

Análisis de la variación estacional de la contaminación atmosférica y su relación con variables climáticas en el valle central de Cochabamba, Bolivia

Analysis of the seasonal variation of atmospheric pollution and its relation with meteorological variables in the central valley of Cochabamba - Bolivia

Edgar Montenegro & Marcos Luján Pérez

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana, Unidad Académica de Cochabamba, c Márquez s/n, Campus de Tupuraya, Cochabamba Bolivia.

lujan@ucbcba.edu.bo

Resumen: En el presente estudio se hace un análisis de la variación estacional y espacial de los contaminantes primarios (PM₁₀, NO₂ y SO₂) y de ozono que son monitoreados por la red MoniCA en la ciudad de Cochabamba. Se pudo establecer que, por las características del entorno orográfico de esta ciudad, la altura a la que se encuentra y sus condiciones climáticas, la ventilación de la atmósfera en la época de invierno es mucho menor que en verano. Esto provoca que los niveles de inmisión de los contaminantes primarios sean mucho más elevados en los meses de invierno (junio, julio) que en los meses de verano. Las zonas con mayor tráfico vehicular presentan mayores niveles de contaminación por contaminantes primarios. El Ozono presenta un comportamiento estacional más relacionado con la intensidad de radiación solar, esto provoca que los meses de la primavera presenten mayores niveles de Ozono (septiembre a noviembre) y, en cierta medida al inicio del otoño (marzo, abril)

Palabras clave: contaminación atmosférica, contaminantes primarios y secundarios, variación estacional.

Abstract: In the present study an analysis is made of the seasonal and spatial variation of the primary pollutants (PM₁₀, NO₂ and SO₂) and of ozone that are monitored by the MoniCA network in the city of Cochabamba. It was established that, due to the characteristics of the orographic environment of this city, the height at which it is located and its climatic conditions, ventilation of the atmosphere in the winter season is much lower than in summer. This causes that the levels of inmission of the primary pollutants are much higher in the winter months (June, July) than in the summer months. The areas with the highest vehicular traffic present higher levels of contamination by primary pollutants. The Ozone presents a seasonal behavior more related to the intensity of solar radiation, this causes that

the months of the spring present higher levels of Ozone (September to November) and, to a certain extent at the beginning of the autumn (March, April)

Keywords: atmospheric pollution, primary and secondary pollutants, seasonal variation.

1 Introducción

La calidad del aire en la ciudad de Cochabamba está condicionada por una serie de factores, que al parecer tienen vínculos con el entorno orográfico del valle, que se encuentra representado en la Figura 1, ilustración que permite observar que los Valles Central y Bajo de Cochabamba, se encuentran rodeados en gran parte por cordilleras, en el sector al sur del valle, el cerco natural es completado por serranías de menor altura.

En la Figura 1 también se observa que el Valle de Cochabamba es drenado por un curso principal denominado Río Rocha. Si se traza un transecto de norte a sur en el valle, se tendrá que el sitio de menor altura define el curso del río, el transecto mencionado tendría una forma de V, con pendiente que va disminuyendo de norte a sur y de sur a norte.

Bajo esta conformación orográfica, en el presente estudio se analizan registros de temperatura y calidad del aire con el propósito de verificar si en el Valle hay evidencias de inversión térmica y su posible asociación con la calidad del aire, del mismo modo se analiza la amplitud térmica y su posible relación con la calidad del aire.

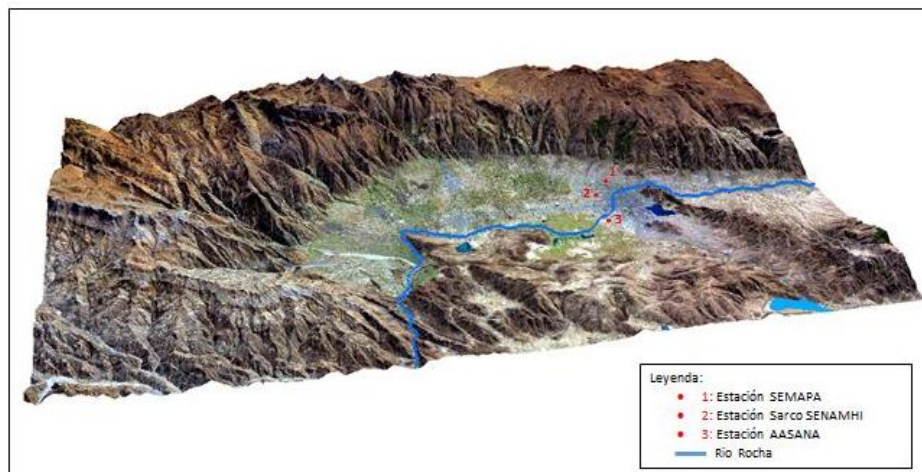


Figura 1: Entorno orográfico del Valle de Cochabamba y localización de estaciones de medición de temperatura, usadas en el estudio

2 Metodología

La metodología usada se inicia en la selección de la zona de trabajo, que en este caso esta condiciona por la disponibilidad de datos de temperatura y contaminación atmosférica, luego los datos son procesados y caracterizados con el propósito de detectar relaciones de características de la temperatura con la contaminación atmosférica de la zona.

2.1 Disponibilidad de datos y selección de la zona de trabajo

En la Figura 2 se proporciona la localización de las estaciones de medición usadas en el estudio, en primera instancia se adoptan las de la red MoniCA, donde se mide una serie de variables asociadas a la contaminación, sin embargo la única tratada, en el presente estudio, es la contaminación por material particulado, denominada PM_{10} ($\mu g m^{-3}$).

Al conjunto de la red de estaciones MoniCA, se agregan otras que registran temperatura y que son manejadas por otras instituciones, es el caso de la estación de Sarco, manejada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (SENAMHI, Bolivia, 2015) y la estación de AASANA-Cbb, vinculada al aeropuerto de Cochabamba.

