



UNIVERSIDAD DE CHILE
PROGRAMA INTERFACULTADES
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

RELACIÓN ENTRE COMPONENTES IÓNICOS DE LA LLUVIA, SUS
FUENTES DE EMISIÓN Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS
ESTACIONALES. APORTE A LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL
AIRE EN CUBA

Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

ROSEMARY LÓPEZ LEE

Directora de tesis
Dra. Margarita Préndez Bolívar

Santiago, Chile
2011



UNIVERSIDAD DE CHILE
PROGRAMA INTERFACULTADES
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

RELACIÓN ENTRE COMPONENTES IÓNICOS DE LA LLUVIA, SUS
FUENTES DE EMISIÓN Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS
ESTACIONALES. APORTE A LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL
AIRE EN CUBA

ROSEMARY LÓPEZ LEE

Directora de tesis
Prof. Dra. Margarita Préndez Bolívar

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Presidente
Prof. Italo Serey

Profesor Informante (1)
Prof. Raúl Morales

Profesor Informante (2)
Prof. Juan Caldentey

Santiago, Chile
2011

***A mis hijas:
Ana Laura y Ariadna***

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile por financiar mis estudios del Magíster en Gestión y Planificación Ambiental.

A mi directora de tesis profesora Margarita Préndez un profundo agradecimiento por su dedicación y guía constante en el desarrollo de esta tesis.

A Del Capiro Análisis y Asesorías Ltda., Laboratorio ALEPH por contribuir con el soporte necesario para la realización de este trabajo, en especial a Francisco Morales por sus consejos de cromatografía de intercambio iónico.

A la profesora Isel Cortés del CENMA por su preciada colaboración en la culminación de esta investigación.

A los profesores del Magister de Gestión y Planificación Ambiental por contribuir en mi formación profesional, en especial a los profesores Hugo Romero e Italo Serey por introducirme en el pensamiento ecosistémico.

A Marcela Zacarías, Mercedes Martínez, Regla María Pérez, Adriana Valdés y Osvaldo Cuesta por poder contar siempre con ellos.

A mis compañeros del magíster, del Instituto de Meteorología de Cuba y familiares que me animaron y colaboraron en la culminación de esta tesis.

Muchas Gracias a mis padres que cada día me inspiran a ser mejor y seguir adelante.

RESUMEN

Los gases y aerosoles atmosféricos emitidos desde fuentes naturales y antropogénicas se incorporan a las gotas de lluvia a través de varios procesos fisicoquímicos. El conocimiento de la composición química de las precipitaciones contribuye al entendimiento de la contaminación de la atmósfera y sus efectos sobre los ecosistemas.

El objetivo de este trabajo fue analizar la influencia de los componentes físicos y químicos de la lluvia en Cuba que den cuenta del origen de los contaminantes que afectan la calidad del aire, con el objeto de mejorar su gestión.

Las muestras de agua de lluvia provienen de 11 estaciones de monitoreo de la contaminación de la atmósfera de Cuba durante el período noviembre 2008-abril 2010, las cuales fueron recolectadas con equipos de muestreo manuales. 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.

Se observó que los valores del pH promedio ponderados por volumen fueron ligeramente básicos en la mayoría de las estaciones, lo cual sugiere pese a las concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} no marino una gran influencia de especies alcalinas en las lluvias de las diferentes zonas de Cuba, con excepción de las estaciones de Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Palo Seco cuyos valores fueron inferiores a 5,6. Las concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} no marino fueron superiores a los valores de fondo informados para el hemisferio norte en todas las estaciones y las mayores concentraciones se observaron en las zonas ubicadas directamente bajo la influencia de fuentes antropogénicas. Además, se observó que el HCOO^- y el CH_3COO^- contribuyen de forma importante a la acidez de las lluvias en áreas rurales.

El mayor flujo de depositación húmeda fue para Cl^- y Na^+ , lo cual refleja la influencia de los aerosoles marinos en las precipitaciones de Cuba; además, las tasas de depositación de sulfatos fueron elevadas en varias zonas de Cuba a niveles que se han informado para zonas de los EE.UU., donde han aparecido efectos ambientales adversos.

Las principales fuentes antropogénicas de los iones son la quema de combustible fósil por termoeléctricas, fábricas de cemento e industrias de procesamiento de níquel y la quema de biomasa por malas prácticas agrícolas. Los elementos bario, selenio y plomo tienen un origen antrópico precisamente en zonas industrializadas o que se encuentra bajo la influencia directa de éstas.

En la región Occidental se observa un aumento de las concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} durante el período poco lluvioso, probablemente debido al transporte local de contaminantes y desde los Estados Unidos.

Se concluye que sólo una pequeña fracción de los iones potencialmente ácidos contribuyen a la acidez libre de las lluvias, debido a la capacidad neutralizante del Ca^{2+} y NH_4^+ , principalmente. Se propone el fortalecimiento del control de las emisiones de las grandes fuentes fijas, donde la implementación de técnicas de abatimiento para SO_2 y NO_x será la principal medida para mejorar la calidad del aire en Cuba.

Palabras clave: lluvia ácida, contaminación atmosférica, pH, tasa de deposición húmeda, Cuba.

ABSTRACT

Atmospheric gases and aerosols from natural and anthropogenic emissions are incorporated into raindrops through various physicochemical processes during rain events. Knowledge of the chemical composition of precipitation is critical to understanding air pollution and its effects on ecosystems.

The objective of this study was to analyze the influence of the physical and chemical components of rain on the origin of pollutants affecting air quality in Cuba in order to improve their management.

Rainwater samples were gathered from 11 pollution monitoring stations for Cuba's atmosphere between November 2008 and April 2010, using manual samplers. The different analyses were conducted using ion chromatography equipment with a conductivity detector and an optical emission spectrophotometer with inductively coupled plasma.

The volume-weighted average pH was slightly basic for most stations, suggesting that alkaline species exhibit a strong influence on Cuba's precipitation, with the exception of the *Gran Piedra*, *Pinares de Mayari* and *Palo Seco* stations, for which values were below 5.6. For all stations, the concentrations of NO_3^- and non sea salt SO_4^{2-} were higher than the background values reported for the northern hemisphere, and the highest concentrations were observed in areas directly influenced by anthropogenic sources. In addition, it was observed that acetic and formate ions are important contributors to the acidity of rain in rural zones.

Both Cl^- and Na^+ exhibited higher levels of wet deposition, indicating the influence of marine aerosols on Cuba's rain. Also, rates of sulfate deposition were high in parts of Cuba, similar to the rates in some US locations where adverse environmental effects have occurred.

The major anthropogenic sources of ions are the burning of fossil fuel by power plants, cement factories, nickel-processing industries, and the burning of biomass through poor agricultural practices. Ba, Se and Pb exhibit an anthropogenic origin precisely for those locations considered industrialized areas or under the direct influence of industrialized areas.

The western region exhibited increased concentrations of NO_3^- and SO_4^{2-} during the dry season, most likely due to the long-range transport of pollutants from the northeastern United States and locally.

The study concludes that only a small fraction of the potentially acidic ions contributes to the free acidity of Cuba's rainwater, mainly due to the neutralizing capacity of Ca^{2+} and NH_4^+ . Thus, it is proposed that the implementation of abatement techniques for SO_2 and NO_x in order to control emissions from major stationary sources will be the most effective measure to improve air quality in Cuba.

Keywords: acid rain, atmospheric pollution, pH, wet deposition, Cuba.

INDICE

1. Introducción.	1
2. Hipótesis y Objetivos.	3
2.1. Hipótesis.	3
2.2. Objetivos.	3
3. Marco Teórico.	4
3.1. Composición química de las precipitaciones.	4
3.2. Relación entre factores meteorológicos y composición química de la lluvia.	7
3.3. Efectos ambientales de las lluvias ácidas.	9
3.4. Gestión de la calidad del aire en Cuba.	11
4. Materiales y Métodos.	15
4.1. Sitios de muestreo.	15
4.2. Colección de muestras de lluvia.	18
4.3. Condiciones climáticas y datos meteorológicos.	19
4.4. Procedimientos analíticos.	20
4.5. Tratamiento de los resultados de los análisis químicos.	22
4.6. Identificación del origen de los iones y asociación a sus posibles fuentes.	23
4.7. Relación entre las concentraciones mensuales de los iones NO_3^- y SO_4^{2-} y las condiciones sinópticas que afectaron a Cuba durante el periodo noviembre 2008-abril 2010.	24
4.8. Propuesta de medidas de gestión para mejorar la calidad el aire en Cuba.	24
5. Resultados y Discusión.	25
5.1. Variación estacional - espacial del pH, conductividad y componentes químicos de las lluvias en Cuba.	25
5.1.1. Variación estacional - espacial del pH y conductividad de las lluvias en Cuba.	25
5.1.2. Variación estacional - espacial de aniones y cationes mayoritarios en las lluvias de Cuba.	27

5.1.3.	Variación estacional - espacial de otros elementos en las lluvias de Cuba.	35
5.2.	Tasas de depositación húmeda para los iones y los elementos.	38
5.3.	Contribuciones ácidas.	40
5.4.	Factores de neutralización.	41
5.5.	Potencial de neutralización y acidificación.	42
5.6.	Razón $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ en diferentes zonas de Cuba.	42
5.7.	Contribución de origen natural a las concentraciones de iones y elementos de aguas de lluvias colectadas en Cuba.	43
5.7.1.	Contribución marina a las concentraciones de iones.	43
5.7.2.	Contribución de la corteza terrestre a la concentración de elementos.	44
5.8.	Identificación de las fuentes por análisis de componentes principales para los iones mayoritarios en cada estación de monitoreo.	45
5.9.	Relación entre las concentraciones mensuales de los iones NO_3^- y SO_4^{2-} y las condiciones sinópticas que afectaron a Cuba durante el período noviembre 2008- abril 2010.	49
5.10.	Medidas de gestión para mejorar la calidad del aire en Cuba.	50
6.	Conclusiones.	58
7.	Recomendaciones.	60
8.	Referencias Bibliográficas.	62
9.	Anexos.	71
	Anexo 1. Índice de calidad ambiental de la norma cubana 111.2004.	72
	Anexo 2. Inventario de emisiones de Cuba durante el período 1990-2004.	73
	Anexo 3. Resumen del análisis estadístico descriptivo de la concentración de los iones y elementos en las 11 estaciones de monitoreo de vigilancia de la contaminación de la atmósfera de Cuba.	75
	Anexo 4. Comportamiento mensual de la cantidad de lluvia, temperatura, humedad relativa y rapidez del viento en 11 estaciones de monitoreo de Cuba durante el período Noviembre 2008 – Abril 2010.	86

Anexo 5. Contribuciones ácidas a las lluvias de Cuba.	91
Anexo 6. Matrices de Spearman para las concentraciones de los iones analizados en el agua de lluvia de cada estación de monitoreo de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	a) Ubicación geográfica de la isla de Cuba y los principales sistemas montañosos. b) Localización de las estaciones de monitoreo durante el período noviembre 2008 – abril 2010.	16
Figura 2	Diagrama del colector de agua de lluvia.	19
Figura 3	Valores promedio de pH ponderados por volumen para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	25
Figura 4	Valores promedio ponderados por volumen de conductividad en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	26
Figura 5	Concentraciones promedio ponderados por volumen de NO_3^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	27
Figura 6	Concentraciones promedio ponderados por volumen de SO_4^{2-} exceso en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	28
Figura 7	Distribución de las emisiones de SO_2 proveniente de las fuentes locales, Cuba y dirección de los Frentes Fríos.	29
Figura 8	Concentraciones promedio ponderados por volumen de CH_3COO^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	29
Figura 9	Concentraciones promedio ponderados por volumen de CHOO^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	30
Figura 10	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Cl^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	30
Figura 11	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Na^+ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	31
Figura 12	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Mg^{2+} en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	31
Figura 13	Concentraciones promedio ponderados por volumen de NH_4^+ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	32
Figura 14	Concentraciones promedio ponderados por volumen de K^+ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y	32

	noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	
Figura 15	Concentraciones promedio ponderadas por volumen de Ca^{2+} en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	33
Figura 16	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Ba y Se en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	35
Figura 17	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Zn y Cu en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	36
Figura 18	Concentraciones promedio ponderados por volumen de Mn y Fe en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.	36
Figura 19	Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total en estaciones de monitoreo semiurbanas y urbanas de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.	40
Figura 20	Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total en estaciones de monitoreo rurales de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.	40
Figura 21	Variación mensual del NO_3^- durante el período Noviembre 2008-abril 2010 en las estaciones de monitoreo de la región Occidental, Central y Oriental.	51
Figura 22	Variación mensual del SO_4^{2-} no marino durante el período Noviembre 2008-abril 2010 en las estaciones de monitoreo de la región Occidental, Central y Oriental.	52

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud y Norma de concentraciones máximas permisibles en Cuba para los compuestos NO ₂ y SO ₂ .	13
Cuadro 2	Ubicación geográfica de las estaciones.	15
Cuadro 3	Parámetros utilizados en el procedimiento de cromatografía iónica para Dionex ICS-3000.	21
Cuadro 4	Límites de detección y de cuantificación para los análisis por cromatografía de intercambio iónico.	21
Cuadro 5	Límites de detección y de cuantificación para los análisis por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).	22
Cuadro 6	pH y concentraciones ponderadas por volumen (µeq/l) de iones presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo urbanas de Cuba y otros países.	34
Cuadro 7	pH y concentraciones ponderadas por volumen (µeq/l) de iones presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo rurales de Cuba y otros países.	34
Cuadro 8	Concentraciones ponderadas por volumen (µg/l) de elementos presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo urbanas de Cuba y otros países.	37
Cuadro 9	Concentraciones ponderadas por volumen (µg/l) de elementos presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones rurales de Cuba y otros países.	37
Cuadro 10	Tasa de depositación húmeda para iones (meq/m ² /año) en estaciones rurales de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período noviembre 2008- octubre 2009 y otro sitio rural del mundo.	38
Cuadro 11	Tasa de depositación húmeda para iones (meq/m ² /año) en estaciones urbanas de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período noviembre 2008- octubre 2009 y otros sitios urbanos del mundo.	39
Cuadro 12	Tasa de depositación húmeda para iones (meq/m ² /año) en estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio.	39
Cuadro 13	Valores medios de los factores de neutralización para Ca ²⁺ , NH ₄ ⁺ y Mg ²⁺ en el agua de lluvia colectada en las estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio.	41
Cuadro 14	Valores medios del pH y la relación potencial neutralización/potencial acidificación (PN/PA) en el agua de lluvia colectada en las estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio.	42
Cuadro 15	Valores medios de la relación SO ₄ ²⁻ / NO ₃ ⁻ en las lluvias colectadas en las estaciones rurales de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio y otros países.	43
Cuadro 16	Factores de enriquecimiento para iones presentes en las aguas de lluvias colectadas en Cuba durante el período noviembre 2008 – abril 2010.	44
Cuadro 17	Factores de enriquecimiento para elementos presentes en las aguas de lluvias colectadas en Cuba durante el período noviembre 2008 –	44

	octubre 2009.	
Cuadro 18	Matriz de componentes principales en la estación La Palma.	46
Cuadro 19	Matriz de componentes principales en las estaciones Santiago de Las Vegas, Casablanca y Colón.	46
Cuadro 20	Matriz de componentes principales en las estaciones Nuevitas y Palo Seco.	47
Cuadro 21	Matriz de componentes principales en las estaciones Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Universidad de Santiago.	47
Cuadro. 22	Matriz de componentes principales en las estaciones Contramaestre y Guantánamo.	48
Cuadro 23	Tipo de situación sinóptica predominante en las regiones de Cuba durante el período Noviembre 2008-abril 2010.	49
Cuadro 24	Número y tipos de frentes fríos que afectaron a las regiones de Cuba durante los períodos poco lluviosos noviembre 2008 – abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010.	50

1 Introducción

Han transcurrido casi dos décadas desde la Cumbre de Río de Janeiro y aún la conservación y gestión de los recursos naturales continúa siendo un gran reto para alcanzar la sustentabilidad ambiental. Frente a este desafío creciente, es necesario brindar información científica a los responsables de políticas ambientales que les faciliten la toma de decisiones.

