



## Composición iónica de la lluvia y tipos de situaciones sinópticas en Cuba: Efectos en la contaminación atmosférica

### Ionic composition of rain and synoptic situation types of Cuba: Effects on atmospheric pollution

Dra. Rosemary López Lee<sup>1✉</sup>, Msc. Evelio García Valdés<sup>2</sup>, Msc. Arnaldo Collazo Aranda<sup>1</sup>, Lic. Pedro Juan Expósito<sup>1</sup>, Lic. Armando Jesús Perdomo Morales<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

<sup>2</sup> Centro de Pronóstico, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

<sup>3</sup> Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

#### Resumen

El objetivo de este trabajo fue determinar la composición iónica de lluvias asociadas a tipos de situaciones sinópticas. Se utilizaron muestras de lluvias individuales de las estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica de La Palma, Casablanca y Veguitas. La cuantificación de los iones se realizó por cromatografía de intercambio iónico y la de los elementos por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente. Los tipos de situaciones sinópticas fueron clasificados utilizando la metodología de Lapinel. Los resultados muestran que en Casablanca las lluvias ácidas se asociaron a la influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte. Sin embargo las lluvias en Veguitas fueron básicas debido a la neutralización causada por partículas de la corteza terrestre y altas concentraciones de  $K^+$  que pueden provenir de emisiones por quema de biomasa. Finalmente las lluvias más contaminadas en Casablanca fueron las asociadas a las Zonas Frontales y Anticiclones Migratorios mientras que en La Palma y Veguitas las lluvias fueron limpias.

**Palabras clave:** composición iónica de las lluvias, tipos de situaciones sinópticas (TSS), contaminación atmosférica, Cuba

✉ Autor para correspondencia: Rosemary López Lee, Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Instituto de Meteorología. E-mail: [rosemary.lopez@insmet.cu](mailto:rosemary.lopez@insmet.cu)

Recibido: 2 de octubre de 2016

Aceptado: 3 de noviembre de 2016

## Abstract

The objective of this work was to determine the ionic composition of rains associated to types of synoptic situations. Individual rain samples were used from the air pollution monitoring stations of La Palma, Casablanca and Veguitas. The ion quantification was performed by ion exchange chromatography and that of the elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. The types of synoptic situations were classified using the Lapinel methodology. The results show that acid rainfall in Casablanca was associated with the influence of the North Atlantic Subtropical Anticyclone. However the rains in Veguitas were basic due to the neutralization caused by particles of the earth's crust and high potassium concentrations that can come from emissions by burning of biomass. Finally the most polluted rains in Casablanca were associated with the Front Zones and Migratory Anticyclone while in La Palma and Veguitas the rains were clean.

**Key words:** ionic composition of rain, type of synoptic situation, atmospheric pollution, Cuba

## Introducción

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) afirma que las observaciones de la composición química y características físicas de la atmósfera a escala global y regional proporcionan a la comunidad científica los medios para predecir el estado futuro de la atmósfera, y contribuye al desarrollo de la política ambiental ([WMO & GAW, 2007](#)). La química de las precipitaciones sigue siendo una línea de investigación importante en el norte de América, el sudeste de Asia y Europa ([Vet et al., 2014](#)). Su estudio contribuye a la comprensión global de muchos temas ambientales contemporáneos, como la contaminación del aire, la deposición ácida, la eutrofización de los ecosistemas, los ciclos biogeoquímicos, y el cambio climático ([WMO & GAW, 2007](#)).

La lluvia ácida se suele atribuir a las emisiones antropogénicas, pero las

condiciones meteorológicas y las variaciones climatológicas también afectan la deposición húmeda ([Vet et al., 2014](#)). En Cuba la evaluación de la acidificación de las precipitaciones a escala regional mostró que aún persisten localidades como Pinares de Mayarí, Casablanca, Gran Piedra y Palo Seco con una alta frecuencia de lluvias ácidas ([López et al., 2014](#)). Por esta razón, el objetivo del trabajo fue determinar la composición iónica de lluvias asociadas a tipos de situaciones sinópticas (TSS) y de esta forma contribuir a estimar la contaminación de la atmósfera en localidades de Cuba.