La búsqueda de estaciones está vinculada a la idea de estudiar las variables en las proximidades de un transecto que tiene pendiente descendente desde las proximidades de la estación SEMAPA hasta las inmediaciones de AASANA-Cbb, esto con el fin de verificar si realmente ocurre una inversión térmica, típica de zonas con pendiente descendente.

En la Tabla 1, se proporciona la altitud de las distintas estaciones usadas y características de su disponibilidad de datos, se destaca que la estación de registro con mayor altura es la de SEMAPA y las de menor altura son: AASANA-Cbb y parque Kanata, aspecto también ilustrado en la Figura 2 que permite observar la variación altitudinal, ya que como fondo del mapa se cuenta con una representación del modelo digital del terreno. Podemos apreciar que la estación a menor altura es la de AASANA-Cbb (2.548 m s.n.m.) y la más elevada es SEMAPA (2.628 m s.n.m.) lo que implica una diferencia de altura de 80 m entre estas dos estaciones

Tabla 1. Características de las estaciones de medición usadas en el estudio

Estación	Altitud m s.n.m.	Ubicación		Parámetros medidos	Institución
		Longitud	Latitud		
SEMAPA	2.628	-66,1627	-17,3644	Temperatura, Humedad, Radiación Solar, Velocidad y dirección de Viento, Precipitación pluvial. NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀	Red MoniCA
Coña Coña	2.601	-66,2062	-17,3880	Temperatura, Humedad, Radiación Solar, Velocidad y dirección de Viento, Precipitación pluvial. PM ₁₀	Red MoniCA
Sarco	2.587	-66,1755	-17,3815	Temperatura, Humedad, Velocidad y dirección de Viento, Precipitación pluvial.	SENHAMI
AASANA-Cbb	2.548	-66,1772	-17,4167	Temperatura, Humedad, Velocidad y dirección de Viento, Precipitación pluvial.	AASANA
Parque Kanata	2.611	-66,1583	-17,4128	Temperatura, Humedad, Radiación Solar, Velocidad y dirección de Viento, Precipitación pluvial. NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀	Red MoniCA

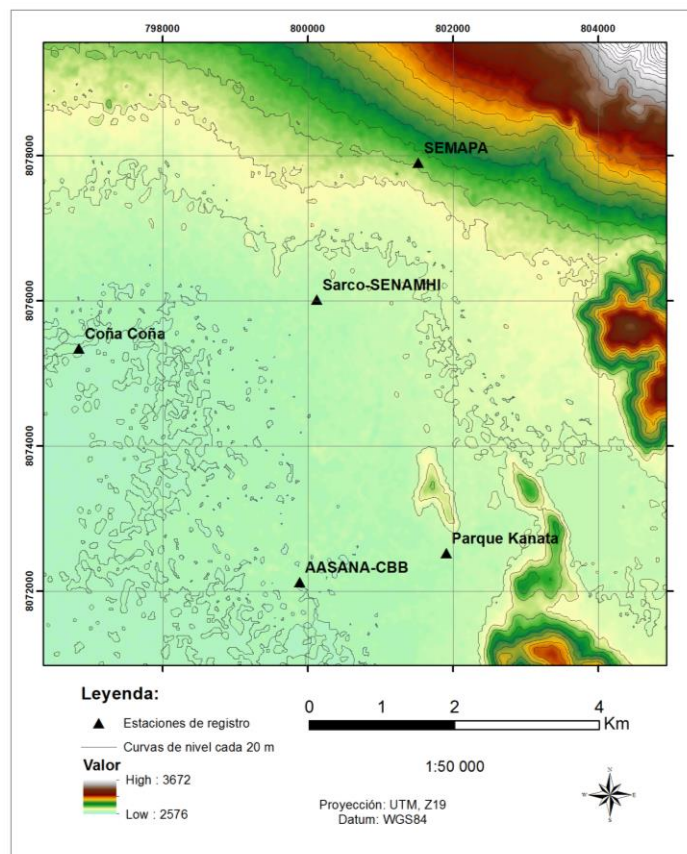


Figura 2: Localización altitudinal y en planta de estaciones de medición de variables de interés para el estudio

Para todas las variables se usó un periodo común de observaciones, en este caso desde el año 2012 a 2016, sobre todo en lo que concierne a los datos meteorológicos. En algunos parámetros de contaminación se utilizaron periodos de tiempo menores, debido a que la calidad de los datos de algunos años no era confiable, se tomó en cuenta sólo los años en los que se cuenta con información suficientemente completa y confiable.

3 Resultados y discusión

3.1 Inversión térmica respecto a la temperatura mínima promedio

En la Figura 3, se presenta el comportamiento de la temperatura mínima diaria, agregada como un promedio mensual, para las estaciones de AASANA-Cbb, Sarco SENAMHI y SEMAPA, observando que en todos los meses del año la estación de

AASANA-Cbb presenta las temperaturas mínimas, que como ya se mencionó se encuentra en una cota inferior con relación a las otras dos estaciones, siendo esta una evidencia de la formación de la inversión térmica por la conformación de una masa de aire frío que se asienta en las partes más bajas del valle central de Cochabamba.

En la Figura 3 también se observa que la inversión térmica debe ser más acentuada en los meses de junio y julio ya que en esos meses se tienen temperaturas más bajas y que corresponden a la estación invernal.

La inversión térmica parece no ser tan acentuada en la zona de la estación de SEMAPA y Sarco- SENAMHI, ya que los valores de temperatura mínima promedio mensual en estas estaciones con mayores. Sin embargo, los mayores valores de Sarco-SENAMHI, se podrían atribuir a que esta estación se encuentra en un conglomerado urbano con menores posibilidades de ventilación, motivando que se presenten temperaturas un poco mayores que en SEMAPA.