La agenda 21 propuso acciones para el manejo ambiental, incluyendo la calidad del aire. Diez años después de Río, la Cumbre Mundial en Desarrollo Sustentable (WSSD) reconoció el problema de la contaminación del aire en la sección IV 39 de su plan de implementación. Las causas que originan la contaminación de la atmósfera son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, comerciales, domésticas y agropecuarias desarrolladas por el hombre.

La depositación húmeda (lluvia, nieve, niebla, rocío) y seca son los únicos mecanismos que remueven en forma definitiva los gases y partículas de la atmósfera (Sanhueza *et al.* 2005b). Las precipitaciones juegan un papel preponderante en la remoción de los compuestos atmosféricos solubles, sobre todo en los países con clima húmedo (Özsoy y Örnektekin, 2009). De esta forma, las mediciones de las especies químicas en la lluvia, constituyen un valioso instrumento para la gestión de la calidad del aire, al brindar información científica que ayuda a los tomadores de decisión a desarrollar planes y acciones dirigidos a la eliminación o a la reducción de emisiones de contaminantes que producen su acidificación.

La acidificación de las lluvias es uno de los problemas ambientales que mayor atención ha recibido a nivel mundial, sobre todo en América del Norte y Europa (Menz y Seip, 2004). En estas regiones tuvo gran repercusión, porque no siempre caen sobre la localidad que las produce, sino en territorios vecinos, debido al movimiento de las masas de aire que transportan los contaminantes a larga distancia (Seinfeld y Pandis, 2006). En los últimos años, se ha extendido también a otras zonas del mundo, especialmente a Asia y a algunos países de la zona tropical (Tang *et al.*, 2005; Tiwari *et al.*, 2007). Por esta razón, puede convertirse en un problema para los trópicos, ya que las abundantes precipitaciones pueden conducir a elevadas tasas de depositación de acidificantes (Vogt *et al.*, 2007).

La lluvia ácida causa disminución del crecimiento de los árboles y aumenta su vulnerabilidad a los patógenos y plagas (San`t Anna-Santos *et al.*, 2006); además, los

protones, H⁺, provocan la lixiviación de nutrientes, la acidificación de los suelos y pueden alterar la ecología de los lagos. En los monumentos y edificaciones de piedra caliza o mármol provocan la disolución del CaCO₃ (Bravo *et al.*, 2006).

En Cuba durante el período de 1981-1994 se observó una tendencia al incremento en la frecuencia de lluvias ácidas a nivel general en el país (López *et al.*, 1997). En la actualidad, es probable que esta situación se haya acentuado, debido al incremento en uso de combustible crudo nativo con alto contenido de azufre (4-7%). Dado el comportamiento observado y la probable agudización de este problema en el país, la cuantificación de los rangos actuales de las especies químicas mayoritarias que componen el agua de lluvia, contribuirá a estimar el grado de contaminación del aire, identificar posibles fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos y en consecuencia, a elaborar medidas preventivas y/o correctivas para mejorar la calidad del aire.

2 Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis

Hipótesis General

La composición de los iones mayoritarios de las lluvias en las distintas áreas de Cuba está afectada por variables meteorológicas, geográficas y fuentes antropogénicas de emisión; su estudio contribuye al conocimiento de la calidad del aire local y en consecuencia a su gestión futura.

Hipótesis Específicas

- Las muestras analizadas en regiones urbanas presentarán un carácter ácido, donde las principales especies iónicas presentes serán SO_4^{-2} , Cl^- y NO_3^- .
- En regiones rurales cercanas a campos de producción agrícola las especies iónicas que contribuirán a la acidez de las precipitaciones serán SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- , HCOO^- y CH_3COO^- .
- Las concentraciones de SO_4^{-2} y NO_3^- en estaciones rurales alejadas de fuentes de origen antrópico durante el período diciembre-abril aumentarán debido a la influencia de las masas de aire procedentes del nordeste de los Estados Unidos.

2.2 Objetivos

Objetivo General

Analizar la influencia de los componentes físicos y químicos de la lluvia en Cuba que den cuenta del origen de los contaminantes que afectan la calidad del aire, con el objeto de mejorar su gestión.

Objetivos Específicos

- Evaluar la distribución espacial y temporal de las concentraciones de los iones mayoritarios en las lluvias en Cuba durante el período noviembre 2008 – abril 2010.
- Identificar el origen natural o antrópico de los iones estudiados y asociarlo a sus posibles fuentes.
- Determinar la relación entre las concentraciones de los iones analizados y los sistemas sinópticos que afectaron a Cuba durante el período noviembre 2008 – abril 2010.
- Proponer medidas de gestión para mejorar la calidad del aire en Cuba.

3 Marco Teórico

3.1 Composición química de las precipitaciones

La composición química de las precipitaciones se debe a procesos que ocurren en el interior y por debajo de las nubes, los cuales involucran numerosas fases físicas que operan a escala micro y macro. La acidez y la concentración de los iones en el agua de lluvia dependen del tipo y potencia de la fuente de sus constituyentes, de su incorporación física en el sistema hidrológico y de la transformación química durante la formación de las nubes y arrastre por debajo de las mismas (Kulshrestha *et al.* 1999; Seinfeld y Pandis, 2006).

La lluvia ácida es cualquier forma de precipitación: lluvia, nieve, granizo o niebla, cuyo valor de pH sea inferior a 5,6. La lluvia en una atmósfera libre de contaminantes tiene un pH de 5,6, debido a la presencia de dióxido de carbono atmosférico, que forma ácido carbónico. Por esta razón, durante muchos años este valor de pH se ha utilizado para distinguir las lluvias ácidas de las no ácidas (Galloway *et al.*, 1984; Loÿe-Pilot *et al.*, 1986; Seinfeld y Pandis, 2006).

Los valores de pH menores de 5 se alcanzan principalmente por la presencia de ácidos fuertes: ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), los cuales se producen por la reacción del dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno con el agua atmosférica. Los movimientos de las masas de aire transportan estos ácidos a menudo a largas distancias desde su origen, por lo cual el transporte puede tener un efecto transfronterizo (Seinfeld y Pandis, 2006). Odén (1967, citado por Menz y Seip, 2004) estableció que la acidificación de las aguas superficiales en Suecia se podía atribuir a las emisiones de estos contaminantes desde el Reino Unido y Europa central.

Según Okuda *et al.* (2005) los valores de pH inferiores a 5,0 son los que identifican, por lo general, un alejamiento de las condiciones naturales. En zonas bajo la influencia de fuentes de contaminación local, los iones SO_4^{2-} y NO_3^- son los contribuyentes principales a la acidez de la lluvia (Medha *et al.*, 2002). Se ha observado un incremento de emisiones de dióxido de azufre por el elevado uso de carbón y petróleo en la generación de electricidad y/o actividades industriales como la producción primaria de metales, así como un incremento de óxidos de nitrógeno por el aumento de vehículos automotores asociados a la frecuencia de lluvias ácidas, así como a las concentraciones de sulfato no marino y de nitrato (Okuda *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2005).

No obstante, en regiones remotas del planeta se han observado eventos de precipitación con valores de pH 4. Tales mediciones sugieren que los ácidos orgánicos (fórmico, acético, etc.) influyen en la acidez natural del agua de lluvia (Galloway *et al.*, 1984). Fornaro y Gutz (2003) y Sanhueza *et al.* (1996), señalan que en las regiones tropicales estas sustancias ácidas son de tanta importancia como las emisiones locales de óxidos de azufre y nitrógeno desde la industria y el transporte.

La fuente de estos ácidos carboxílicos no está bien establecida, aunque se asume su formación a partir de la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles biogénicos, quema de biomasa y combustible fósil (Sanhueza *et al.*, 2001, Peña *et al.*, 2002; Sanhueza *et al.*, 2003). Además, estos compuestos presentan poca reactividad en la atmósfera (no participan de forma significativa en reacciones de fase gaseosa), por lo que su principal vía de remoción son las depositaciones húmeda o seca (Fornaro y Gutz, 2003).

En la India, en la localidad de Santana, Tiwari *et al.* (2007) informaron un 29 % de lluvias ácidas atribuidas a la contribución de ácidos orgánicos débiles, que provienen de la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles biogénicos emitidos por la vegetación exuberante de la zona. Los ácidos fórmico y acético (HCOOH y CH₃COOH) contribuyen en igual cantidad que los ácidos minerales (H₂SO₄ y HNO₃) a la acidez de las precipitaciones en Louis Trichardt, una localidad rural en la sabana semiárida del sur de África (Mphepya *et al.*, 2004).

Por otra parte, el ácido clorhídrico (HCl) es otro contribuyente significativo a la acidez de la lluvia (Herrera y Rodríguez, 2009). Las emisiones antropogénicas provienen principalmente de la producción de cloro como gas y HCl (Zhu y Liu, 2003). Varios autores sugieren como fuente primaria de HCl los volcanes, la combustión de carbón y los desechos sólidos y como secundaria la dechlorinación de aerosoles marinos, oxidación in situ de los clorocarbonados de emisiones naturales o antropogénicas (Sanhueza *et al.*, 2001; Sanhueza *et al.* 2005b).

En regiones prístinas se sugiere como fuente de ácido sulfúrico (SO₄²⁻ no marino) la oxidación de compuestos de azufre reducido (H₂S) o de erupciones de volcanes, mientras que en el caso del HNO₃ la fuente puede ser la oxidación de los NO_x producidos por los suelos, la quema de biomasa y/o descargas eléctricas (Sanhueza *et al.* 2005a).

Para la evaluación de la acidez de la lluvia es necesaria la determinación analítica de los principales elementos químicos que la componen y no solo estudiar la componente acidificante, sino también los elementos responsables de la neutralización. En este

sentido, desempeña un papel primordial la cantidad de materia alcalina presente actuando como agente neutralizador, especialmente los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y NH_4^+ (Campos *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008; Sakihama *et al.*, 2008), aunque Schuurkes *et al.* (1988) señalan que el efecto neutralizante del amonio desaparece al depositarse con la lluvia y convertirse a NO_3^- por microorganismos del suelo.

Se pueden encontrar altas concentraciones de amonio (NH_4^+) en áreas donde la producción agrícola es intensa y existen grandes cantidades de animales en pastoreo. Sus fuentes probables son la volatilización de amoníaco (NH_3) desde las actividades de pastoreo intensivo o la aplicación de fertilizantes a los suelos (Schuurkes *et al.*, 1988). Otros autores señalan que el amoníaco es un contribuyente importante a la formación de lluvias ácidas, debido a que el NH_3 se disuelve para formar NH_4^+ , el cual puede incrementar la tasa de conversión de SO_2 a H_2SO_4 en la atmósfera, al favorecer la formación de sulfato de amonio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] (Sánchez *et al.*, 2009).

En ciudades cercanas al mar Zhang *et al.* (2007), señalan la presencia de aguas de lluvias con elevadas concentraciones de los compuestos Na^+ y Mg^{2+} provenientes de aerosoles marinos, que contribuyen a la neutralización de los sulfatos y los nitratos. A su vez, Campos *et al.* (2007) señalan que el más alto porcentaje de neutralización por el aerosol marino se alcanzó a mayor cercanía de la costa respecto de los sitios de muestreo utilizados en la bahía de Reconcavo, Brasil.

Varios autores asocian las fuentes de K^+ en las precipitaciones a la quema de biomasa y/o incineración de basuras (Tang *et al.*, 2005). A su vez, Rodríguez (1991) señala como origen posible de los minerales del suelo o el polvo resuspendido en la ciudad.

En las ciudades, el origen antropogénico de los iones Ca^{2+} proviene de emisiones del cemento durante la construcción de edificaciones y la pavimentación de vías (López *et al.*, 1997). Tang *et al.* (2005) relacionan las altas concentraciones de Ca^{2+} en las lluvias de Beijing a las partículas del suelo y/o a las cenizas volantes de carbón. A su vez, Huang *et al.* (2008) señalan que en la ciudad de Shanghai gran parte del Ca^{2+} proviene de fuentes antropogénicas y otra de los minerales del suelo; además, indican que el Mg^{2+} presente en las precipitaciones se origina también de los minerales.

En el oeste y medio oeste de los Estados Unidos de América las partículas del suelo tienden a ser básicas (por su alto contenido de carbonatos de calcio y magnesio) y pueden incrementar el pH de las lluvias. En la región este se forman aerosoles por interacción de los ácidos sulfúrico y nítrico gaseosos; además, las partículas del suelo son

usualmente ácidas, lo cual produce una disminución en el pH de la lluvia (Babich *et al.* 1980).

Las zonas con una correspondiente baja componente neutralizante y que reciben mayores emisiones antropogénicas de aniones ácidos reflejan las precipitaciones con menor valor de pH (Anatolaki y Tsitouridou, 2009).