## Materiales y Métodos

### Sitios de muestreo

Las estaciones de monitoreo utilizadas para la recolección de muestras individuales de lluvias asociadas a las situaciones sinópticas aparecen en la [tabla 1](#).

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de las estaciones

Estación	Provincia	Tipo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Periodo muestreo
La Palma	Pinar del Río	Rural	22°.45.59	83°.33.41	47,39	2013 -2014
Casablanca	La Habana	Urbana-Industrial	23°.08.35	82°.20.30	50,80	2010 -2014
Veguitas	Granma	Rural	20°.34.72	76°.89.65	28	2013-2014

### Colección de muestras de lluvia

La metodología de muestreo empleada fue la recomendada por el sistema de vigilancia de atmósfera global (VAG) de la OMM para el caso de la operación de colectores manuales de lluvia, que ha sido utilizada por otros autores como procedimiento para la captación de precipitación húmeda ([WMO, 1978](#)).

### Procedimientos analíticos

El pH se determinó con el medidor Oakton serie 1100. La cuantificación de las especies químicas  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  se realizó en un cromatógrafo de intercambio iónico ICS-3000. La cuantificación de los metales  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se realizó por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y por espectrometría de absorción atómica.

### Información meteorológica

La información meteorológica fue obtenida del Centro del Clima del Instituto de Meteorología. Los tipos de situaciones sinópticas (TSS) fueron clasificados según la metodología desarrollada por [Lapinel \(1988\)](#) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Clasificación de los tipos de situaciones sinópticas (TSS)

Siglas	Nombre
TSS I	Anticiclón del Atlántico
TSS II	Anticiclón extendido
TSS III	Gradiente débil
TSS IV	Situaciones ciclónicas
TSS V	Zonas de convergencia
TSS VI	Baja extratropical
TSS VII	Zonas frontales
TSS VIII	Anticiclones migratorios
TSS IX	Otras situaciones (indeterminadas)

### Tratamiento estadístico de los datos

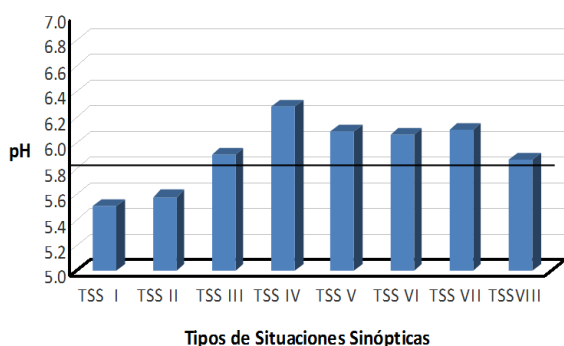
El procesamiento estadístico de los datos fue realizado utilizando los softwares MS-Excel y MINITAB14. Se utilizó la prueba no paramétrica H de Kruskal Wallis para determinar si existían diferencias significativas entre los TSS con la variación del pH y mineralización de las lluvias. La prueba no paramétrica de Dunn se utilizó para verificar entre cuales TSS existían diferencias estadísticas significativas.

### Resultados y Discusión

Caracterización de la composición química de la lluvia asociada a patrones sinópticos que afectan regiones de Cuba.

## Estación de Casablanca

La [figura 1](#) muestra las diferencias en la distribución del valor medio del pH de la lluvia asociada a los 8 TSS estudiados en el presente trabajo, para las cuales no se evidenció diferencias estadísticas significativas utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn.

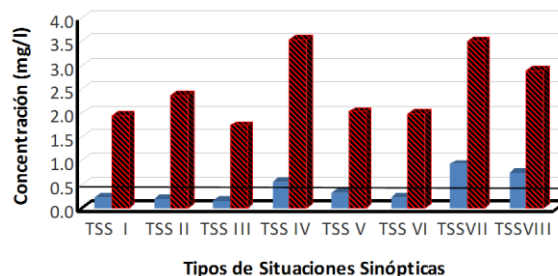


**Figura 1.** Valores de pH promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Casablanca durante el período 2010-2014