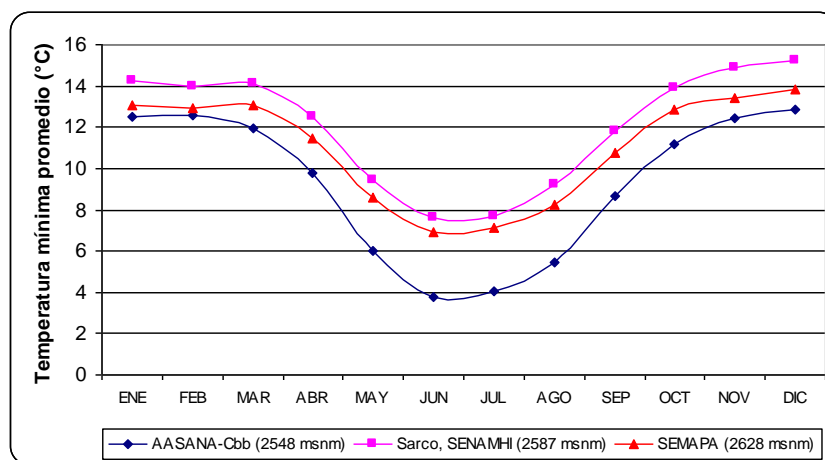


Figura 3: Temperatura mínima promedio mensual entre los años 2012 a 2016 en la estaciones indicadas

3.2 Amplitud térmica diaria, régimen de vientos y radiación solar.

El comportamiento de la amplitud térmica en las estaciones de interés se encuentra presentado en la Figura 4 observando que el mayor promedio diario de amplitud térmica se presenta en la estación de AASANA-Cbba, la estación de SEMAPA que se encuentra a mayor altitud tiene valores menores de amplitud térmica.

Por otro lado los mayores valores de amplitud térmica son registrados entre los meses de mayo a agosto, se destaca que en los meses de junio y julio en AASANA-

Cbb, se tiene un promedio de amplitud térmica diaria que se encuentra alrededor de los 22 °C, mientras que en SEMAPA se alcanzaría tan solo 18 °C.

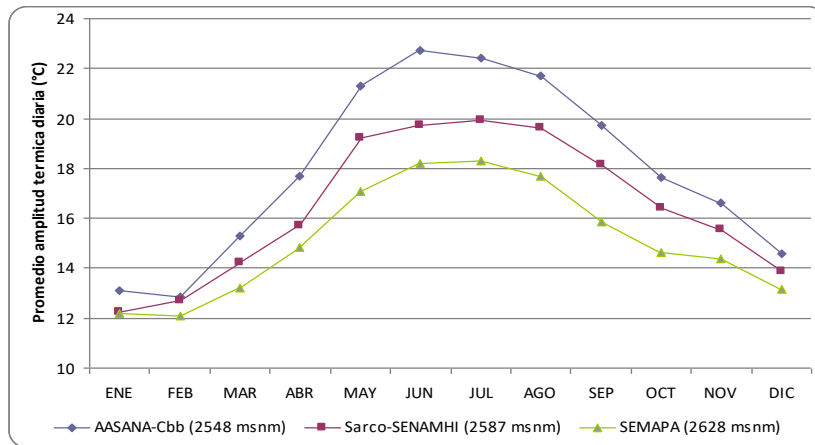


Figura 4: Promedio de la amplitud térmica diaria, periodo 2012 a 2016, estaciones indicadas

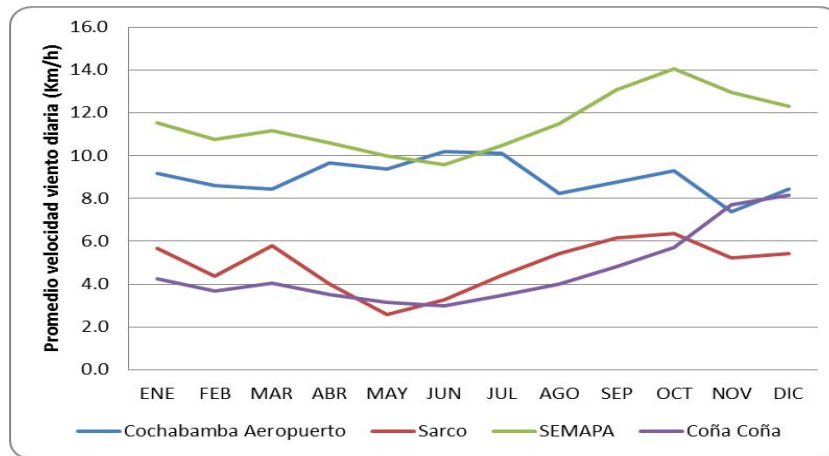


Figura 5: Variación anual de la velocidad promedio mensual de vientos en las diferentes estaciones meteorológicas del Valle Central de Cochabamba

En cuanto al régimen de vientos, las zonas más ventiladas de la ciudad se encuentra en la zona de SEMAPA (norte) (ver Figura 5) y la región del Aeropuerto, las zonas centrales (Coña Coña y Sarco) aparecen como las regiones con menor ventilación en la ciudad. Esto también se refleja en las rosas de vientos que se muestran en la Figura 6 para diferentes épocas del año. En cuanto a la dirección de los vientos, estos provienen con cierta predominancia de la dirección sur-oeste, pero

se tienen vientos de todas las direcciones. Los vientos predominantes están asociados a vientos anabáticos de montaña, que se producen durante el día, debido a la presencia de la cadena montañosa del Tunari, al norte del valle central (ver Figura 1). Estos vientos de montaña provocan una mayor ventilación en las zonas de la ciudad que se encuentran al pie de las montañas.