La lluvia contiene también cantidades traza de muchas otras sustancias como Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Pb, V, etc. en el rango de los $\mu\text{g/l}$, los cuales se disuelven especialmente en condiciones de pH ácido. La presencia de estos elementos en la atmósfera se debe principalmente a actividades de refinamiento de metales, combustión de combustibles fósiles y transporte automotor exhaustivo (Hou *et al.*, 2005).

En sentido general, las variaciones en la contribución relativa a la lluvia ácida de los diferentes compuestos están dadas por las diferencias existentes en la distribución espacial de las emisiones desde fuentes naturales y antropogénicas y su propagación a cortas, medias y largas distancias (López *et al.*, 1997; André *et al.*, 2007; Tiwari *et al.*, 2007).

3.2 Relación entre factores meteorológicos y composición química de la lluvia

Los procesos de transporte de contaminantes a escala sinóptica y las condiciones meteorológicas como: precipitación, temperatura, humedad y viento influyen en la composición química de las lluvias (Tang *et al.*, 2005; Baéz *et al.*, 2006).

En las precipitaciones más copiosas las gotas tienden a ser más grandes que en las lluvias menos abundantes, las cuales tienen más tiempo de residencia en la atmósfera y por lo tanto podrían incorporar más especies químicas de aerosoles y gases (Lee *et al.*, 2000; Seinfeld y Pandis., 2006), mientras que una gran cantidad de lluvia podría diluir la concentración de los iones (Tang *et al.*, 2005).

El aumento de la temperatura incrementa las reacciones en las fases gaseosa y acuosa, con lo cual más contaminantes en estado gaseoso pasan a iones, potenciando las concentraciones en las precipitaciones (Buda y DeWalle, 2002). Según, Dayan y Lamb (2003) las temperaturas del verano en Pensilvania contribuyen a la formación de las especies químicas oxidantes, como peróxido de hidrógeno y ozono en la baja tropósfera, las cuales favorecen la conversión del dióxido de azufre a ácido sulfúrico en fase acuosa, aumentando la depositación ácida en el territorio.

Por otra parte, la humedad beneficia la sedimentación de humos y polvo, mientras que la rapidez del viento resulta un eficiente indicador de las condiciones generales de dispersión de los gases y partículas emitidos por fuentes de origen natural o antrópico (Tang *et al.*, 2005). Así es como se puede producir el arrastre de contaminantes desde regiones remotas (Reyes-Rodríguez *et al.* 2009; Sakihama *et al.*, 2008).

Según, Cerón *et al.* (2002) las altas concentraciones de nitratos en la Península de Yucatán, similares a ciudades con gran urbanización e industrialización, está asociado a la dirección del viento proveniente desde el interior de la península hacia Puerto Morelos, mientras se producían fuegos forestales tierra adentro durante la estación seca.

Las características de la fuente de emisión y las trayectorias recorridas o transporte de las masas de aire afectan la concentración de las especies químicas de las lluvias en una región específica (Dayan y Lamb, 2003). Los estudios de trayectorias inversas de las masas de aire en Norteamérica demostraron que en gran medida la precipitación ácida en Ontario Central se debía a su paso sobre las termoeléctricas de los estados del oeste medio de Estados Unidos, en especial Ohio e Indiana, los que emiten cantidades importantes de dióxido de azufre (Kurtz y Scheider, 1981; Zang y Hopke, 1989; Menz y Seip, 2004; Chesnutz y Mills, 2005).

Los sistemas sinópticos que han ocasionado en gran medida incrementos de contaminantes en la depositación húmeda en Pensilvania fueron los frentes fríos y los frentes cálidos (Buda y DeWalle, 2002). Dayan y Lamb (2003) determinaron además, que los sistemas sinópticos que más influyen en la composición química de las precipitaciones de verano son los sistemas de tipo convectivo con altas presiones al sur, *de sus siglas en inglés "HSC"* y los frentes fríos, en los cuales se cuantificaron las mayores concentraciones de los analitos mayoritarios estudiados: iones hidrógeno, sulfato, nitrato y amonio. Estos sistemas producen tormentas convectivas que limpian de forma eficiente los contaminantes en el nivel inferior de la tropósfera.

En Puerto Rico durante el verano el polvo del Sahara contribuye con una porción significativa de iones calcio, potasio y magnesio y durante los meses de invierno los frentes fríos transportan sulfatos y nitratos desde Norteamérica (McDowell *et al.*, 1990; Reyes-Rodríguez *et al.* 2009).

En Cuba el tipo de situación sinóptica denominado Frente o Zona Frontal Frío según la clasificación de Lapinel (1988), produce lluvias asociadas a nubes que en su trayectoria han recorrido gran parte del noreste de los Estados Unidos. Este tipo de sistema sinóptico afecta a Cuba durante el período poco lluvioso (noviembre-abril), el que coincide con los

meses de temperaturas más bajas para el hemisferio Norte. Mientras, que durante el período lluvioso (mayo-octubre) las situaciones sinópticas que afectan son generalmente, hondonadas y ciclones tropicales, las cuales atraviesan gran parte de América Central y/o el Mar Caribe antes de llegar al país. Rodríguez (1991) observó que la acidez de las lluvias asociadas a los frentes fríos se acentuó en estaciones de la región Occidental.

De esta forma, los tipos de situaciones sinópticas según su origen y lugar de desplazamiento pueden estimular el aumento o disminución de las especies químicas en las precipitaciones (Rodríguez, 1991). Ellas constituyen un proceso de limpieza eficiente a través del cual los contaminantes son removidos de la atmósfera y transferidos al: suelo, agua y construcciones (Fornaro y Gutz, 2003; Abdul Hameed *et al.*, 2006).

3.3 Efectos ambientales de las lluvias ácidas

Las precipitaciones en conjunción con las otras formas de depositación húmeda (rocío, niebla y nieve) y seca pueden provocar la acidificación de aguas, la que a su vez puede inducir efectos nocivos en la biota acuática, así como daños directos a la vegetación y los materiales de construcción expuestos a la intemperie (Seinfeld y Pandis, 2006).

Los lagos son acidificados cuando pierden alcalinidad según Roth *et al.* (1985, citado por Seinfeld y Pandis, 2006). La alcalinidad total o la capacidad de neutralizar la acidificación está determinada de forma mayoritaria por la concentración de los iones bicarbonato y carbonato. Según Seinfeld y Pandis (2006) los lagos con alcalinidad inferior a 200 $\mu\text{equiv/l}$ son los más sensibles a las precipitaciones ácidas

La acidificación de las aguas superficiales está muy vinculada a la de los suelos por el simple hecho de que el 90% del agua ha pasado previamente por el suelo, mientras que solo el 10% ha caído directamente allí en forma de precipitaciones (Menz y Seip, 2004; López, 2006). Así, los lagos rodeados por suelos ricos en piedra caliza pueden reducir la acidez, por la acción neutralizante de compuestos de magnesio y calcio (Seinfeld y Pandis, 2006).

Mientras que entre los lagos más susceptibles a la acidificación se encuentran aquéllos cuyas orillas están cubiertas por lechos de rocas de granito, los cuales presentan pobre capacidad amortiguadora natural (Seinfeld y Pandis, 2006). En Piracicaba, Brasil, los suelos están compuestos por gibbsita y kaolinita con contenido de cationes y valores de pH bajo, por lo cual son propensos a la acidificación, al igual que los acuíferos

ubicados en esta misma localidad, si continúan las elevadas emisiones de compuestos ácidos en esta región (Krusche *et al.*, 2003).

Al disminuir el pH de los lagos se incrementa la concentración de metales tóxicos como aluminio, plomo, mercurio, cadmio, lo cual provoca la merma de la población de peces, crustáceos, moluscos, algas y la desaparición del fitoplancton, el que ocasiona, con el tiempo, la imposibilidad de sobrevivencia para el resto de la fauna por falta de alimento y vuelve a los lagos transparentes (Seinfeld y Pandis, 2006).

La depositación ácida en los vegetales afecta el crecimiento, el metabolismo, la productividad y la actividad fotosintética. En las hojas de las plantas se producen lesiones cloróticas y necróticas (González y Bergowist, 1986). San` Anna-Santos *et al.* (2006) demostraron que las soluciones ácidas depositadas en las hojas de *Spondias dulcis*, *Mimosa artemisiana* y *Gallesia integrifolia* afectan las células epidérmicas, causando erosión en la cutícula, alteración en la permeabilidad de la hoja y aumentando la sensibilidad de las especies vegetales a contraer enfermedades causadas por organismos patógenos. Otros autores señalan que los efectos de lixiviación de cationes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) en los suelos provoca un desbalance de nutrientes en las plantas lo que disminuye su capacidad de responder a condiciones de estrés biótico o abiótico (Likens *et al.*, 1996).

A su vez, Dai *et al.*(1998) informaron daños en bosques localizados alrededor de ciudades del sur de China relacionados directamente con los efectos locales de elevadas emisiones de dióxido de azufre y eventos de lluvia extremadamente ácidos. En TieShanPing cerca de la ciudad de ChongQing y en ChongGuan próximo a la ciudad de GuiYang, zonas ubicadas en la región con problemas de depositación ácida en China se ha observado un incremento del 40% en la defoliación de los pinos Masson (*Pinus massoniana*) (Wang *et al.*, 2007). Esto conlleva a que la disminución de los bosques se incremente y se reduzca la capacidad de absorción de CO_2 . De esta forma, la lluvia ácida contribuye indirectamente al cambio climático global (López, 2006).

En el norte de Europa, este de los EE.UU. y sur de China se ha producido la acidificación de los suelos (Dai *et al.*, 1998; Hruška *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007). No obstante, la contribución a la acidificación por la depositación sobre los suelos es difícil de determinar por el gran número de factores que la pueden afectar, incluyendo cambios en la vegetación (Menz y Seip, 2004). En la actualidad un gran número de autores han desarrollado modelos para predecir los posibles cambios en los suelos y aguas expuestos a la depositación ácida (Navrátil *et al.*, 2007; Reins *et al.*, 2009).

Otro de los efectos de las precipitaciones ácidas son los daños causados a muchos monumentos y construcciones de mármol y piedra caliza que constituyen patrimonio de la humanidad (Camuffo, 1992), los cuales deben ser reparados de forma continúa, como por ejemplo: el fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz, México que pierde al año 1,05 mg de $\text{CaCO}_3/\text{cm}^2$, equivalente a 4,15 micrómetros de la superficie (Bravo *et al.*, 2006). La piedra caliza es muy susceptible a la depositación ácida húmeda debido a la disolución del CaCO_3 por los iones H^+ en solución acuosa (Bravo *et al.*, 2000; Bravo *et al.*, 2006). Por otra parte, los materiales metálicos se corroen a mucha mayor velocidad cuando están cubiertos por una capa húmeda y presencia de estimuladores de la corrosión como los iones de H^+ y SO_4^{2-} (Kucera y Fitz, 1995).

Así, los iones que son removidos de la atmósfera por depositación húmeda afectan al ecosistema donde son depositados: suelos, cuerpos de agua, construcciones en general, seres vivos, etc, por lo cual, es necesario mantener un monitoreo de lo que se deposita para eliminar o minimizar las emisiones de contaminantes a la atmósfera (Sánchez *et al.*, 2009).

3.4 Gestión de la calidad del aire en Cuba

Los procesos de la contaminación del aire influyen sobre lo local, regional y global y viceversa. Por esta razón, las tareas de gestión se deben asumir con un enfoque multiescalar. Estas actividades han alcanzado mayor desarrollo en la escala local, especialmente en los centros urbanos y focalizados hacia la protección y bienestar de los seres humanos. Por ello, se requiere contar con criterios de calidad del aire y normas para la emisión de contaminantes, así como con el desarrollo de estrategias para su implementación y control (Schwela, 2002).

Las estrategias que se han utilizado dependen de las condiciones específicas de las ciudades y países donde se han aplicado (Schwela, 2002; CEPAL, 2007). Estas deben estar dirigidas básicamente hacia la eliminación o reducción de emisiones de contaminantes, única forma de disminuir la contaminación atmosférica. Por tal motivo, se debe contar con inventarios de emisiones de contaminantes de fuentes fijas y móviles; así como con tecnologías que propicien su abatimiento, en conjunto con la implementación de políticas de regulación directa, de incentivo económico, de gasto directo del Estado y persuasión para reducir la contaminación. Otros elementos necesarios son los pronósticos meteorológicos, el monitoreo y la modelación de la calidad del aire (Sandoval *et al.*, 1993).

En Cuba la contaminación del aire tiene sus causas en deficiencias en la planificación de los asentamientos humanos e industrias, utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y transporte automotor (Díaz *et al.*, 2007). Por otra parte, en décadas pasadas y siguiendo una tendencia mundial, se utilizó la construcción de chimeneas altas en termoeléctricas e industrias con el objetivo de dispersar las emisiones y resolver los problemas locales alejando la contaminación de las áreas urbanas. Esto no eliminó la contaminación, sino que simplemente la redistribuyó por todo el país, así como tampoco eliminó los problemas locales por la ubicación incorrecta de las fuentes con respecto al medio urbano (López, 2006).

Las primeras actividades de vigilancia de la calidad del aire estuvieron dirigidas por el Ministerio de Salud Pública, el cual instaló varias estaciones de muestreo en Ciudad de la Habana y otras provincias del país a partir de 1970. Desde el año 1976 el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera del Instituto de Meteorología (CECONT) estableció el monitoreo de la contaminación del aire a nivel nacional, con un programa inicialmente ajustado a las indicaciones de la Red de Control de la Contaminación General Atmosférica (BAPMON) y continuado después por el Sistema de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (López, 2006).

Este programa ha estado centrado en el análisis químico de las precipitaciones, los aerosoles y algunos gases contaminantes (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno). Todos los sitios de muestreo estaban ubicados en estaciones meteorológicas por lo que adicionalmente se disponía de esta información.

Esta red operó completa hasta los primeros años de la década de los 90 cuando debido a las dificultades económicas que experimentó el país, redujo su programa tanto en el número de estaciones como en la cantidad de contaminantes a monitorear y su frecuencia. A partir del año 1994 se ha mantenido funcionando en una variante reducida (López, 2006).

En la legislación ambiental de Cuba se ha avanzado en la temática de atmósfera con la promulgación de la norma NC 39.1999 en el año 1987 (antes NC 93-02-202:87), que estableció las concentraciones máximas admisibles (Cma) de sustancias nocivas del aire para zonas habitables; así como los radios mínimos de las zonas de protección en torno a las empresas industriales y otras fuentes de contaminantes y las alturas mínimas de chimeneas. En el cuadro 1 se comparan los valores para los compuestos NO₂ y SO₂ de la norma cubana y los recomendados en la guía de calidad de aire de la OMS (WHO; 2005).

