomasa (parte de los RSU) poseen una distribución de tamaños multimodal que abarca tanto partículas gruesas como finas (Clarke et al., 2004; Hering et al., 1997; Wu et al., 2008).

Con el objeto de evaluar el comportamiento horario de las concentraciones de partículas medidas, se presentan a continuación las variaciones horarias para cada sitio de monitoreo (Mx).

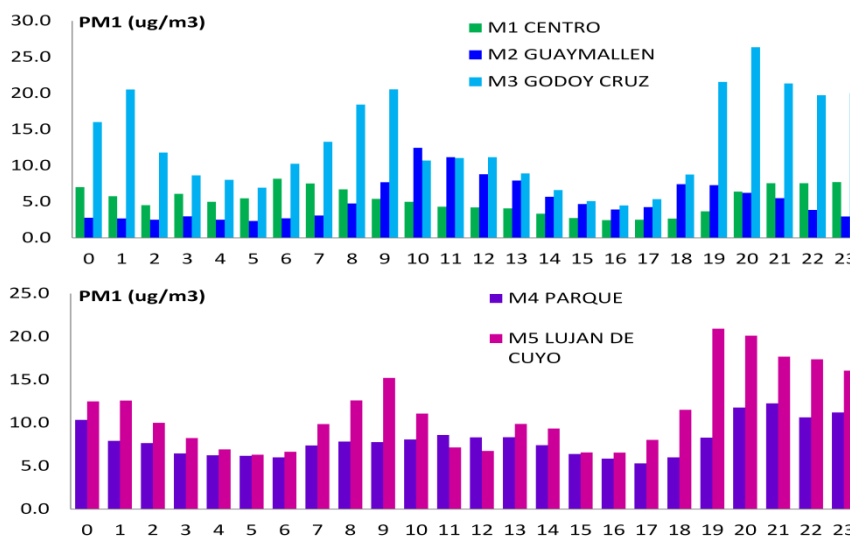


Figura 2. Variación horaria para concentración de PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en sitios urbanos y suburbanos.

En la Figura 2, donde podemos distinguir la variación horaria para la concentración de PM_1 , se observa que los sitios ubicados en el centro urbano (M1, M2) manifiestan una clara tendencia al aumento de concentraciones en las horas de la mañana, entre las 9 y 12 horas aproximadamente; como así también en la noche a partir de las 18 horas confirmando la actividad vehicular como responsable de la calidad de aire en la zona. En el caso de los sitios ubicados hacia la periferia del centro urbano (M3, M4, M5), estas tendencias se modifican observándose también concentraciones mucho más elevadas, no sólo para dichos horarios; sino particularmente en horas de la noche, desde las 21 horas y hasta las 2 de la mañana.

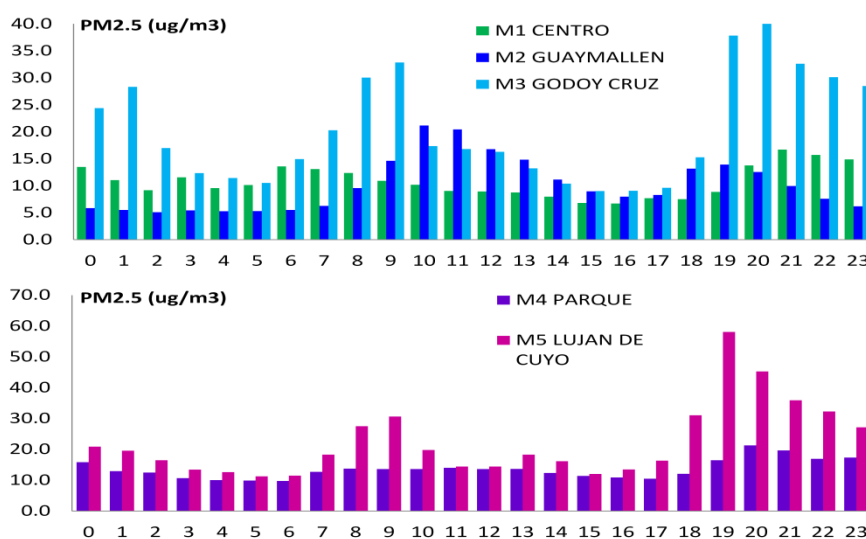


Figura 3. Variación horaria para concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en sitios urbanos y suburbanos.