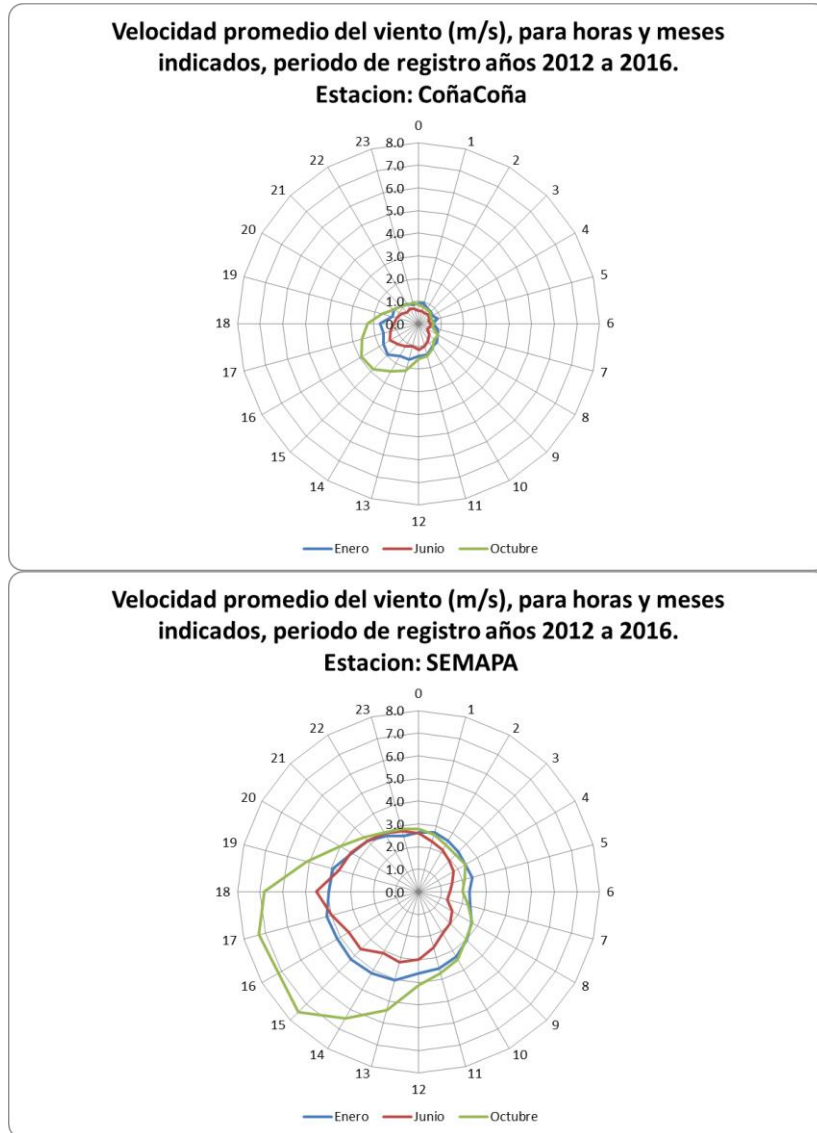


Figura 6: Velocidades promedio de diarias de vientos en diferentes meses en las estaciones de SEMAPA y Coña Coña.