Cuadro 1. Guía de calidad del aire de la Organización Mundial de Salud y Norma de concentraciones máximas admisibles en Cuba para los compuestos NO₂ y SO₂.

Compuesto	OMS		Cuba	
	Guía (µg/m ³)N	Tiempo de Promediación	Norma (µg/m ³)N	Tiempo de Promediación
NO ₂	200	1 h	85	20 min
	-	-	40	24 h
	40	Anual	-	-
SO ₂	500	10 min	500	20 min
	20	24 h	50	24 h

Fuente: WHO, 2005 y NC 39.1999

Posteriormente se estableció la NC 111.2004 que tiene como finalidad establecer reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. Esta norma establece un índice de calidad ambiental (ICA), el cual incluye una escala de seis categorías: buena, aceptable, deficiente, mala, pésima y crítica (Anexo1). Este índice se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones reales de cada uno de los contaminantes principales (NO₂, SO₂, CO, O₃, PST y PM₁₀) tomando como denominador las Cma correspondientes al período de tiempo evaluado según la NC 39: 1999. Cuando se evalúan varios contaminantes principales en el mismo lugar y período de tiempo, la evaluación general del ICA corresponde al mayor de los subíndices determinados para cada contaminante.

En el año 1986 se fijaron regulaciones para las emisiones de sustancias nocivas por automóviles, tractores y máquinas autopropulsadas agrícolas y de la construcción (NC 93-02-214. 1986). A su vez, se reguló los límites de opacidad del humo (NC 93-02-215:1986). Además, en la NC 242.2004 se estableció una guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos desde fuentes industriales estacionarias y la NC 55.2009 dictaminó las emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor.

Durante el período comprendido 1998-2005 el índice de calidad ambiental sobrepasó las concentraciones máximas admisibles fundamentalmente en dióxido de

azufre y partículas totales en suspensión, en determinadas horas del día y en condiciones meteorológicas desfavorables en zonas industriales donde las instalaciones aún cuentan con tecnologías obsoletas. Aunque, no se detectaron niveles alarmantes calificados como de emergencia, los resultados registrados por las estaciones de monitoreo señalaron como las ciudades más afectadas a La Habana, Matanzas, Moa, Nuevitas y Mariel. Además, en algunas instalaciones industriales (termoeléctricas, refinería de petróleo, industria siderúrgica) se excedieron los máximos permisibles de opacidad (Díaz *et al.*, 2007).

Por otra parte, se realizó un inventario de emisiones nacionales para los años 1990 - 2004 (Anexo 2), donde la producción de energía fue el sector más trascendente en cuanto a emisiones de dióxido de azufre (López *et al.*, 2009).

La política energética de Cuba ha sido incrementar la utilización de energías renovables, como la eólica y la solar en aquellos lugares donde es difícil llevar la energía eléctrica convencional y al mismo tiempo sea factible debido a sus potencialidades de explotación. Asimismo, y de forma simultánea, se ha utilizado el crudo nacional (con contenido de azufre del 5-7 %) para la generación de energía eléctrica y producción de cemento, ya que es una fuente de abastecimiento segura ante cualquier contingencia o problema de mercado, considerando tanto los altos precios actuales del petróleo, como las dificultades que tiene Cuba para acceder a muchos mercados y fuentes de financiamiento externas (López, 2006).

El incremento en las emisiones de gases asociados a los procesos de combustión hace suponer que la contaminación del agua de lluvia, debido a estas sustancias está creciendo a escala regional de forma muy similar al patrón de crecimiento global (López *et al.*, 2009).

Así, la determinación de los compuestos químicos del agua de lluvia constituye un instrumento de gestión de la calidad del aire valioso, porque provee información científica para un mayor entendimiento de los tipos de fuente que contribuyen a la química de las precipitaciones y permiten comprender los patrones de dispersión de los contaminantes atmosféricos a nivel local y global, y los impactos potenciales de los procesos de depositación sobre los ecosistemas.

4. Materiales y Métodos

4.1 Sitios de muestreo

El estudio se desarrolló en la República de Cuba, archipiélago constituido por la isla de Cuba y 4100 islotes, situados en el Mar Caribe, entre los 19,8° N a 23,4° N y entre los 74° O a 84,3° O. Se localiza a 140 km de las Bahamas, 180 km de la Florida, 210 km de México y 146 km de Jamaica (Figura 1a). Los principales sistemas montañosos son las cordilleras de Guaniguanico, el Grupo Guamuhaya, la Sierra Maestra y el grupo Sagua-Moa-Baracoa que representan un 21 % del territorio, mientras que las llanuras abarcan un 79 %, de ellas 4% corresponden a humedales.

Las estaciones de monitoreo utilizadas se muestran en la figura 1b y sus características fundamentales se indican en el cuadro 2. El detalle se describe a continuación.

Cuadro 2. Ubicación geográfica de las estaciones.

Estación	Provincia	Tipo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Período muestreo
Palma	Pinar del Río	Rural (bosques y campos agrícolas)	22°.45.59	83°.33.41	47,39	Noviembre 2008-Abril 2010
Santiago de las Vegas	Ciudad Habana	Suburbana(cercana a aeropuerto - Sector industrial)	22°.58.40	82°.23.18	77,50	Enero 2009-Abril 2010
Casablanca	Ciudad Habana	Urbana-Industrial	23°.08.35	82°.20.30	50,80	Enero 2009-Abril 2010
Colón	Matanzas	Rural (campos agrícolas - ganadería)	22°.41.04	80°.55.30	35,00	Enero 2009-Abril 2010
Nuevita	Camagüey	Urbana-Industrial	21°.33.36	77 °.14.52	19,0	Enero 2009-Abril 2010
Palo Seco	Camagüey	Rural (campos agrícolas)	21°.08.45	77°.19.16	95,55	Noviembre 2008-Abril 2010
Contramaestre	Santiago de Cuba	Rural (cercana a autopista)	20°.17.42	76°.15.59	100,00	Noviembre 2008- Octubre 2009
Pinares de Mayarí	Holguín	Rural (campos agrícolas)	20°.29.14	75°.47.26	646,04	Noviembre 2008- Octubre 2009
Universidad de Oriente	Santiago de Cuba	Urbana	20°.02.40	75°.49.01	38,00	Noviembre 2008- Octubre 2009
Gran Piedra	Santiago de Cuba	Rural (campos agrícolas)	20°.00.45	75°.38.06	1130,00	Noviembre 2008- Octubre 2009
Guantánamo	Guantánamo	Rural(campos agrícolas)	20°.08.04	75°.14.02	55,06	Noviembre2008- Septiembre2009

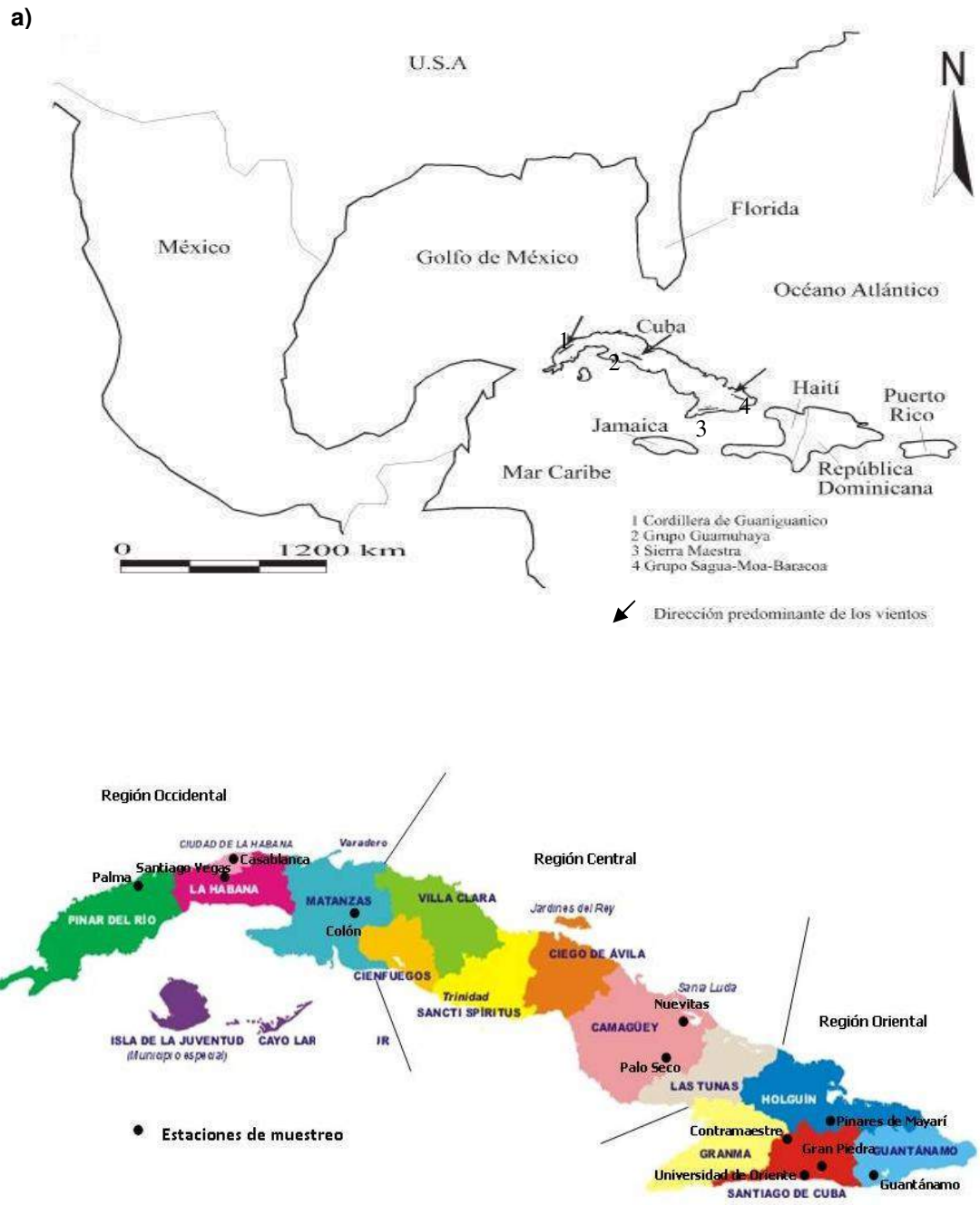


Figura 1. a) Ubicación geográfica de la isla de Cuba y los principales sistemas montañosos.
b) Localización de las estaciones de monitoreo durante el período noviembre 2008 – abril 2010.

Estación Palma: Ubicada a 6 km de la costa norte. Es una zona con amplios pinares sobre el sector este y sur. En el sector norte y oeste se planta caña de azúcar y otros cultivos menores. A 3 km al este, se localiza el pueblo La Palma. La zona cuenta con una sola fuente fija de emisión -central azucarera Sanguily- al NE de la estación.

Estación Santiago de las Vegas: En los terrenos de un instituto de investigaciones agrícolas localizado en la periferia de la capital a 16 km de la costa norte. Se encuentra próxima a una autopista, al aeropuerto internacional José Martí y al sector industrial de Boyeros.

Estación Casablanca: Ubicada a 1,5 km de la costa norte de la bahía de La Habana, capital de Cuba con alrededor de dos millones de habitantes. Se ubica en las inmediaciones de una zona industrial (termoeléctrica, refinería, astillero) y cercana al puerto de la Habana. Hacia el sector oeste y sur están los municipios de mayor densidad y concentración poblacional. En esta zona los suelos son húmicos carbonatados arcillosos.

Estación Colón: Ubicada a 42 km de la costa norte, en los terrenos de una lechería. Está rodeada por plantaciones de caña de azúcar, pasto y cultivos menores. En las proximidades se localiza un basurero.

Estación Nuevitas: Ubicada a 2 km de la costa norte. En una ciudad portuaria-industrial, donde al noreste se encuentran una fábrica de cemento, un complejo químico, una central termoeléctrica, una empresa de fertilizantes nitrogenados, una fábrica de pinturas, de alambre de púas-electrodos y una salinera.

Estación Palo Seco: Ubicada a 45 km de la costa norte. En la parte central del peniplano de Florida-Camagüey-Tunas. En el noreste a 1,2 km está la autopista. Los suelos son pardos grisáceos y sobre ellos se desarrolla una vegetación de sabana. Son utilizados en el cultivo de la caña y pastos.

Estación Contramaestre: En la superficie de los suelos predominan las rocas carbonatadas. Se encuentra rodeada de plantaciones caña de azúcar y de cultivos menores. Al este se localiza el hospital Orlando Pantoja Tamayo.

Estación Pinares de Mayarí: Ubicada a 25 km de la costa norte, en la zona montañosa Sierra de Nipe. La estación está rodeada por una vegetación de pinares. Es una zona poco poblada.

Estación Universidad de Oriente: Ubicada a 8 km de la costa sur, Se encuentra en la azotea del edificio de la Universidad de Oriente en el centro de la ciudad. A menos

de 5 km se encuentra el hospital provincial Saturnino Lora y una fábrica de helados. En la localidad se ubica una termoeléctrica.

Estación Gran Piedra: Ubicada a 11 km de la costa sur, a 17 km del centro de la ciudad de Santiago en dirección oeste. Al norte se encuentra el municipio de Songo – La Maya en su gran parte atravesado por el Valle Central. La vegetación autóctona es abundante; pero también se encuentran plantaciones de café, caña y cultivo de plantas ornamentales.

Estación Guantánamo: Ubicada aproximadamente 12,5 km de la costa sur, en una zona de cultivos menores y caña de azúcar. En la superficie de los suelos predominan las rocas carbonatadas, formadas en cuencas marinas.

Por otra parte, al nor-noroeste de las estaciones de la región Oriental (Pinares de Mayarí, Contramaestre, Universidad de Oriente, Gran piedra y Guantánamo) se encuentran localizadas zonas industriales, dedicadas a la producción de níquel y una termoeléctrica que contribuye con las mayores emisiones de NO_x y SO_2 al inventario nacional de emisiones realizado por López *et al.*, 2009.

4.2 Colección de muestras de lluvia

Las muestras de agua de lluvia fueron colectadas en la red de estaciones de monitoreo de la contaminación atmosférica, operada por el Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología (INSMET).

La metodología de muestreo empleada fue la recomendada por el sistema 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, 1988; Migliavacca *et al.*, 2005; Herrera y Rodríguez, 2009). El colector se expuso solamente durante la lluvia siendo retirado rápidamente al finalizar ésta, con el objetivo de eliminar los aportes a las muestras de compuestos provenientes de la depositación seca de aerosoles y gases (Figura 2). Antes de cada evento de lluvia, el colector se limpió con agua desionizada.