Las lluvias ácidas se asociaron al TSS I y TSS II ( $\text{pH} < 5,6$ ) en contraste al resto de los TSS, donde predominaron los valores de pH básicos. Lo cual, difiere a lo planteado por [Rodríguez \(1991\)](#), y [Cuesta \(1995\)](#), quienes la asociaron a TSS de origen extratropical (TSS VIII y TSS VII). En los TSS I y TSS II se producen por lo general lluvias convectivas que remueven los contaminantes emitidos por la gran actividad antropogénica de la ciudad de La Habana. Mientras que las masas de aire de los TSS VIII y TSS VII pueden transportar además contaminantes desde el continente norteamericano. El norte oriental de América continúa a nivel global entre las zonas de altas emisiones de los principales responsables de la acidificación de las

lluvias  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrógeno) [Vet et al. \(2014\)](#).

En la [figura 2](#) se puede observar que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso promedio en todos los TSS estudiados se encuentran por encima de los valores de fondo de 0,155 y 0,48 mg/l para el hemisferio norte ([Pio et al., 1991](#)).



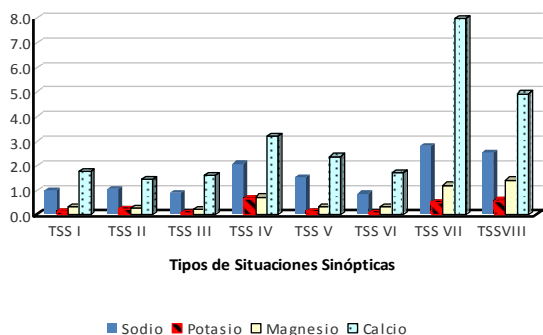
**Figura 2.** Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Casablanca durante el período 2010-2014

Las mayores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  se cuantificaron en las lluvias asociadas a los TSS VII, TSS VIII y en el TSS IV. Mientras, los valores más altos de  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso se detectaron en los TSS VII, TSS IV y TSS VIII. Los TSS VII y VIII pueden transportar estos compuestos desde el continente norteamericano.

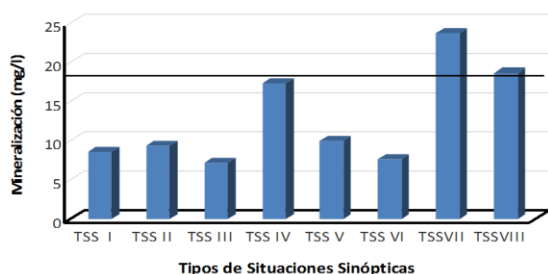
En la [figura 3](#) se puede observar que las mayores concentraciones de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  se cuantificaron en el TSS VII y TSS VIII, por la turbulencia superficial que facilita la incorporación de estas especies químicas desde la corteza terrestre de la ciudad o del continente americano ([Rodríguez, 1991](#)).

Los valores más altos de mineralización se cuantificaron en los TSS VII (23,70 mg/l) y TSS VIII (18,65 mg/l), lo cual indica que fueron las lluvias más contaminadas, principalmente el TSS VII

con valores ligeramente superiores a los 20 mg/l (Figura 4).



**Figura 3.** Concentraciones de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Casablanca durante el período 2010-2014



**Figura 4.** Valores de mineralización promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Casablanca durante el período 2010-2014

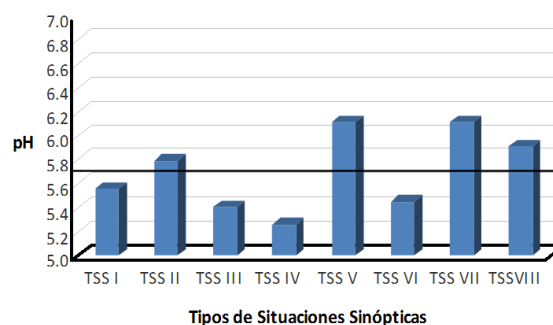
En la figura 4 se puede observar que existieron para los valores de mineralización diferencias estadísticamente significativas utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn entre el TSS I y el TSS VII; entre el TSS I y el TSS VIII; entre el TSS III y el TSS VII; entre el TSS III y el TSS VIII; entre el TSS VI y el TSS VIII. A manera general se observan

diferencias significativas entre los TSS tropicales (TSS I, TSS II, TSS III) y los TSS extratropicales TSS VII y TSS VIII.