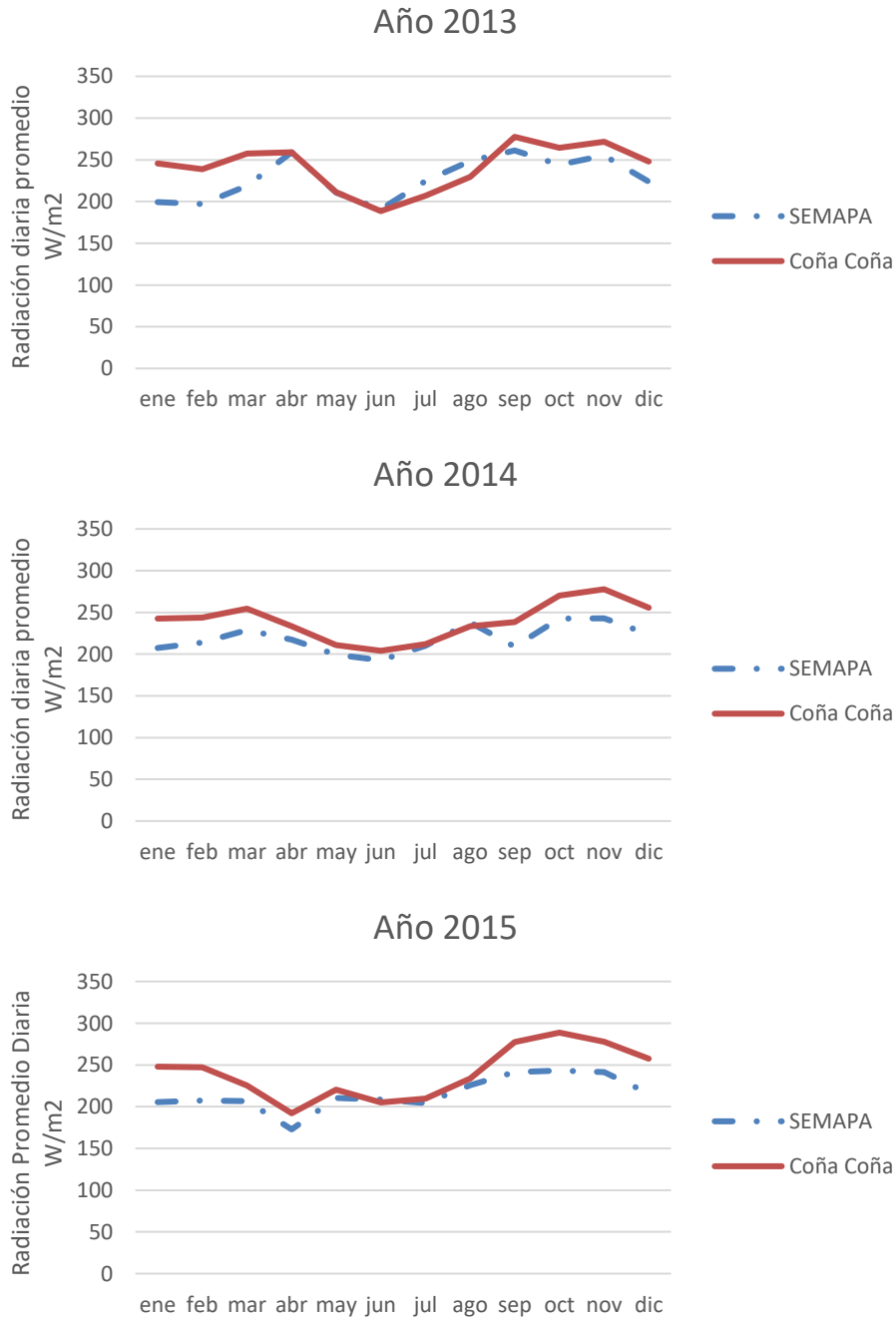


Figura 7: Variación estacional de promedios diarios de la radiación solar en la Ciudad de Cochabamba entre los años 2013 y 2015.

3.3 Comportamiento del contaminante PM₁₀, la temperatura mínima promedio y la amplitud térmica

En la Figura 8, se sintetiza el comportamiento del promedio mensual del contaminante PM₁₀, con relación a la temperatura mínima promedio, observando que los mayores niveles de este contaminante se presentan en las estaciones de menor altitud, en este caso Parque Kanata y Coña Coña, este comportamiento es atribuido en parte a la inversión térmica presente.

Los valores mayores de contaminación por PM₁₀ en Parque Kanata, también pueden ser atribuidos a su entorno orográfico, ilustrado en el modelo digital del terreno de la Figura 1: situación que disminuye las posibilidades de ventilación.

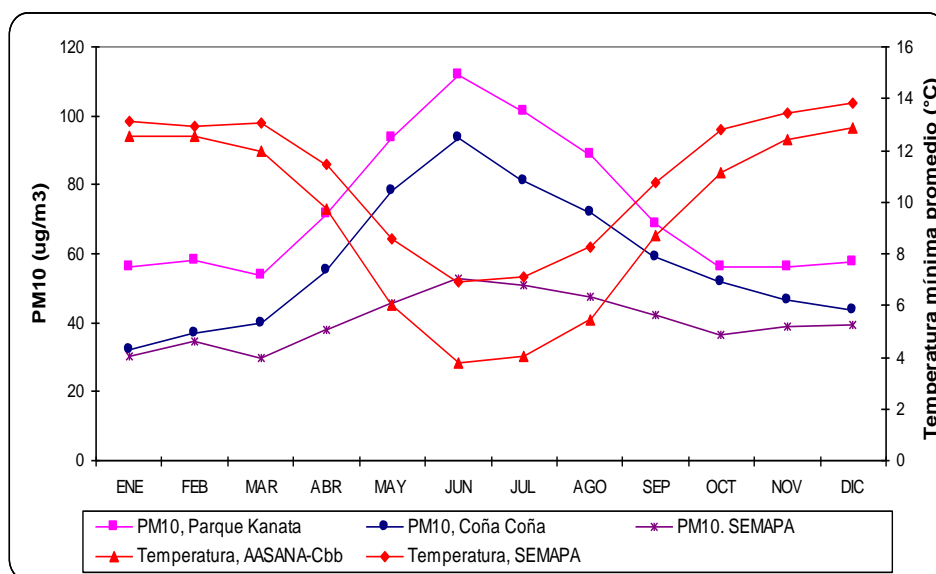


Figura 8: Promedios de la concentración del contaminante PM₁₀ y temperatura mínima en estaciones indicadas, periodo de observación años 2012 a 2016

En la Figura 9 se presentan los promedios de la concentración del contaminante PM₁₀ y la amplitud térmica, observando que la estación AASANA-Cbb, que se encuentra a menor cota, presenta la mayor amplitud térmica, a una altitud equivalente, en Parque Kanata se observan los mayores niveles de contaminación.

En resumen a mayor amplitud térmica, corresponde un mayor grado de contaminación por PM₁₀, a su vez se observa que un mayor grado de contaminación es alcanzado en los meses de invierno. Se aprecia que los niveles de PM₁₀ superan en

valor guía de la OMS de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (OMS, 2006), la mayor parte del año en las estaciones de Parque Kanata y Coña Coña, en la estación de SEMAPA, este límite se supera esencialmente en los meses de invierno.

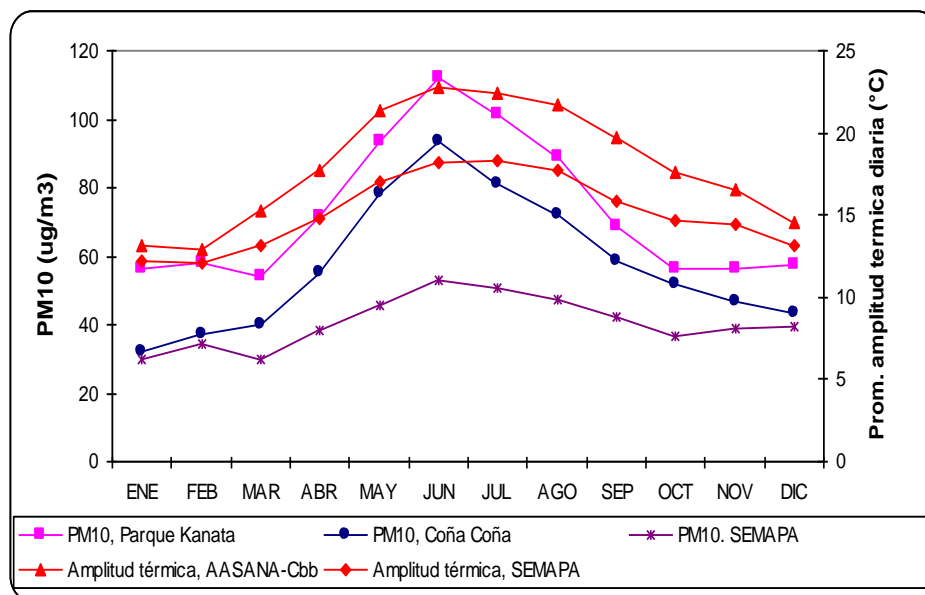


Figura 9: Promedios de la concentración del contaminante PM10 y amplitud térmica diaria en estaciones indicadas, periodo de observación años 2012 a 2016