Para evitar el deterioro de las muestras, después de cada evento de lluvia, estas fueron transferidas a una botella de polietileno y guardadas en lugar oscuro y refrigerado a 4 °C. El primer día de cada mes una porción bien mezclada de la lluvia colectada se transfirió a una botella limpia de polietileno. Aunque se muestreó cada evento individual de lluvia, sus aportes fueron combinados en una sola muestra mensual con el objetivo de

obtener una composición "promedio". Las muestras mensuales de todas las estaciones del período noviembre 2008 – diciembre 2009, se les realizó los análisis químicos a partir de esta fecha en los subsiguientes tres meses y las muestras comprendidas entre los meses de enero 2010 y abril 2010, fueron analizadas en septiembre del 2010. Por lo cual, la cuantificación principalmente de las especies volátiles CH_3COO^- , HCOO^- y NH_4^+ probablemente fue subestimada (Keith *et al.*, 2005).

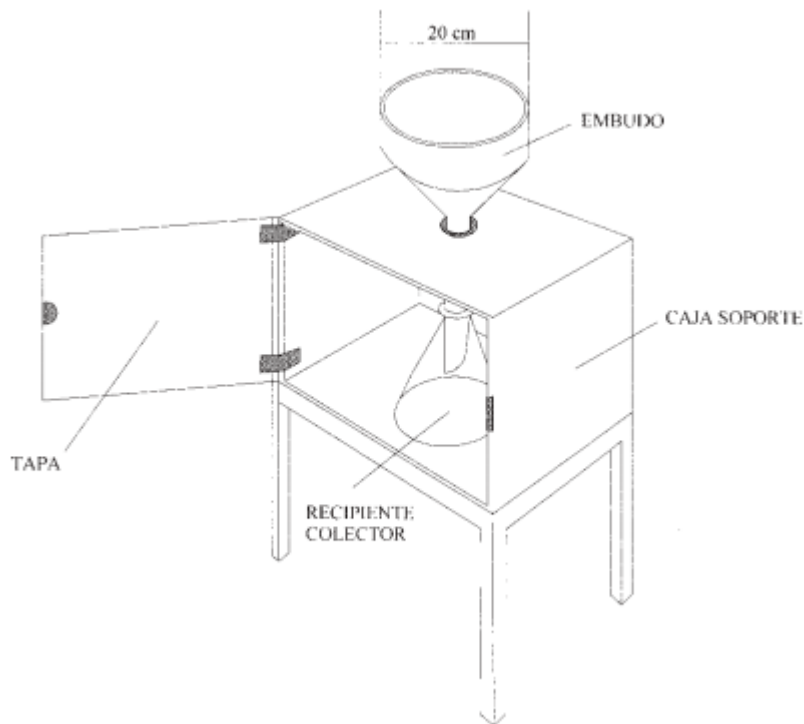


Figura 2. Diagrama del colector de agua de lluvia.

4.3 Condiciones climáticas y datos meteorológicos

El clima de Cuba es tropical húmedo según la clasificación de Köppen. La temperatura promedio anual fluctúa alrededor de los 24-26°C. La humedad relativa media es alta con 75-85 %. Las precipitaciones medias oscilan cerca de los 1.375-1.450 mm, aunque en las zonas costeras y montañosas del país pueden tomar valores entre los 1.100 y los 2.000mm. En la Isla las cuatro estaciones naturales se funden en dos. Una temporada lluviosa que se extiende entre mayo y octubre donde cae un 70-80 % del total

de las lluvias anuales y la otra, de poca lluvia, que se prolonga desde noviembre hasta abril donde cae un 20-30 % del total de las lluvias anuales (Lapinel, 1988).

La isla se sitúa en la frontera entre las zonas de circulación tropical y extratropical, recibiendo la influencia de ambas con carácter estacional. En la temporada noviembre a abril, las variaciones del tiempo y el clima se hacen más notables, con cambios bruscos en el tiempo diario, asociados al paso de sistemas frontales, a la influencia anticiclónica de origen continental y de centros de bajas presiones extratropicales. De mayo a octubre, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo, con la influencia más o menos marcada del Anticiclón del Atlántico Norte. Los cambios más importantes se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación tropical (ondas del este y ciclones tropicales).

En Cuba imperan los vientos de componente este. De noviembre a abril predominan direcciones del primer cuadrante, debido a la influencia de los sistemas meteorológicos de la temporada invernal; mientras que en el verano los vientos giran más al sudeste, sobre todo con el retraimiento de la cuña anticiclónica. Las velocidades máximas del viento ocurren al paso de los frentes fríos, ciclones extratropicales, tormentas locales, huracanes, entre otros fenómenos (Rodríguez, 1991).

Los datos mensuales de las variables: cantidad de lluvia, dirección y rapidez del viento, humedad relativa y temperatura se obtuvieron del Departamento de Climatología del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), consultando los registros digitales de las estaciones estudiadas.

Los tipos de situaciones sinópticas según la clasificación utilizada por Lapinel (1988) se realizó en conjunto por especialistas del Centro del Clima, del Centro de Física de la Atmósfera y del Centro de Química y Contaminación del INSMET de forma diaria para las tres regiones en que se divide Cuba: Occidental, Central y Oriental.

4.4 Procedimientos analíticos

El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de Química de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile, en los Laboratorios ALEPH, de Del Carpio Análisis y Asesorías Ltda. y en los laboratorios del Centro Nacional de Medio Ambiente, CENMA.

La conductividad se determinó con el conductímetro LF 539 WTD y el pH con el medidor Oakton serie 1100.

La cuantificación de las especies químicas NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , CH_3COO^- , CHOO^- y CH_3SO_3^- se realizó en un cromatógrafo de intercambio iónico ICS-3000, para lo cual las muestras fueron previamente filtradas a través de membranas Millipore de 0,45 μm . El cuadro 3 muestra las condiciones experimentales utilizadas en el procedimiento analítico de cromatografía iónica. La calidad de los datos se determinó mediante el balance iónico según lo establecido por la WMO (2004).

Para calcular el límite de detección correspondiente a cada analito cuantificado se midió 7 veces consecutivas el estándar más bajo utilizado en la curva de calibración (0,1 mg/l), definiéndose el límite de detección (L.D.) como 3 veces la desviación estándar de las mediciones efectuadas y el límite de cuantificación (L.C.) como 10 veces la desviación estándar. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 4 y son comparables a los recomendados por la WMO (2004).

Cuadro 3. Parámetros utilizados en el procedimiento de cromatografía iónica para Dionex ICS-3000.

	Análisis de NH_4^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}	Análisis de F^-, NO_2^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, CH_3SO_3^-	Análisis de CH_3COO^- y CHOO^-
Detector	Electroquímico Dionex ED50	Electroquímico Dionex ED50	Electroquímico Dionex ED50
Precolumna	CG12 4mm X 50 mm	AG14 2mm X 50 mm	AG11 4mm X 50 mm
Columna	CS12 4mm X 250 mm	AS14 2mm X 250 mm	AS11 4mm X 50 mm
Supresor	CSRS 300-4 mm	ASRS 300-2 mm	ASRS Ultra II-2 mm
Velocidad de flujo	1,2 ml/min, 20 mM MSA	0,35 ml/min de 3,5 mM, Na_2CO_3 /1,0 mM Na_2HCO_3	1 ml/min, 1 mM NaOH
Temperatura de inyección	Ambiente	Ambiente	Ambiente
Volumen de inyección	10 μl	10 μl	25 μl

Cuadro 4. Límites de detección y de cuantificación para los análisis por cromatografía de intercambio iónico.

	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_2^-	NO_3^-	CH_3COO^-	CHOO^-	CH_3SO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
LD (mg/l)	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03
LC (mg/l)	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,06	0,03	0,03	0,09	0,09	0,03	0,06	0,09

La cuantificación de otros elementos químicos se realizó por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) modelo Óptima 3-300 XL marca Perkin Elmer, para lo cual a las muestras se les adicionó primeramente HNO_3 concentrado hasta obtener un $\text{pH} < 2$. Los límites de detección y cuantificación se

calcularon de manera similar a los análisis por cromatografía de intercambio iónico y los resultados se muestran en cuadro 5.

Cuadro 5. Límites de detección y de cuantificación para los análisis por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

	Cd	Zn	Cr	As	Cu	Ni	Pb	Al	Se
LD (µg/l)	1,08	3,69	0,96	6,36	1,72	2,64	3,93	8,04	4,92
LC (µg/l)	3,60	12,30	3,20	21,18	5,73	8,80	13,10	26,80	16,39
	Mn	Ag	V	Ba	Co	Mo	Be	B	Fe
LD (µg/l)	0,93	1,91	1,49	2,86	1,28	2,12	0,86	5,11	4,20
LC (µg/l)	3,10	6,37	4,97	9,53	4,27	7,07	2,87	17,03	14,00

4.5 Tratamiento de los resultados de los análisis químicos

Las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) para el período lluvioso, poco lluvioso y total de cada estación expresadas para los iones en µeq/l y para otros elementos en µg/l se calcularon de acuerdo con la ecuación (Sanhueza et al. 2005b).

$$CPPV = \frac{\sum (C_n \times P_n)}{\sum P_{\text{período}}}$$

donde: C_n = concentración del analito obtenida en la muestra (µeq/l o µg/l).

P_n = los mm de precipitación total colectada para la muestra.

$P_{\text{período}}$ = la sumatoria de los mm correspondientes al período de muestreo.

Se calculó la tasa de depositación húmeda (TDH) que representa el flujo iónico de masa hacia el ecosistema utilizando la siguiente ecuación (Mpehpya et al., 2004):

$$TDH = C_n \times P_n$$

donde: C_n = concentración del analito obtenida en la muestra (meq/l ó mg/l).

P_n = los mm de lluvia caída en el mes o período (mm).

Las unidades de TDH son expresadas en meq/ m² x año ó mg/m² x año.

Se determinó el pH promedio ponderado para cada período a partir del valor promedio de la concentración de hidrógeno, aplicando la expresión:

$$[H^+] = \frac{\sum P_i [H^+]}{\sum P_i}$$

donde P_i es la precipitación en el mes i .

El pH final de la muestra es influido por la cantidad de lluvia o volumen de dilución.

Se calcularon los factores de neutralización para NH_4^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} según la ecuación propuesta por Kulshrestha *et al.*, (1995).

$$\text{FN}_{\text{NH}_4^+} = \text{NH}_4^+ / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{FN}_{\text{Mg}^{2+}} = \text{Mg}^{2+} / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{FN}_{\text{Ca}^{2+}} = \text{Ca}^{2+} / (\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

4.6 Identificación del origen de los iones y asociación a sus posibles fuentes

La estimación de la contribución marina a las concentraciones de los iones presentes en las muestras se calculó a partir de la ecuación (Keene *et al.*, 1986):

$$[\text{X}]_{\text{mar}} = [\text{Na}^+]_{\text{llovía}} ([\text{X}] / [\text{Na}^+]_{\text{mar}})$$

donde: $[\text{X}]_{\text{mar}}$ = a la contribución del mar para el elemento X en $\mu\text{eq/l}$

$[\text{Na}^+]_{\text{llovía}}$ = concentración del Na^+ en la lluvia ($\mu\text{eq/l}$)

$[\text{X}] / [\text{Na}^+]_{\text{mar}}$ = concentración de la relación de estos iones en el agua de mar ($\mu\text{eq/l}$)

Las concentraciones de los iones marinos se restaron de los totales calculados para cada uno de los componentes químicos en el agua de lluvia ($X_{\text{llovía}}$) para obtener la contribución de estos iones originados en la corteza terrestre, los biogénicos y antrópicos (X_{ns}) denominadas concentraciones del ión en exceso o no marino.

$$[\text{X}]_{\text{ns}} = [\text{X}]_{\text{llovía}} - [\text{X}]_{\text{marino}}$$

Se calculó la razón entre el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidificación (PA) según Herrera *et al.* (2009).

$$\text{PN/PA} = [\text{NH}_4^+ + (\text{Ca}^{2+})_{\text{ns}}] / [\text{NO}_3^- + (\text{SO}_4^{2-})_{\text{ns}}]$$

El cálculo de los factores de enriquecimiento (FE) para los iones SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} con respecto al Na^+ y de los elementos con respecto a su abundancia en la corteza terrestre tomando al Fe como normalizador se realizó según Duce *et al.* (1975).

$$\text{FE} = (\text{X} / \text{Na}^+)_{\text{agua de lluvia}} / (\text{X} / \text{Na}^+)_{\text{agua de mar}}$$

donde X es el ión de interés.

$$FE = (X/Fe)_{\text{agua de lluvia}} / (X/Fe)_{\text{corteza terrestre}}$$

donde X es el elemento de interés.

Los valores de las relaciones iónicas en el agua de mar fueron los utilizados por Keene *et al.*, (1986) y los valores de referencia para los elementos de la corteza terrestre fueron obtenidos de Masson (1966).

Se determinaron los coeficientes de correlación para todos los posibles pares de iones mediante la matriz de correlación de Spearman y posteriormente se realizó un análisis de componentes principales con rotación ortogonal, a partir del cual se obtuvo un nuevo set de variables reducidas de la interrelación de los datos originales utilizando el programa SPSS versión 17 para Windows XP.

4.7 Relación entre las concentraciones mensuales de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- y las condiciones sinópticas que afectaron a Cuba durante el período noviembre 2008 - abril 2010

Para determinar el tipo de situación sinóptica (TSS) mensual predominante para el occidente, centro y oriente de Cuba se utilizó el estadígrafo de la moda, a partir de los cuales se determinó a su vez el TSS predominante en cada región para 2 períodos poco lluvioso (noviembre 2008 – abril 2009) y (noviembre 2009 - abril 2010) y período lluvioso (mayo 2009 – octubre 2009). Así se recopiló la información respecto al número y tipo de frentes fríos que afectaron cada región durante los períodos poco lluviosos.

4.8 Propuesta de medidas de gestión para mejorar la calidad del aire en Cuba

Con la información obtenida se formuló una serie de lineamientos y medidas destinadas a mejorar la calidad del aire en Cuba, con especial énfasis en el control de los niveles máximos permitidos de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, para lo cual se revisó el Plan de Prevención y Descontaminación (PPDA) para la Región Metropolitana de Chile, así como otros estudios de reducción de emisiones y gestión de la calidad del aire en otros países.