De esta forma arribamos a la conclusión de que en Casablanca ante la influencia de los TSS tropicales las lluvias podrían ser limpias y por ende la atmósfera y ante la influencia de los TSS extratropicales VII y VIII las lluvias podrán estar más contaminadas y por ende la atmósfera. Lo cual coincide con la mayor probabilidad de influencia de estos últimos patrones durante el período poco lluvioso que es cuando otros autores describen que existen condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de los contaminantes (Cuesta, 1995).

### Estación La Palma

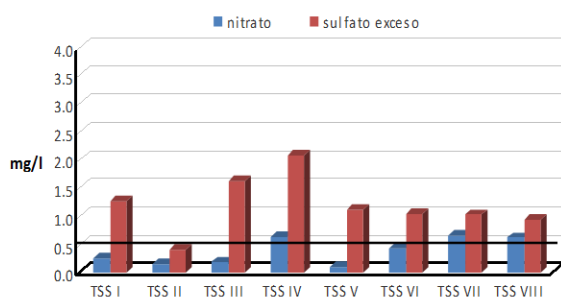
En la figura 5 se observa que las lluvias más ácidas se asociaron a los TSS IV. Otras lluvias ácidas fueron las asociadas a los TSS III, TSS VI, TSS I. Mientras que las lluvias asociadas a los TSS VII y TSS VIII fueron básicas de forma similar a los resultados obtenidos en Casablanca en el presente estudio. No se evidenció



**Figura 5.** Valores de pH promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron La Palma durante el período 2013-2014

diferencias estadísticas significativas entre los valores de pH de las lluvias asociadas a los TSS utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn.

Los valores más altos de  $\text{NO}_3^-$  se observaron en los TSS VII, TSS VIII y en el TSS IV. Mientras, los valores más altos de  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso se detectaron en las TSS IV, TSS III, TSS I (Figura 6). La Palma es una estación rural bajo la influencia de pocas fuentes de emisión fijas en comparación con Casablanca por lo cual las concentraciones de nitrato y sulfato fueron menores.

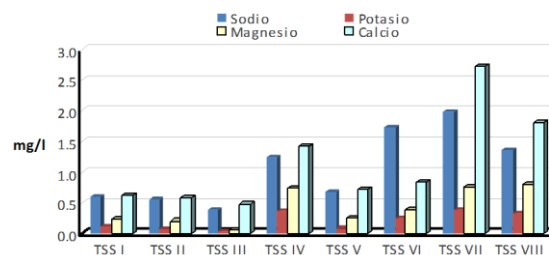


**Figura 6.** Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso promedio en los patrones sinópticos (TSS) que afectaron Veguitas durante el período 2013-2014

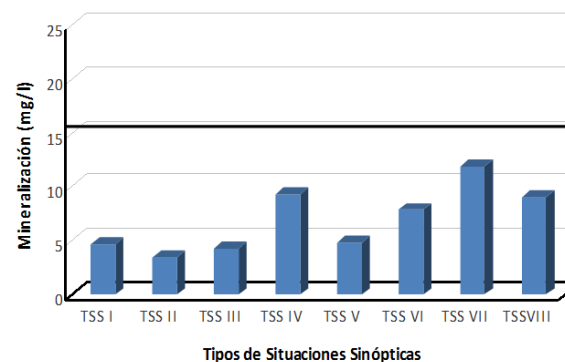
Mientras que los valores más altos de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se cuantificaron en las TSS VII, TSS VIII y TSS IV probablemente por la mayor fuerza de los vientos que incorporan estos elementos a la troposfera baja de la corteza terrestre (Figura 7).

Los valores más altos de mineralización se cuantificaron en las TSS VII, TSS VIII y TSS IV, aunque como son inferiores a 20 mg/l se consideran lluvias limpias (Figura 8). Para los valores de mineralización existieron diferencias estadísticas significativas utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn entre el TSS II y

el TSS VII. De esta forma arribamos a la conclusión de que en la Palma ante la influencia del TSS II la troposfera baja fue más limpia que ante la influencia del TSS VII.