3.4 Variación estacional de otros contaminantes atmosféricos

Otros contaminantes atmosféricos importantes son el O_3 , NO_2 y el SO_2 que se miden en la estación de Parque Kanata y la estación de SEMAPA. El NO_2 y SO_2 son contaminantes primarios cuyas inmisiones están muy asociadas a las fuentes de emisión directas y a los mecanismos de dispersión y ventilación que se produzcan en la atmósfera. En la ciudad de Cochabamba la principal fuente de emisiones de NO_2 es el parque vehicular, mientras que para el SO_2 son la fuentes de área (Pareja, Hinojosa, & Luján, 2012), asociadas sobre todo a la quema de biomasa y algunos procesos industriales.

En la Figura 10 apreciamos que el mayor nivel de inmisiones de SO_2 se produce en el mes de julio en la zona del Parque Kanata, un comportamiento similar a la variación estacional del PM_{10} . Esto es consistente con el hecho de que las inversiones térmicas en este mes del año son más pronunciadas y reducen la ventilación de la atmósfera, sobre todo en esta región de la ciudad de Cochabamba. El comportamiento estacional del SO_2 en la zona del Parque Kanata es muy similar al

comportamiento de los niveles de PM_{10} en esta zona, esto evidencia que el comportamiento de contaminantes primarios depende por una parte de las cantidades emitidas como de las variaciones estacionales de la ventilación atmosférica. Las inversiones térmicas con más pronunciadas y duran más tiempo en la época de invierno, y tiene un efecto más pronunciado en las zonas más bajas de la ciudad, por lo que en estas zonas se observan los mayores niveles de contaminación en el mes de junio. El valor guía de la OMS para el SO_2 (promedio diario) es de $20 \mu g m^{-3}$ (OMS, 2006), vemos que este valor límite es superado en los meses de junio a agosto en la zona de Parque Kanata.

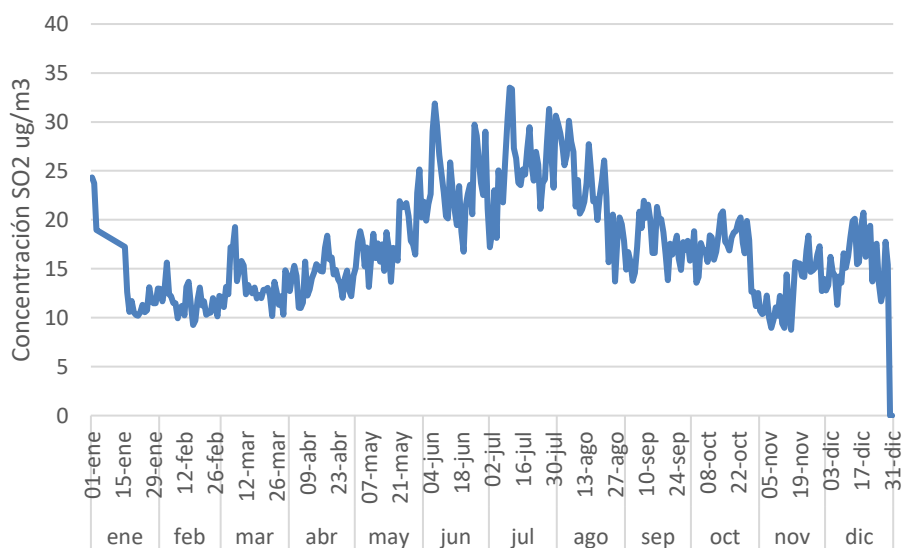


Figura 10: Variación estacional de los promedios diarios de concentración de SO_2 , para el año 2015, en la estación de Parque Kanata, Cochabamba.

En la Figura 11 observamos la variación estacional de NO_2 (promedios diarios) en los años 2013 y 2014, para las estaciones de Parque Kanata (sur) y SEMAPA (norte). Podemos apreciar que los niveles de contaminación en la estación de Parque Kanata son más elevados y presentan una variación estacional importante, se observan mayores niveles de este contaminante en la época de invierno, en particular en los meses de junio y julio. Esto es consistente con la variación estacional de un contaminante primario en esta zona, similar al comportamiento del PM_{10} y SO_2 . En esta zona existe también un mayor tráfico vehicular.

Los niveles de NO_2 en la estación de SEMAPA, no presenta una variación estacional significativa, aunque se percibe un ligero aumento de la contaminación en los meses de la primavera que parece estar más relacionada con la variación del tráfico

vehicular en la zona. Los niveles aparecen mucho más bajos que en el sitio de Parque Kanata, en promedio los valores son prácticamente la mitad. Esta diferencia está asociada por una parte a una menor emisión por el tráfico vehicular y también una mejor ventilación de la atmósfera en la zona de SEMAPA (ver artículo de Calla & Luján en este mismo número).