5. Resultados y Discusión

5.1 Variación estacional - espacial del pH, conductividad eléctrica y componentes químicos de las lluvias en Cuba

5.1.1 Variación estacional - espacial del pH y conductividad eléctrica de las lluvias en Cuba

La Figura 3 muestra las diferencias en la distribución del valor medio ponderado del pH de la lluvia de las 11 estaciones estudiadas. En Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Palo Seco los valores son $< 5,6$ (lluvia ácida) en contraste al resto de las estaciones de monitoreo, donde predominan los valores del pH ligeramente básicos.

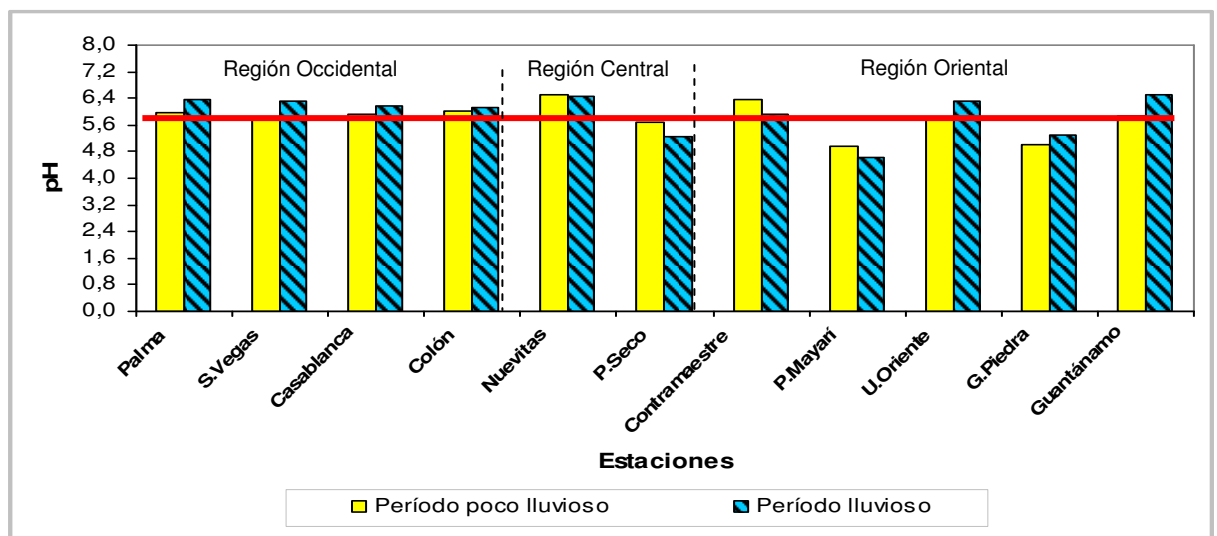


Figura 3. Valores promedio de pH ponderados por volumen para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Las estaciones Pinares de Mayarí y Gran piedra que presentan los menores valores de pH se encuentran ubicadas bajo la influencia directa de los vientos predominantes del noreste, donde está emplazada una zona industrial para el procesamiento de níquel y una termoeléctrica, que producen elevadas emisiones de azufre a la atmósfera proveniente de la quema de petróleo combustible y petróleo crudo nativo para la generación de electricidad (López *et al.*, 2009). Los valores de pH inferiores a 5,6 en la estación de Palo

Seco probablemente son debido a las características ácidas de los suelos de la localidad (López *et al.*, 1997).

En las estaciones de la región occidental los valores promedio de pH del período poco lluvioso son menores a los del período lluvioso en todos los casos, lo cual sugiere la posible influencia de las condiciones meteorológicas estacionales como la llegada de los frentes fríos que han recorrido el noreste de los EE.UU. (zonas con elevada industrialización) y cuentan con altas concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- (McDowell *et al.*, 1990; Jickells *et al.*, 1982). El mayor efecto de los frentes fríos es recibido en la zona occidental según Hernández (2002).

La figura 4 muestra que en la estación de Nuevitas se alcanza la mayor concentración de electrolitos en el agua de lluvia. Nuevitas es llamada la ciudad industrial de Cuba. Los valores > de $25 \mu\text{S/cm}$ son tres veces superiores a los registrados en la Gran Sabana de Venezuela de $8,1 \mu\text{S/cm}$, región con características remoto-prístinas (Sanhueza *et al.* 2005b) y comparables con los de ciudades portuarias-industrializadas como Tricity en Polonia de $53 \mu\text{S/cm}$ (Astel *et al.*, 2002).

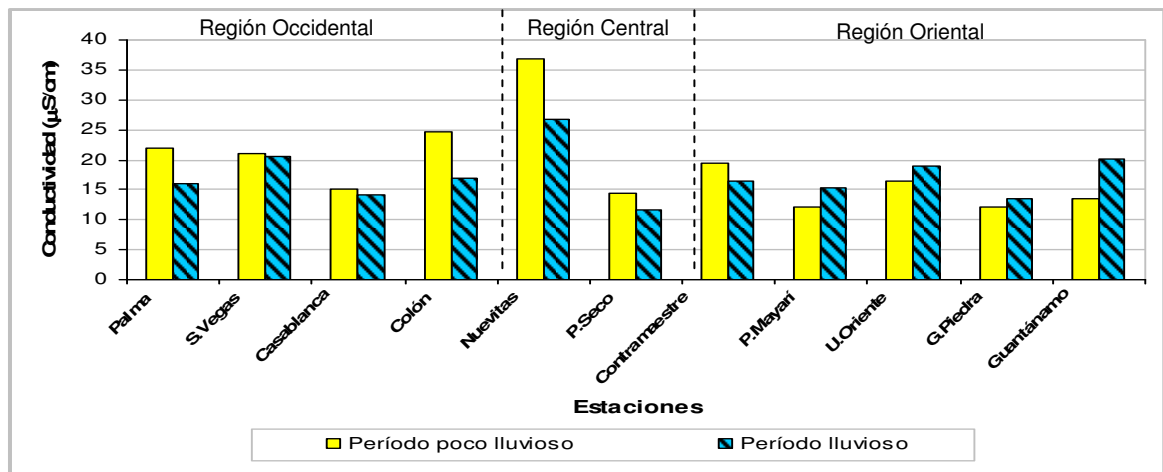


Figura 4. Valores promedio ponderados por volumen de conductividad en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Los valores de conductividad generalmente fueron mayores durante el período poco lluvioso debido a que la turbulencia superficial logra incorporar a la atmósfera gran cantidad de partículas (Seinfeld y Pandis, 2006), excepto para las estaciones Pinares de Mayarí, Universidad de Santiago, Gran Piedra y Guantánamo que están bajo la influencia de las emisiones de una termoeléctrica. Según López *et al.* (1997) la generación de

energía eléctrica es mayor durante el período lluvioso, lo cual pudiera ser la causa de la mayor concentración de electrolitos en las aguas de las lluvias de estas localidades.

5.1.2 Variación estacional – espacial de aniones y cationes mayoritarios en las Lluvias de Cuba.

Las concentraciones de los iones F^- , NO_2^- y $CH_3SO_3^-$ se encontraron en la mayoría de las muestras por debajo del límite de detección de la técnica empleada.

Nitrato

En todas las estaciones estudiadas las concentraciones de nitrato se encuentran por encima de los valores de fondo de $2,50 \mu eq/l$ informados por Casimiro *et al.* (1991) para el hemisferio norte (Figura 5).

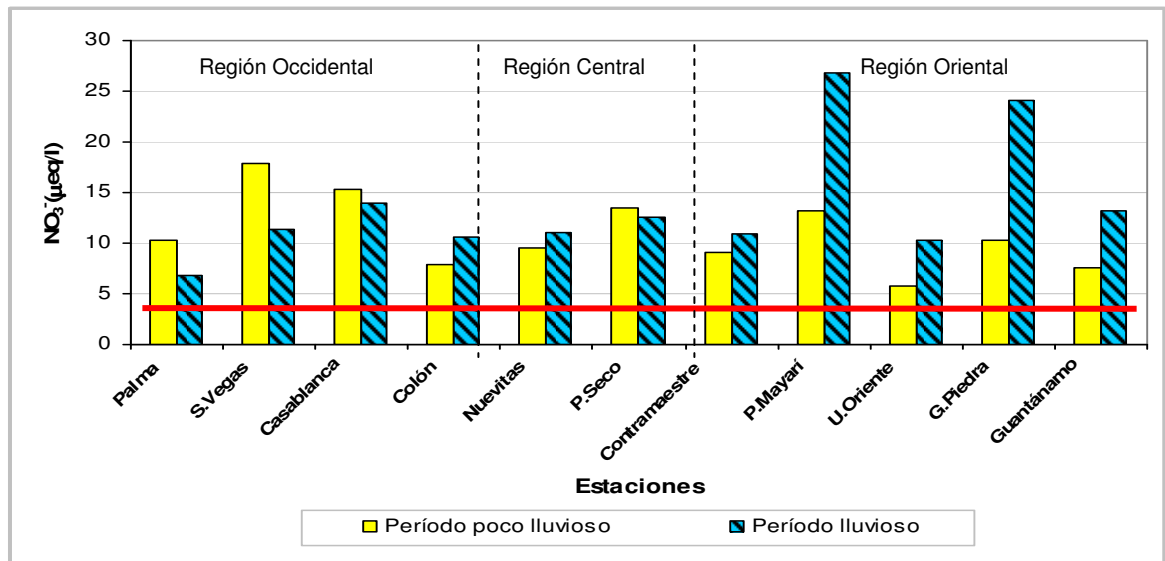


Figura 5. Concentraciones promedio ponderados por volumen de NO_3^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Las mayores concentraciones se cuantificaron en las aguas de lluvia de las estaciones Pinares de Mayarí y Gran Piedra, probablemente debido a la influencia a mesoescala de los contaminantes emitidos desde la termoeléctrica situada en la zona norte de la provincias Orientales.

Sulfato no marino

La figura 6 muestra que en todas las estaciones los valores de sulfato no marino son superiores a los valores de fondo de 10 $\mu\text{eq/l}$ informados para el hemisferio norte por Galloway *et al.* (1984) y Casimiro *et al.* (1991).

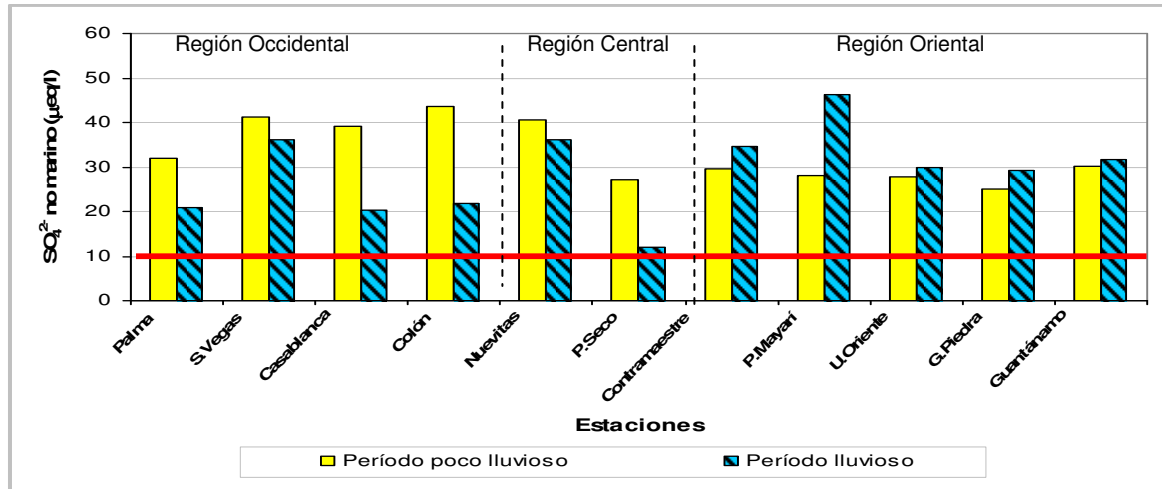


Figura 6. Concentraciones promedio ponderados por volumen de SO_4^{2-} no marino en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

En Pinares de Mayarí durante el período lluvioso se determinaron las mayores concentraciones de SO_4^{2-} no marino lo cual pudiera relacionarse con el transporte de contaminantes desde la costa norte oriental y la mayor producción de energía eléctrica durante esta temporada.

En Santiago de las Vegas y Nuevitás las altas concentraciones de SO_4^{2-} no marino durante el período lluvioso muestran que podrían estar afectadas por emisiones locales de la quema de combustibles fósiles, confirmando las características de estas estaciones semiurbana y urbana. Las cuales se encuentran bajo la influencia directa de las masas de aire del noreste, donde se encuentran ubicados sectores industriales.

En las estaciones de la región occidental y central se determinaron mayores concentraciones durante el período poco lluvioso con respecto al lluvioso, lo cual pudiera estar asociado al movimiento de las masas de aire de los frentes fríos desde los EE.UU. hacia el Caribe, las cuales pudieran elevar las concentraciones de SO_4^{2-} por el transporte de contaminantes desde dos fuentes: a) el continente americano y b) las termoeléctricas, y los centros industriales ubicados al noroeste de dichas localidades (Figura 7). Los

frentes fríos entran a Cuba por el noroeste y se mueven hacia el este pasando sobre la isla.

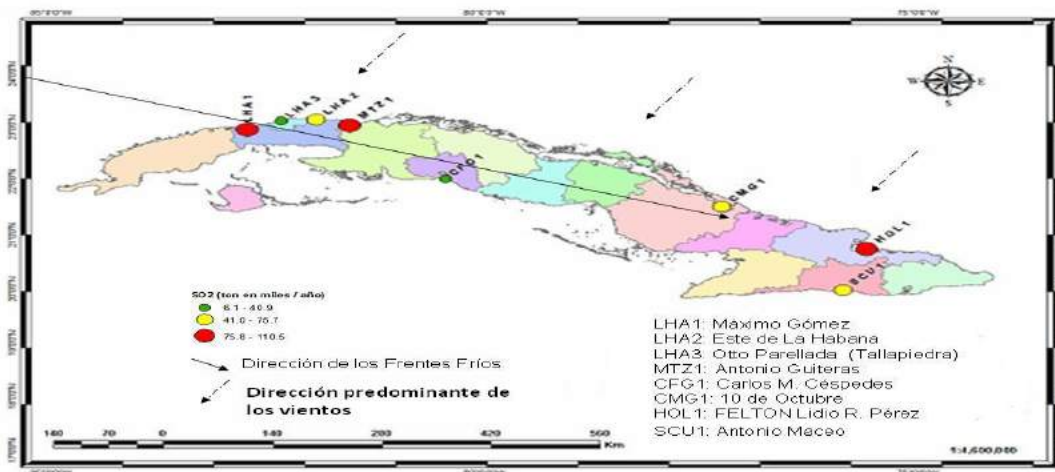


Figura 7. Distribución de las emisiones de SO₂ proveniente de centrales termoeléctricas, dirección de los vientos predominantes y Frentes Fríos.