**Figura 7.** Concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  promedio en los patrones sinópticos (TSS) que afectaron La Palma durante el período 2013-2014

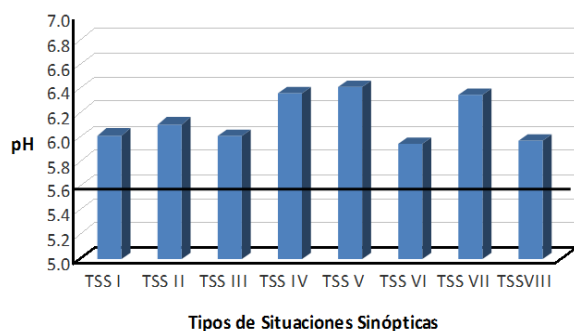


**Figura 8.** Valores de mineralización promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron La Palma durante el período 2013-2014

### Estación Veguitas

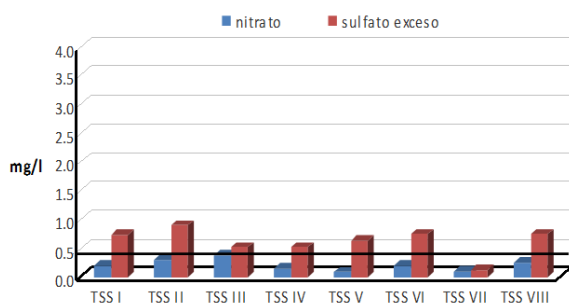
En la estación Veguitas tomando el valor de pH promedio todas las lluvias asociadas a los TSS fueron básicas (Figura 9). Los valores máximos de pH se registraron en el TSS V con  $\text{pH}=7,44$ . No se evidenció diferencias estadísticas significativas entre los valores de pH de las lluvias asociadas a

los TSS utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn.



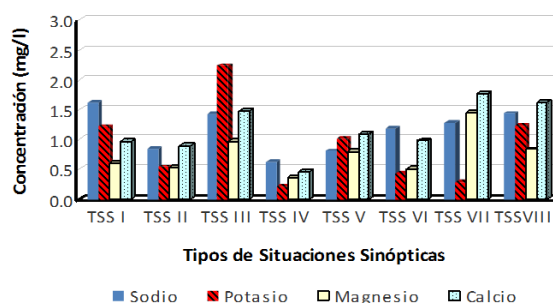
**Figura 9.** Valores de pH promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Veguitas durante el período 2013-2014

En los TSS IV, TSS V y VII las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  promedio se cuantificaron por debajo del valor de fondo de 0,155 y en el TSS VII el  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso promedio se observó por debajo del valor de fondo de 0,48 mg/l informados por [Pio et al. \(1991\)](#), para el hemisferio norte ([Figura 10](#)).



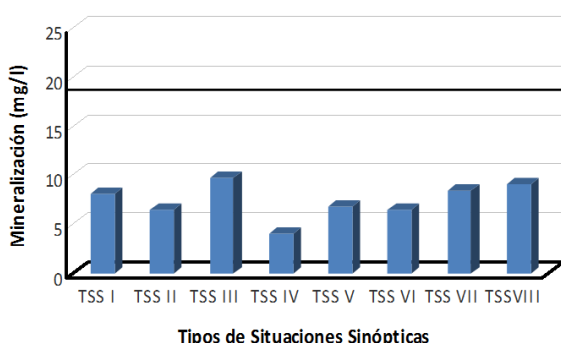
**Figura 10.** Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  exceso promedio en los patrones sinópticos (TSS) que afectaron Veguitas durante el período 2013-2014

Mientras que los valores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son altos en las lluvias asociadas a todos los TSS ([Figura 11](#)). Estos cationes son muy importantes en la neutralización. Es de destacar los altos valores  $\text{K}^+$  cuantificados para esta estación en los TSS I, TSS II, TSS III, TSS V, TSS VI y TSS VIII. Altas concentraciones de este catión son asociadas a la quema de biomasa ([López et al., 2014](#)). De ahí que junto a las altas concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  y las bajas concentraciones de los acidificantes que se cuantificaron en esta estación, las lluvias fueran básicas.