La Figura 3 muestra un comportamiento de $PM_{2.5}$ bastante similar al desarrollado por PM_1 , sugiriendo el mismo origen de las partículas. Existe para las zonas suburbanas (M4 y M5) un perfil de concentraciones muy estable, que solamente varía en horas nocturnas. El sitio M3 posee un comportamiento intermedio, con mayor tendencia a parecerse a los sitios suburbanos, posiblemente por su localización al oeste del entramado urbano.

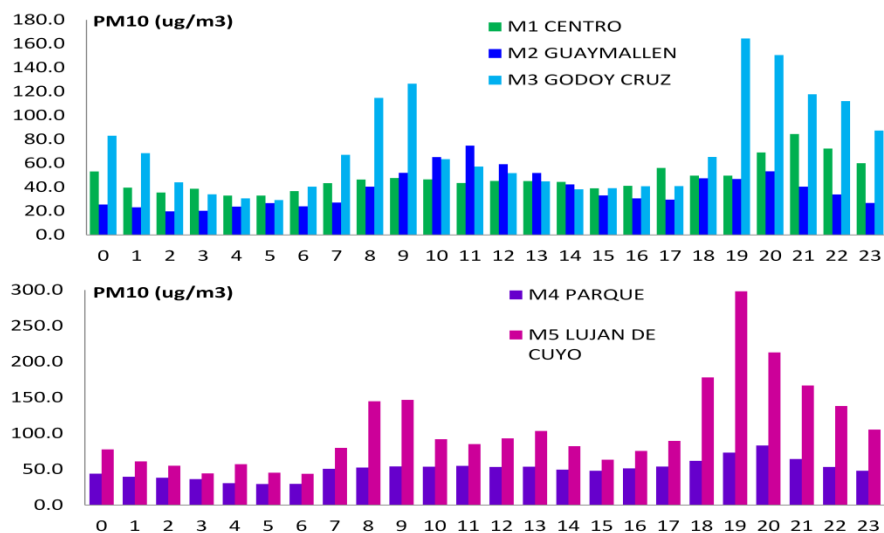


Figura 4. Variación horaria para concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en sitios urbanos y suburbanos.

En la Figura 4 puede notarse claramente la diferencia entre sitios urbanos y suburbanos, respecto a la evolución horaria de las concentraciones de PM_{10} . Se verifican nuevamente valores muy elevados para horas nocturnas, aunque las concentraciones decrecen algunas horas antes.

La variación de la relación PM_{10}/PM_1 se muestra a continuación con el objeto de evaluar la proporción de partículas gruesas a cada hora.

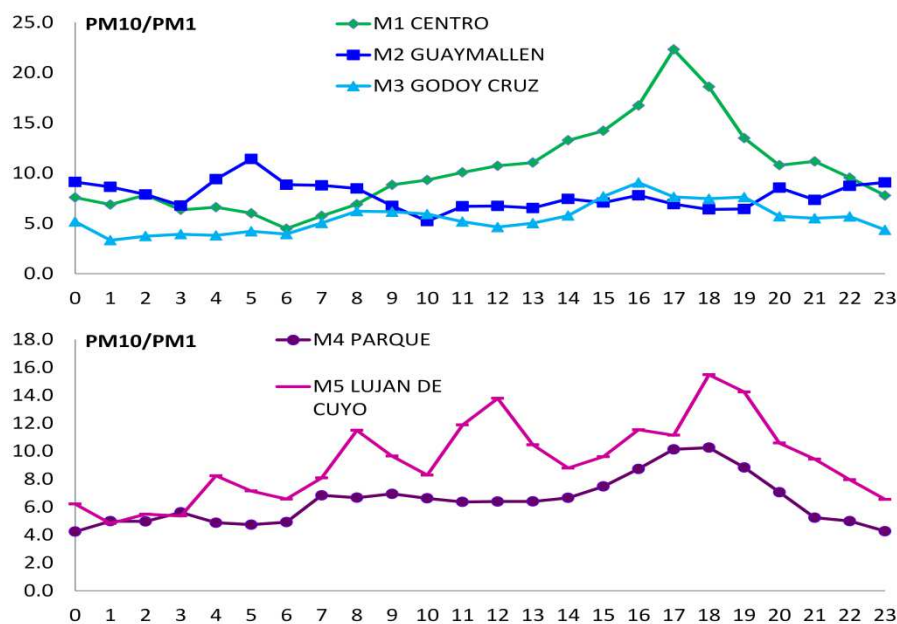


Figura 5. Variación horaria de la relación PM_{10}/PM_1 para los diferentes sitios de monitoreo.