Fuente: Modificado de Collazo, 2011.

Acetato y Formiato

Los ácidos acético y fórmico se observaron en las lluvias de áreas rurales y urbanas (Figuras 8 y Figura 9), de forma similar a lo informado por otros autores que han determinado la presencia de estos compuestos en lluvias de áreas con alto desarrollo y en regiones prístinas (Peña *et al.*, 2002; Coelho *et al.*, 2008). Esta es la primera vez que se cuantifican estos analitos para Cuba.

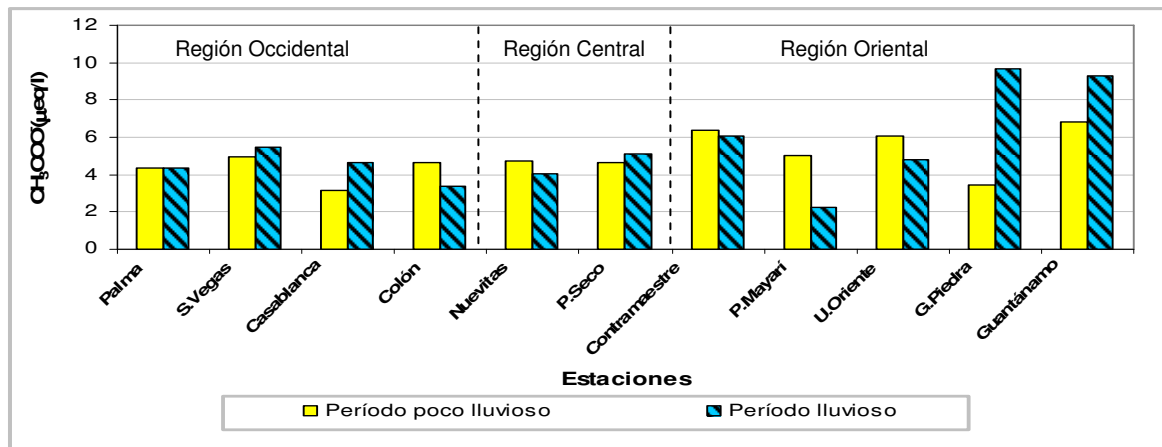


Figura 8. Concentraciones promedio ponderados por volumen de CH₃COO⁻ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

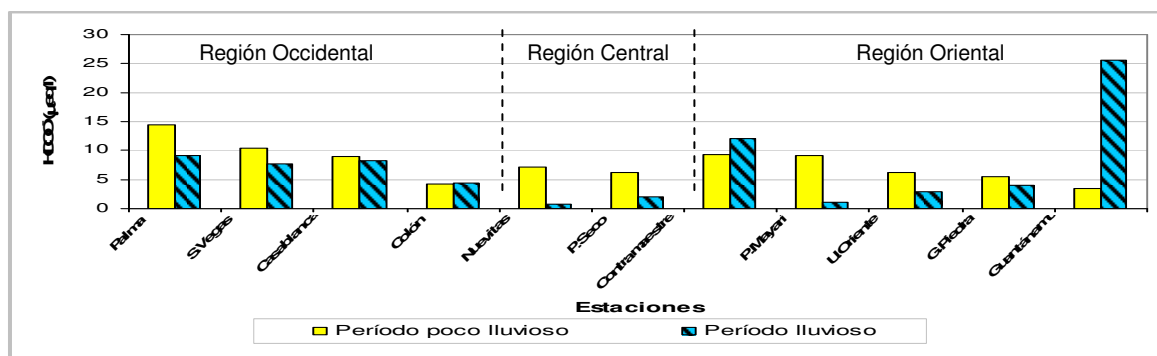


Figura 9. Concentraciones promedio ponderados por volumen de HCOO^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

En la localidad de Guantánamo se observan mayores concentraciones CH_3COO^- y HCOO^- durante el período lluvioso, lo cual pudiera estar relacionado con la quema de biomasa durante la época de corte de la caña de azúcar y la quema de residuos al finalizar la cosecha de los cultivos. Esto concuerda con lo observado por Coelho *et al.* (2008), quienes determinaron que estos ácidos carboxílicos forman parte de las emisiones primarias de la quema de caña de azúcar. Los valores informados en este trabajo son comparables también con los encontrados en las sabanas de Maracaibo, donde las fuentes de estos compuestos son las emisiones naturales o la quema de biomasa (Morales *et al.*, 1995).

Cloruro

En las aguas de lluvias de Nuevitas se observaron las mayores concentraciones de Cl^- en contraste con el resto de las localidades probablemente debido a la producción minero salinera de esta localidad (Figura 10).

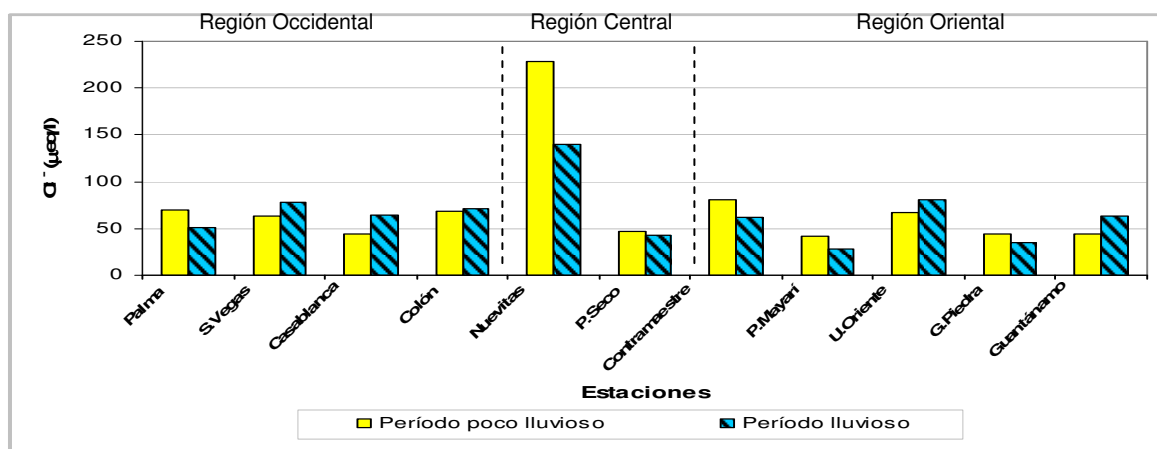


Figura 10. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Cl^- en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Sodio y Magnesio

Las concentraciones de estos elementos en cada una de las estaciones son similares a las observadas en otras partes del mundo con influencia marina similar a Cuba como, El Verde en Puerto Rico y Puerto Morelos en México (McDowell *et al.*, 1990; Cerón *et al.*, 2002) (Figuras 11 y 12). Las mayores concentraciones fueron observadas en la estación de Nuevitas debido probablemente a la extracción minera salinera.

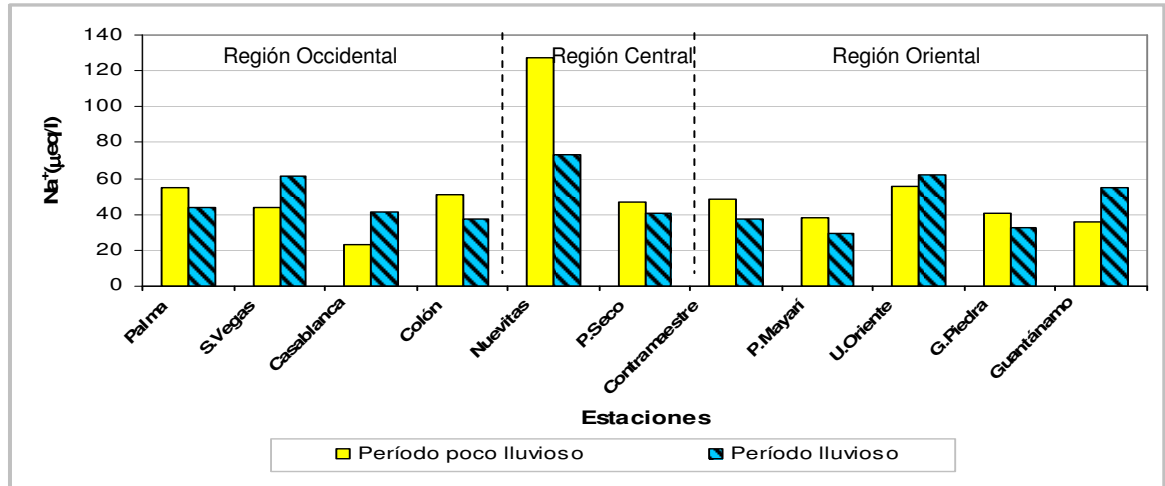


Figura 11. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Na⁺ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

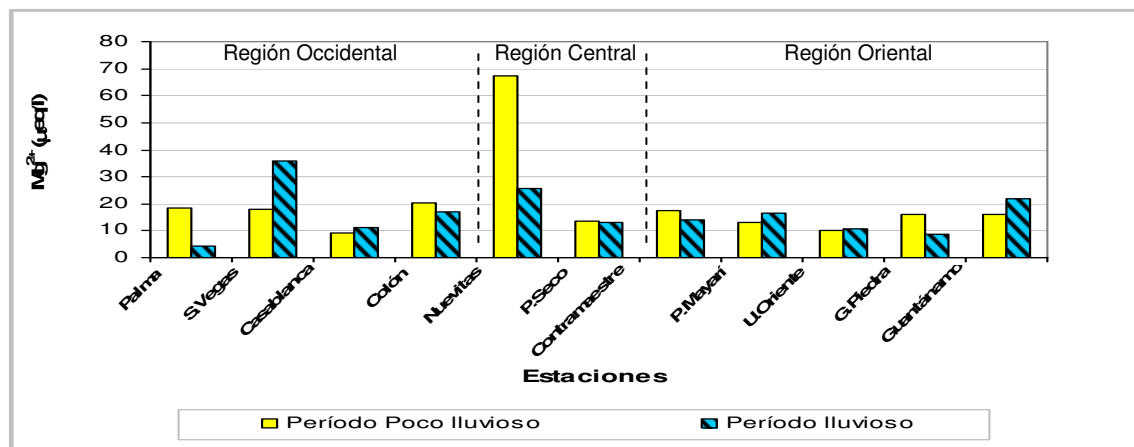


Figura 12. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Mg²⁺ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Amonio

La figura 13 muestra las mayores concentraciones de amonio en la localidad de Colón, lo cual puede ser reflejo de las actividades ganaderas que se desarrollan en las inmediaciones de la estación de monitoreo. Esto concuerda con los valores informados en estudios anteriores por López *et al.* (1997).

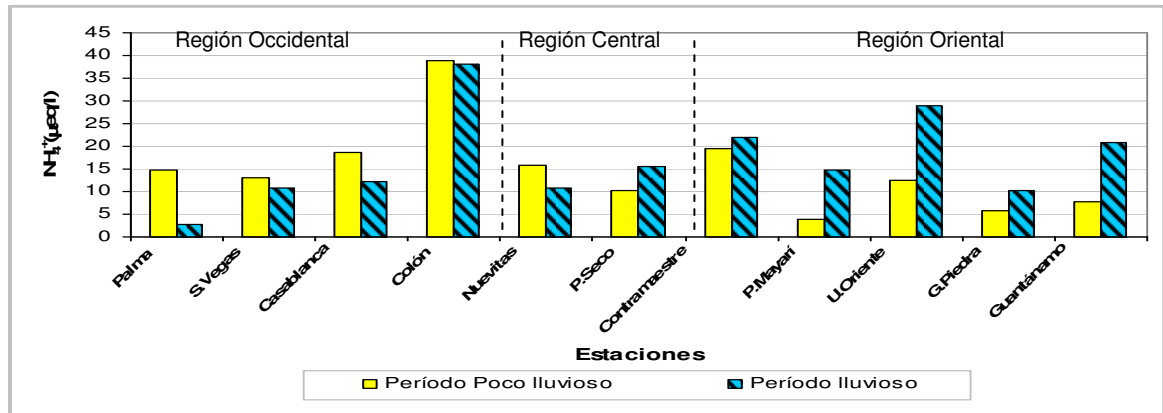


Figura 13. Concentraciones promedio ponderados por volumen de NH_4^+ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

Potasio

Las mayores concentraciones de K^+ se observaron en las estaciones Colón, Nuevitas y Universidad de Santiago como se muestra en la figura 14, probablemente debido a que la turbulencia superficial incorpora a la atmósfera este elemento desde la corteza terrestre.

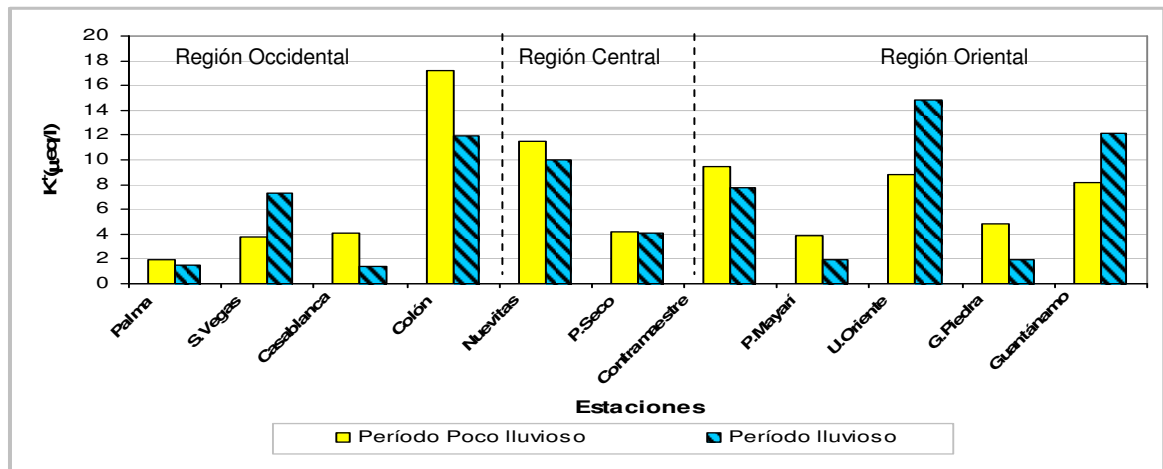


Figura 14. Concentraciones promedio ponderados por volumen de K^+ en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

En Contramaestre y Guantánamo se determinaron también concentraciones de potasio, que podrían estar relacionados con emisiones antropogénicas por la quema de cultivos de caña de azúcar.