**Figura 11.** Concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Veguitas durante el período 2013-2014

En la [figura 12](#) se puede observar que entre los valores de mineralización de las lluvias asociadas a los TSS no existieron diferencias estadísticas significativas utilizando la prueba H de Kruskal Wallis y de Dunn. Los valores de las lluvias de todos los TSS son inferiores a 20 mg/l por lo cual se consideran lluvias limpias.



**Figura 12.** Valores de mineralización promedio en las situaciones sinópticas (TSS) que afectaron Veguitas durante el período 2013-2014

## Conclusiones

- En la estación de Casablanca, la acidificación de las lluvias se asoció a la influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, por lo cual los procesos de transporte de contaminantes a cortas distancias son los primordiales en la generación de este problema ambiental.
- En la estación de la Palma, las lluvias ácidas se asociaron a la influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte y a sistemas de bajas presiones, por lo cual los procesos de transporte de contaminantes a cortas, medias y largas distancia son importantes en la generación de este problema en esta localidad.
- En la estación de Veguitas, se estima que las lluvias básicas son el resultado de una fuerte neutralización causada por el transporte a escala local y mesoescala de polvo y partículas de la corteza terrestre

y concentraciones altas de  $K^+$  que pueden provenir de emisiones por quema de biomasa.

- Las concentraciones de acidificantes altas, principalmente de sulfatos por encima de los valores de fondo en las tres estaciones sugiere una redistribución de estas concentraciones a mesoescala, por lo cual las emisiones de  $SO_2$  antropogénicas, continúan siendo un problema importante para la calidad del aire.
- En la estación de Casablanca existen evidencias de que las lluvias más contaminadas son las asociadas a las Zonas Frontales y Anticiclones migratorios; y por ende la atmósfera. Mientras en la estación de La Palma y Veguitas las lluvias son limpias.

## Referencias

- Cuesta, O. 1995. Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas. Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba.
- Lapinel, B. 1988. La Circulación Atmosférica y Las Características Espacio Temporales de las Lluvias en Cuba. Tesis de Doctorado, Camagüey, Cuba.
- López, L. R.; Collazo, A. A. & Hernández, S. F. 2014. "Acidificación de las precipitaciones: causas, efectos, condiciones meteorológicas, políticas de



- gestión y estado actual en Cuba”. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(2): 165–176, ISSN: 0864-151X.
- Pio, C. A.; Salgueiro, M. L. & Nunes, T. V. 1991. “Seasonal and air-mass trajectory effects on rainwater quality at the south-western european border”. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 25(10): 2259–2266, ISSN: 0960-1686, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90101-C](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686(91)90101-C).
- Rodríguez, A. 1991. *Composición química de las precipitaciones de sistemas meteorológicos y acidez de la lluvia en Cuba*. Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba, 111 p.
- Vet, R.; Artz, R. S.; Carou, S.; Shaw, M.; Ro, C.-U.; Aas, W.; Baker, A.; Bowersox, V. C.; Dentener, F.; Galy-Lacaux, C.; Hou, A.; Pienaar, J. J.; Gillett, R.; Forti, M. C.; Gromov, S.; Hara, H.; Khodzher, T.; Mahowald, N. M.; Nickovic, S.; Rao, P. S. P. & Reid, N. W. 2014. “A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus”. *Atmospheric Environment*, 93: 3–100, ISSN: 1352-2310, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>.
- World Meteorological Organization (WMO). 1978. *International operations handbook for measurement of background atmospheric pollution*. (ser. WMO, no. ser. 491), Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 110 p., ISBN: 978-92-63-10491-5.
- World Meteorological Organization (WMO) & Global Atmosphere Watch (GAW). 2007. “Strategic Plan: 2008-2015”. In: *A Contribution to the Implementation of the WMO Strategic Plan: 2008-2011*, (ser. GAW Report, no. ser. 172), Geneva, Switzerland: WMO, Available: [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw\\_home\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html).