Observando la Figura 5, puede notarse que todos los sitios urbanos tienen un comportamiento más o menos estable, donde las emisiones de material particulado vienen de las mismas fuentes, excepto en el caso de M1, en donde la contribución vehicular es mucho menos evidente a las 18 horas. Para los casos de M2 y M3 se observa que los perfiles son muy similares, pero M3 presenta una menor relación a la madrugada probablemente debido a la quema de RSU, que aporta grandes cantidades de partículas de menor tamaño. Si bien, la quema de residuos o cualquier otro tratamiento no autorizado está prohibida, se trata de una práctica habitual en los rellenos sanitarios.

Tanto en M1, como en M4 aparece lo que podríamos denominar como “Efecto siesta” en donde existe una notable baja en el movimiento vehicular. Esta tendencia se mantiene hasta la noche en que aumenta la actividad del tráfico en las zonas urbanizadas.

Para M5 puede notarse que las partículas gruesas aumentan acorde al aumento de tránsito sobre calzadas sin pavimento, como puede notarse en el aumento de la proporción de la fracción gruesa, por resuspensión de polvo.

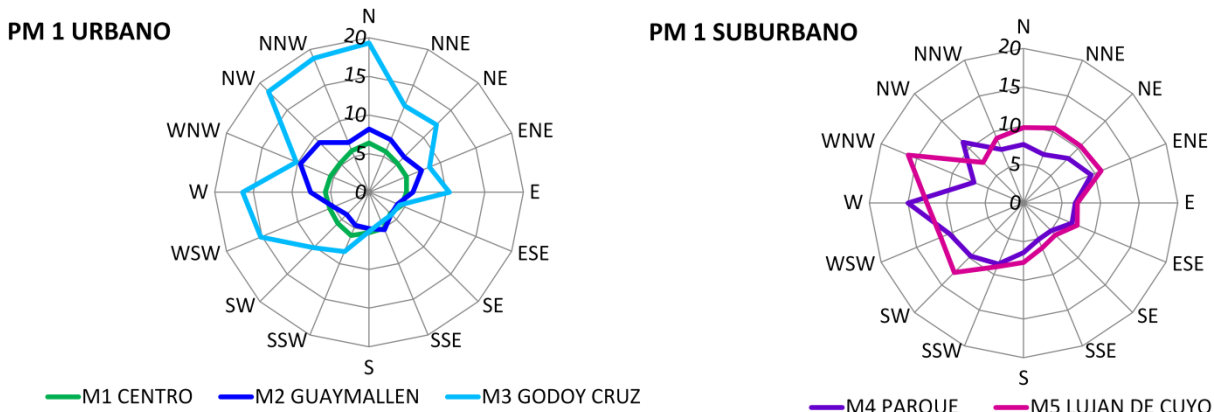


Figura 8. Rosa de contaminantes para concentraciones de PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en todos los sitios de monitoreo: M1, M2 y M3 a la izquierda, M4 y M5 a la derecha

Las rosas de contaminantes para concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_1 de la Figura 7 y la Figura 8 respectivamente muestran grandes similitudes con lo descrito para la Figura 6.

Es evidente que la concentración de partículas en la zona central y administrativa de la ciudad está afectada por fuentes ubicadas alrededor de los sitios de monitoreo, en todas las direcciones, para todos los tipos de tamaño. Hay que destacar, sin embargo, que para los sitios urbanos y suburbanos, ubicados hacia el oeste (M3, M4 y M5) a medida que disminuye el tamaño de material particulado, la concentración es menor pero se acentúa la concentración en la dirección W. Esto indicaría la existencia de una fuente en esa dirección de partículas originadas por combustión, como fuentes vehiculares y quema de RSU.

Debido a que en cada uno de esos sitios no existen flujos vehiculares importantes ubicados hacia el oeste de cada sitio de monitoreo, es posible que la contribución sea por quema de RSU, o por cambios en los patrones de circulación de viento. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 9 las rosas de contaminantes para los sitios M3 y M4, ubicados hacia el oeste de la ciudad.