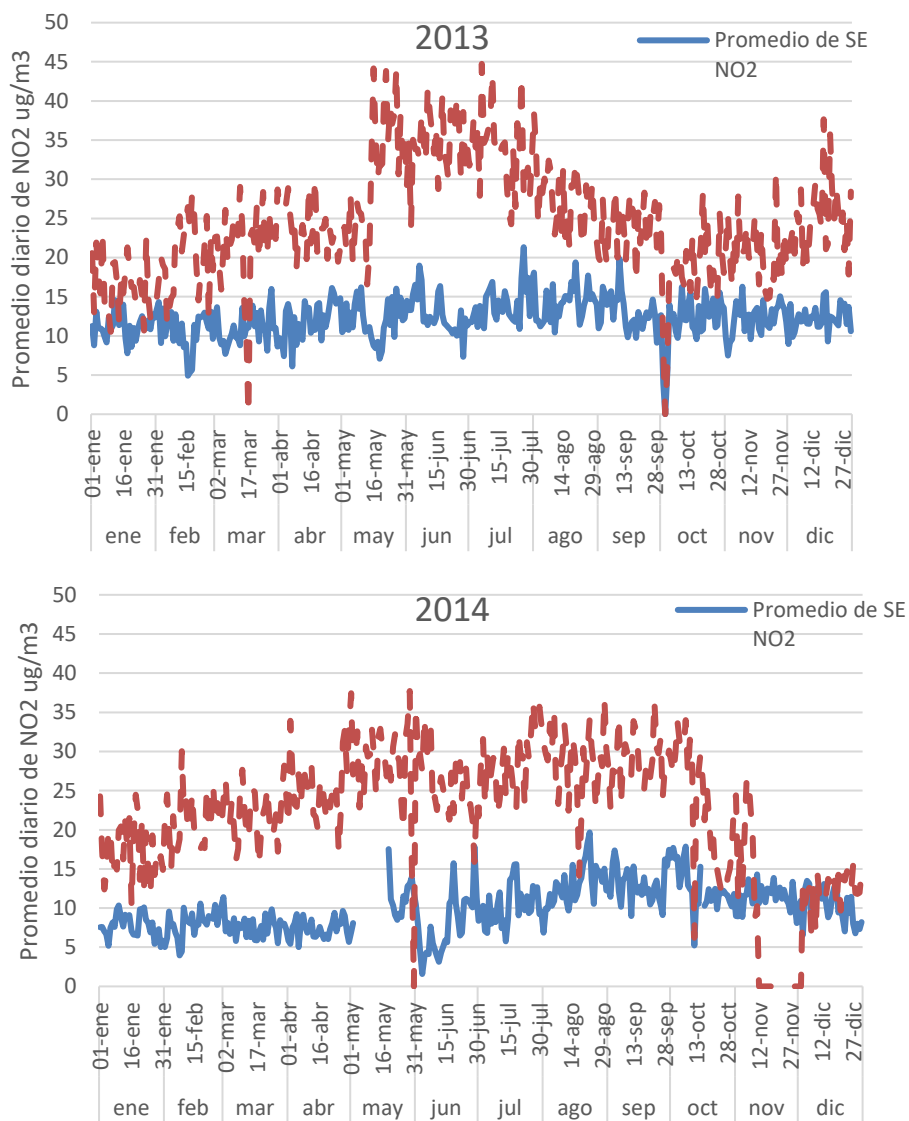


Figura 11: Variación estacional de la concentración de NO₂ (promedios diarios) en los años 2013 y 2014 en las estaciones de Parque Kanata (sur) y SEMAPA (norte) de la ciudad de Cochabamba.

El Ozono es un contaminante secundario que se forma en la tropósfera gracias a la presencia de NO₂, hidrocarburos volátiles (HCV) y radiación solar. Las condiciones más favorables de la relación NO₂/HCV se da, en general, en las zonas periféricas de la ciudad (Manahan, 1994).