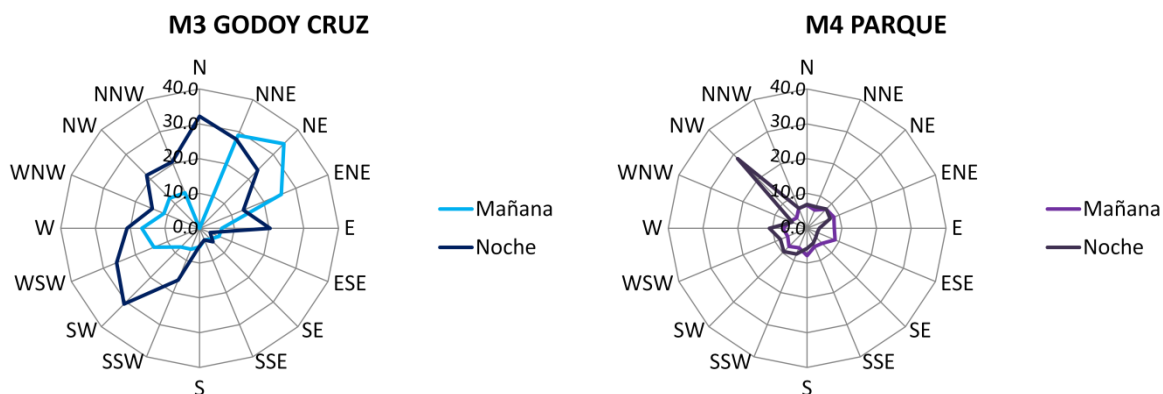


Figura 9. Rosa de contaminantes para concentraciones de PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en los sitios de monitoreo M3 y M4 para diferentes momentos del día: mañana (6-12 horas) y noche (24-6 horas).

Es esta figura se observa claramente como la circulación local produce cambios netos en la contribución de las fuentes. La circulación valle-montaña genera vientos nocturnos desde el W-SW y diurnos, desde el valle, con dirección N, NE. Durante horas nocturnas, es posible que las partículas emitidas en el centro urbano durante el día vuelvan resuspendidas por el cambio de circulación. Esto resulta evidente para el material particulado más fino, adicionándose este efecto a las fuentes de contaminación ubicadas al oeste de la ciudad, como es la quema de RSU. En el caso del sitio M4, ubicado en el parque de la ciudad, parece evidente la suma de las contribuciones nocturnas debido al cambio de circulación (grandes concentraciones desde el W-WSW) con una clara fuente local ubicada al NW del punto de medición (quema de RSU).

CONCLUSIONES

En el presente artículo se muestra un resumen de mediciones de concentraciones de partículas en los rangos de tamaño PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 , en el centro urbano del Gran Mendoza, presentándose distribuciones representativas de tamaños y datos de concentraciones en cinco sitios de muestreo y en diferentes condiciones meteorológicas. Para ello se utilizó un equipo de monitoreo GRIMM 1.107, junto con estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro2.

De la gran cantidad de datos obtenidos se pueden extraer algunas conclusiones:

- La concentración de partículas durante el periodo de monitoreo está fuertemente asociada a las actividades urbanas y a también a la meteorología. Tal como sería esperable, en las zonas céntricas y residenciales las concentraciones de material particulado están influenciadas por la actividad vehicular.

- Las concentraciones de PM₁₀ son generalmente mayores en sitios de la ciudad con mayor influencia de zonas áridas, ubicados al oeste del centro urbano y hacia el sur, donde el Piedemonte se encuentra más cerca.
- Si bien existen altas concentraciones de partículas pequeñas (PM_{2,5} y PM₁) en áreas céntricas y administrativas, como es esperable por la actividad vehicular, se verificaron episodios particulares de contaminación en sitios más alejados del centro. Éstos parecen ser afectados, no solamente por fuentes locales de combustión, sino también por transporte de partículas debido a la meteorología.
- Algunas observaciones inusuales, especialmente durante las horas nocturnas sugirieron la presencia de estas fuentes fuera del centro urbano, hacia el oeste del mismo. Existen patrones diarios en las concentraciones en donde el efecto es evidente. Asimismo, es posible también que la recirculación de aerosoles en conjunto sea responsable de gran parte de las altas concentraciones medidas en horas nocturnas.
- Los patrones horarios reflejan dos comportamientos distintivos: existen sitios que están influenciados predominantemente por la meteorología para lugares sin fuentes locales de partículas, e influenciados por fuentes locales como el tráfico y emisiones residenciales.

La dependencia de las concentraciones y la distribución del tamaño de partículas estudiados son consistentes con los sitios representativos seleccionados y coherentes con la meteorología local. Este tipo de mediciones, combinadas con caracterizaciones químicas son la base de futuros estudios de modelado e identificación de fuentes. Asimismo, se espera acoplar este tipo de mediciones con evaluaciones de concentraciones basadas en el número de partículas para detectar y cuantificar mejor la contribución de otras fuentes.

REFERENCIAS

- Clarke, A D; Shinozuka, Y; Kapustin, V N; et al. (2004). Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physicochemistry and optical properties. In: *J. Geophys. Res.* AGU 109 (D15), p. D15S09.
- Grimm, Hans; Eatough, Delbert J (2009). Aerosol Measurement: The Use of Optical Light Scattering for the Determination of Particulate Size Distribution, and Particulate Mass, Including the Semi-Volatile Fraction. In: *Journal of the Air & Waste Management Association.* 59 (1), pp. 101–107.
- Hansen, J. (2005): Efficacy of climate forcings. In: *Journal of Geophysical Research.* 110 (D18), p. D18104.
- Harrison, Roy M; Yin, Jianxin (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. In: *Science of The Total Environment.* 249 (1–3), pp. 85–101.
- Haywood, James; Boucher, Olivier (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. In: *Rev. Geophys.* AGU 38 (4), pp. 513–543.
- Hering, Susanne; Eldering, AnnMarie; Seinfeld, John H (1997). Bimodal character of accumulation mode aerosol mass distributions in Southern California. In: *Atmospheric Environment.* 31 (1), pp. 1–11.
- Kampa, Marilena; Castanas, Elias (2008). Human health effects of air pollution.. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987).* 151 (2), pp. 362–7.
- Kiehl, J T; Schneider, T L; Rasch, P J; et al. (2000). Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3. In: *Aerosol Forcing of Climate.* Wiley-Interscience, pp. 1441–1457.
- Monn, Ch.; Braendli, O; Schaeppli, G; et al. (1995). Particulate matter < 10 µm (PM₁₀) and total suspended particulates (TSP) in urban, rural and alpine air in Switzerland. In: *Atmospheric Environment.* 29 (19), pp. 2565–2573.
- Polichetti, Giuliano; Cocco, Stefania; Spinali, Alessandra; et al. (2009). Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system. In: *Toxicology.* 261 (1–2), pp. 1–8.
- Puliafito, Salvador E.; Bochaca, Fabián R.; Ortiz, Gabriel P.; et al. (2011). The influence of green areas in an arid urban environment. In: *Journal of Arids Environments.*
- Stanek, Lindsay Wichers; Sacks, Jason D; Dutton, Steven J; et al. (2011). Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: An evaluation of collective results. In: *Atmospheric Environment.* 45 (32), pp. 5655–5663.
- U.S. EPA (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, Oct 2004).
- U.S. EPA (1987). Second Addendum to Air Quality Criteria for Particulate Matter and Sulfur Oxides (1982): Assessment of Newly Available Health Effects Information (1986).
- Wu, Zhijun; Hu, Min; Lin, Peng; et al. (2008). Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China. In: *Atmospheric Environment.* Elsevier Ltd 42 (34), pp. 7967–7980.

ABSTRACT

Due to the negative effects of fine particle atmospheric concentrations, this work is focused on the determination of the atmospheric concentrations and possible pollution sources for PM₁₀, PM_{2,5} and PM₁, in the Great Mendoza urban area. In that way, size distributions of particulate matter was measured in five monitoring points distributed in the urban region. As expected, in the central and residential area the concentrations were strongly related to vehicular activity. However, in areas located in the western portion of the urban center, particle recirculation and possible household waste burning are responsible for high particle concentrations.

Keywords: air quality monitoring, atmospheric aerosols, traffic emissions, fugitive emissions.