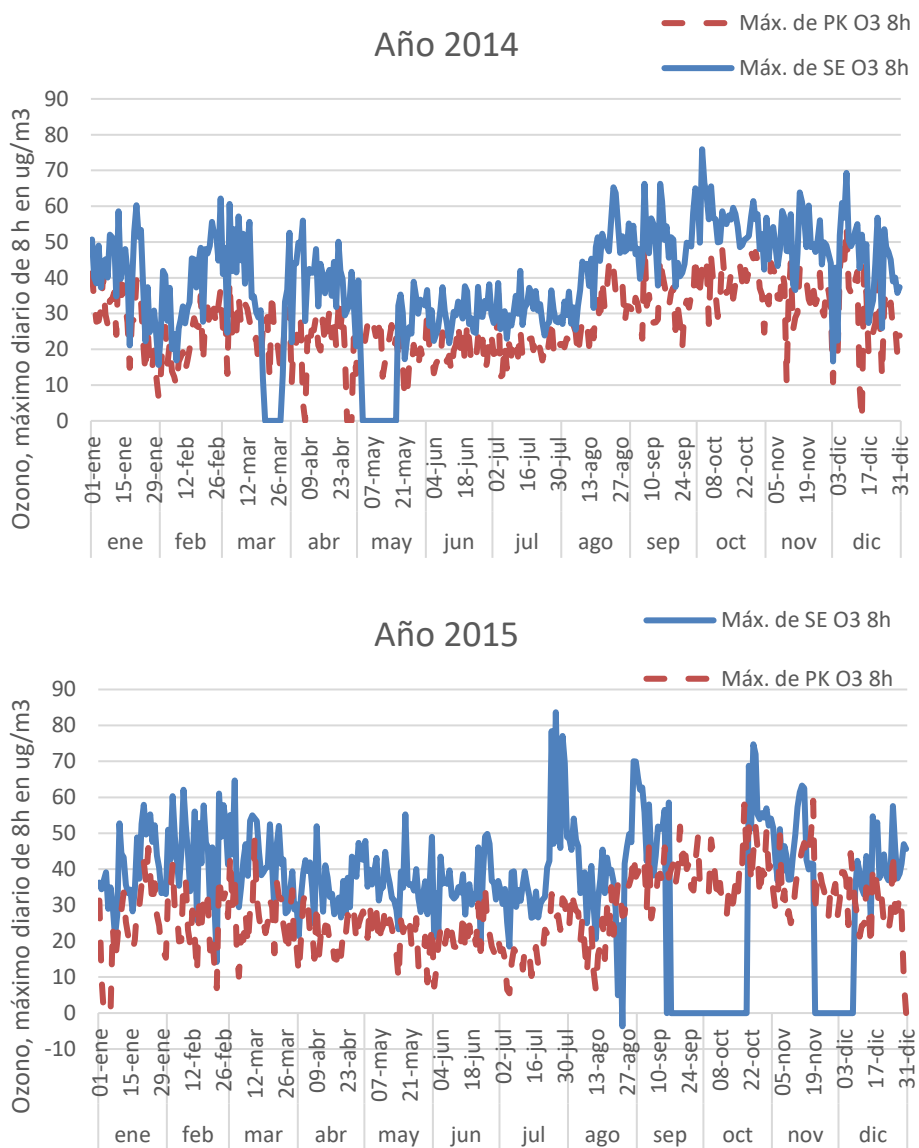


Figura 12: Variación estacional de los máximos diarios de 8 h en los años 2014 y 2015, en las estaciones de SEMAPA (SE) y Parque Kanata (PK) en la ciudad de Cochabamba.

En el caso de Cochabamba, los niveles de Ozono son mayores en la estación de SEMAPA en relación a la estación de Parque Kanata (ver Figura 12). Para el año 2014 el promedio anual de los máximos de 8 h en SEMAPA fue de $75,9 \mu\text{g m}^{-3}$ y en el Parque Kanata $54,8 \mu\text{g m}^{-3}$. Esto muestra claramente que las condiciones para la formación de Ozono son más favorables en la zona de SEMAPA. El mismo comportamiento se obtuvo con medidores pasivos que se empleaban en la Red MoniCA hasta el 2009.

En cuanto a la variación estacional, el nivel de Ozono está muy directamente relacionado con la intensidad de radiación solar. En la Figura 12 podemos observar que los niveles de Ozono aumentan principalmente en los meses de la primavera del hemisferio sur, en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Esta es la época en la que se tiene una mayor intensidad de radiación solar y también una mayor intensidad de radiación ultravioleta.

4 Conclusiones

En el presente estudio se caracterizó el comportamiento estacional de los contaminantes primarios que se miden en las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad de Cochabamba.

Se pudo establecer que el comportamiento de los contaminantes primarios tales como el material particulado (PM_{10}), NO_x y SO_2 , tienen un comportamiento estacional que está directamente relacionado con la ventilación de la atmósfera en las diferentes épocas del año. Debido a la presencia de cadenas montañosas al norte y al sur del valle en el que se encuentra la ciudad de Cochabamba, el régimen de vientos depende fuertemente de los vientos de montaña y de la estabilidad vertical de la atmósfera. En la época de invierno se producen con mayor frecuencia inversiones térmicas que reducen la ventilación de la atmósfera y también la altura de mezcla. Esto redundará en un fuerte incremento de inmisiones en cuanto a contaminantes primarios en esta época del año. Este comportamiento está particularmente acentuado en lo que se refiere al PM_{10} y el SO_2 ; el nivel de inmisiones de estos contaminantes prácticamente se duplica en la época del invierno, en los meses de junio y julio. Este fenómeno es también más marcado en las zonas de menor altitud, debido a que en esas regiones la inversión térmica parece ser más estable. En el verano, la presencia de lluvias y una menor incidencia de la inversión térmica, que aumenta la ventilación de la atmósfera, reduce el nivel de inmisiones de estos contaminantes.

Espacialmente, los contaminantes primarios presentan mayores niveles de inmisión en las zonas con mayor tráfico vehicular y menor ventilación de la atmósfera. Es el caso de la zona sur de la ciudad, donde se encuentra la estación de

Parque Kanata, en esta región se tienen los mayores niveles de contaminación por contaminantes primarios.

El comportamiento estacional del Ozono, que es un contaminante secundario, difiere sustancialmente del comportamiento estacional de los contaminantes primarios. La variación estacional muestra una fuerte dependencia con la variación de la intensidad de radiación solar y los niveles de radiación ultravioleta (Zaratti, 2003), los mayores niveles de inmisión de Ozono se observan en los meses de marzo, abril (otoño) y en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Especialmente, se observan mayores niveles de contaminación por Ozono en la zona norte de la ciudad, mediciones previas de la Red MoniCA demostraron que los niveles de Ozono son en general mayores en las zonas periféricas de la ciudad, como ocurre en muchas ciudades.

Estos resultados evidencian que la población de la ciudad de Cochabamba está expuesta a mayores riesgos por contaminación atmosférica en los meses de invierno (junio, julio), debido a contaminantes primarios y en la primavera debido a un aumento de los niveles de Ozono, que seguramente estarán también acompañados por mayores niveles de smog fotoquímico en general.

Bibliografía

- [1] Manahan, S. (1994). *Environmental Chemistry*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.
- [2] OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS: Actualización Mundial 2005*. Ginebra: OMS.
- [3] Pareja, A., Hinojosa, M., & Luján, M. (2012). Inventario de Emisiones Atmosféricas Contaminantes de la Ciudad de Cochabamba, Bolivia, año 2008. *ACTA NOVA*, 5(3), 344-374.
- [4] SENAMHI, Bolivia. (2015). *Servicio Nacional de Meteorología de Hidrología*. Recuperado el junio de 2015, de <http://www.senamhi.gob.bo/>
- [5] Zaratti, F. (2003). La radiación ultravioleta solar. En F. Zaratti, & R. Forno, *La radiación ultravioleta en Bolivia* (págs. 37-56). La Paz, Bolivia: LFA-UMSA.