Calcio

Las mayores concentraciones fueron observadas en la estación de Nuevitas (Figura 15). Al noreste de la estación de monitoreo se ubica una de las mayores fábricas de cemento de Cuba, la que sería su fuente más probable.

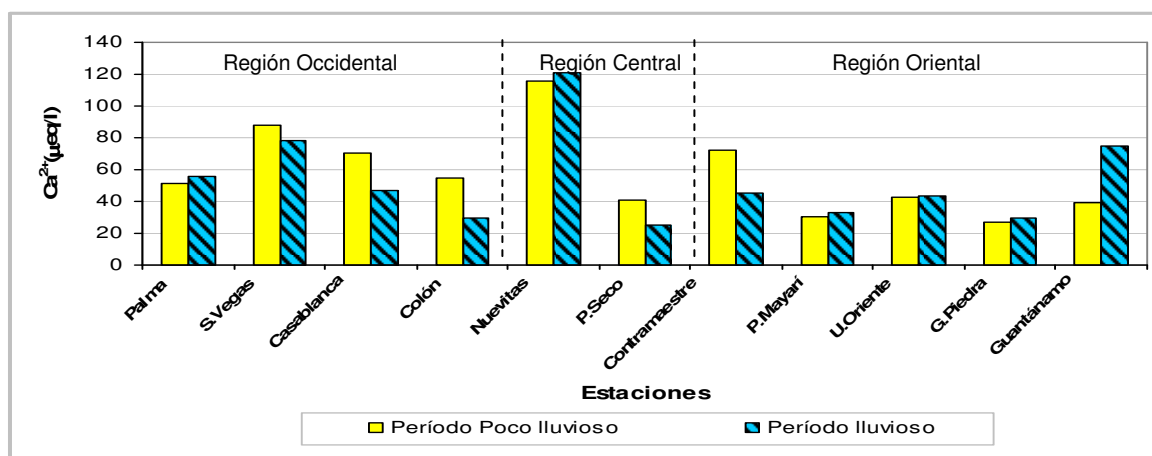


Figura 15. Concentraciones promedio ponderadas por volumen de Ca^{2+} en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009 y noviembre 2009-abril 2010) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

El cuadro 6 muestra los valores promedio ponderado de pH y las concentraciones promedio ponderadas por volumen de los iones del período comprendido entre noviembre 2008-octubre 2009 para las estaciones urbanas de Cuba y otras ciudades del mundo. Se destaca en rojo que los valores de sulfato en las estaciones de Santiago de las Vegas y Nuevitas son cercanos a los de dos grandes ciudades del mundo: Ciudad de México y Tokio, pero son menores que los de Shangai y Beijing.

Cuadro 6. pH y concentraciones ponderadas por volumen ($\mu\text{eq/l}$) de iones presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo urbanas de Cuba y otros países.

Estación	Región	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
S. Vegas	Occidente	6,21	76,5	13,8	45,6	58,8	12,8	6,7	33,8	83,8
Casablanca	Occidente	6,14	61,4	14,9	26,4	38,5	13,5	2,1	11,2	49,7
Nuevitas	Central	6,48	149	10,8	44,3	78,4	10,8	9,8	28,1	117,9
U.Santiago	Oriental	6,02	75,6	8,6	36,3	59,8	22,5	12,5	10,4	42,8
Shanghai ^a	China	4,49	58,3	49,8	199	50,1	80,7	14,9	29,6	204
Beijing ^b	China	6,48	-	118	380	-	211	-	-	159
México ^c	México	5,08	9,6	42,6	61,9	7,0	92,4	2,2	2,5	26,4
Tokio ^d	Japón	4,52	55,2	30,5	50,2	37,0	40,4	2,9	11,5	24,9

a Huang *et al.*, 2008.

- no informado.

b Tang *et al.*, 2005.

c Báez *et al.*, 2007.

d Okuda *et al.*, 2005.

De manera similar el cuadro 7 muestra las concentraciones promedio ponderado de pH y CPPV de los iones de estaciones rurales de Cuba y de otras estaciones rurales del mundo. Se puede observar que las concentraciones de nitrato y sulfato en las estaciones de Pinares de Mayarí y Gran Piedra presentaron valores superiores a los de las estaciones rurales de Puerto Rico y China. Estos resultados son indicativos del transporte de NO₃⁻ y SO₄²⁻ desde las zonas industriales-urbanas ubicadas en la costa norte de las provincias orientales de Cuba.

Cuadro 7. pH y concentraciones promedio ponderadas por volumen ($\mu\text{eq/l}$) de iones presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo rurales de Cuba y otros países.

Estación	Región	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
La Palma	Occidente	6,27	49,7	7,0	31,4	43,1	12,5	1,61	15,3	57,8
Colón	Occidente	6,13	70,6	11,2	25,9	37,5	38,2	12,2	16,2	30,4
P.Seco	Central	5,36	44	11,4	24,5	41,2	12,5	4,2	13,1	29,5
Contramaestre	Oriental	6,04	67,6	10,3	37,9	41,3	21,1	8,3	15	54,2
P.Mayarí	Oriental	4,73	32,8	22,5	44,4	32,1	11,4	2,6	15,4	32,1
G.Piedra	Oriental	5,19	7,5	36,9	20,6	32,4	34,5	9,1	2,6	10,5
Guantánamo	Oriental	6,27	59,1	11,9	37,3	50,7	18,1	11,3	20,7	67,4
El Verde ^a	Puerto Rico	5,12	82	4,3	17	66	2,9	1,8	15	8,5
Nam Co, Tibet ^b	China	6,03	19,2	10,4	15,5	15,4	18,1	14,5	7,4	65,6

a McDowell *et al.*, 1990.

b Li *et al.*, 2007.

5.1.3 Variación estacional – espacial de algunos elementos traza en las lluvias de Cuba.

Por primera vez se informan en este trabajo los siguientes elementos traza: Ba, Cu, Fe, Mn, Se, Zn en las lluvias de Cuba cuyas concentraciones en la mayoría de las estaciones son similares tanto en el período lluvioso como en el poco lluvioso (Figuras 16, 17 y 18).

La figura 16 muestra las mayores concentraciones de Ba en el orden siguiente Nuevitas > Palma > Pinares de Mayarí > Guantánamo. Estos resultados confirman que estas estaciones son afectadas por emisiones provenientes de la quema de petróleo. Nuevitas por las emisiones locales desde una termoeléctrica y otras industrias de la zona. La Palma posiblemente recibe la influencia del transporte de los contaminantes desde las termoeléctricas y centros industriales ubicados al noreste y desde el continente americano durante el período poco lluvioso. Pinares y Guantánamo reciben la influencia del transporte de los contaminantes desde una termoeléctrica y la zona minera ubicada en la costa norte de las provincias orientales.

La determinación de selenio en Nuevitas, Pinares y Guantánamo ratifica que estas localidades reciben emisiones antropogénicas asociadas a la quema de petróleo. Según Pacyma y Pacyma (2001) las emisiones antropogénicas de Ba y Se se asocian habitualmente a procesos de quema de petróleo.

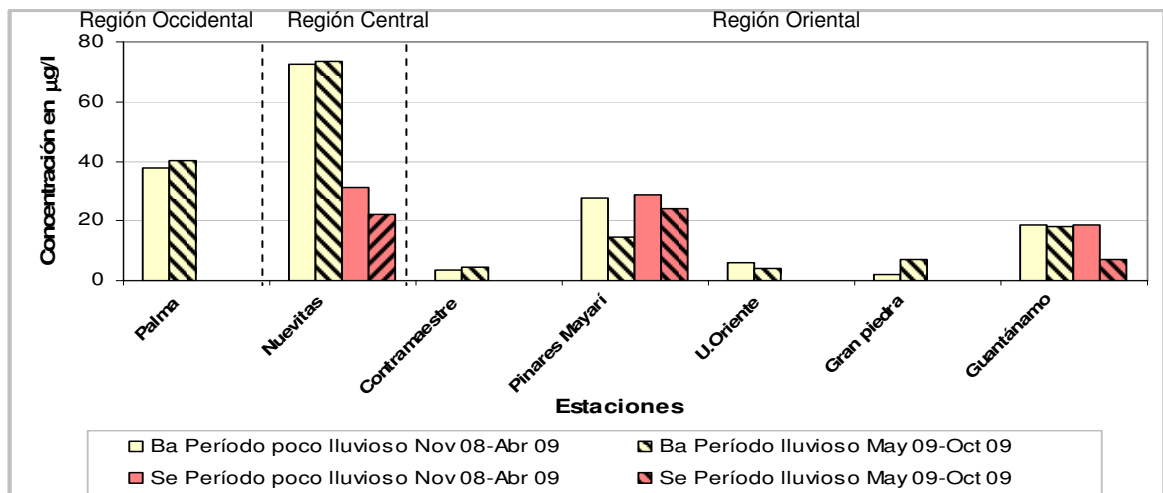


Figura 16. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Ba y Se en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

La figura 17 muestra las mayores concentraciones de zinc en la estación de Nuevitas probablemente debido a una fábrica de alambre de púas y electrodos. Las altas

concentraciones observadas en la Palma podrían asociarse con emisiones provenientes del desgaste de neumáticos de los vehículos que pasan por una autopista próxima a la estación. Las concentraciones de cobre fueron menores y similares en todas las estaciones, lo cual sugiere a la corteza terrestre como origen predominante.

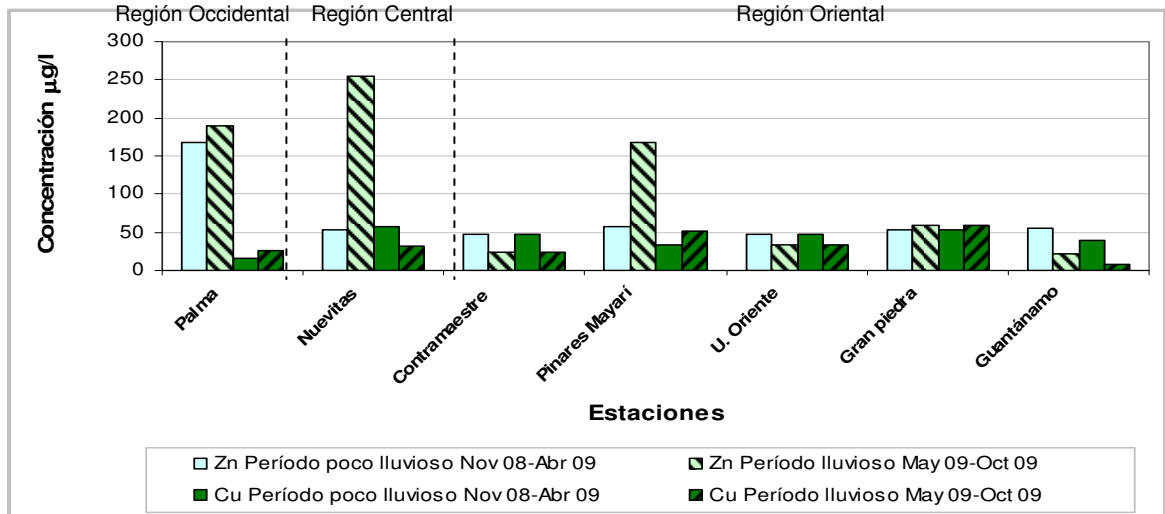


Figura 17. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Zn y Cu en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

La figura 18 muestra que las concentraciones de Mn y Fe fueron similares en todas las estaciones. No obstante las mayores concentraciones de Fe se observaron en la estación de Pinares de Mayarí cuyos suelos presentan alto contenido de este elemento. Estos resultados concuerdan con lo informado en la literatura de las emisiones naturales de estos elementos (Pacyma y Pacyma, 2001).

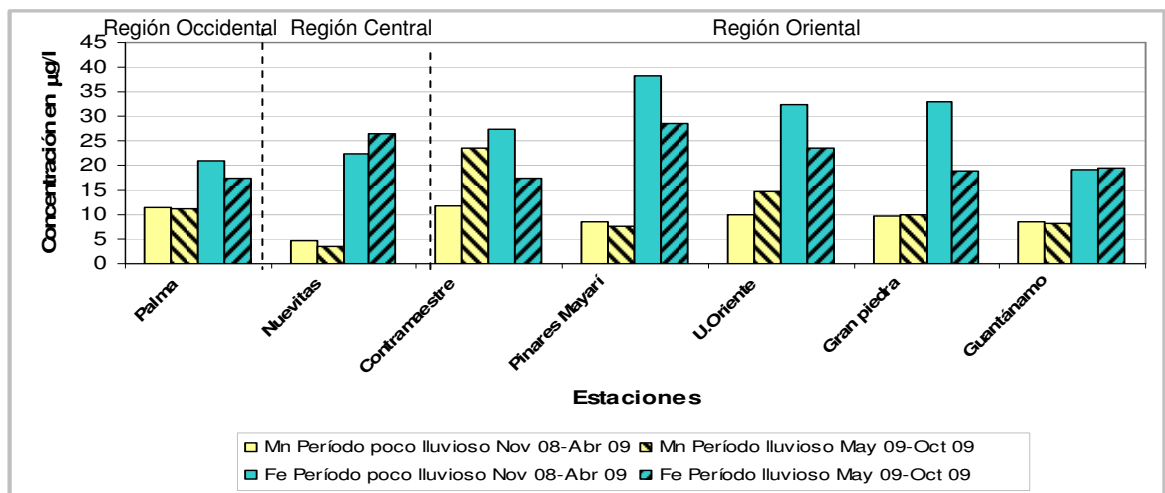


Figura 18. Concentraciones promedio ponderados por volumen de Mn y Fe en las lluvias para los períodos poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009) y lluvioso (mayo 2009-octubre 2009) en diferentes zonas de Cuba.

El cuadro 8 muestra las concentraciones promedio ponderadas de los elementos determinados en estaciones urbanas de este estudio y de otras ciudades del mundo. De esta comparación, destaca que en la ciudad de Nuevitas se observaron las mayores concentraciones de Zn, Cu, Ni y Pb, lo cual sugiere la influencia de emisiones antropogénicas en esta localidad.

Cuadro 8. Concentraciones promedio ponderadas ($\mu\text{g/l}$) de elementos presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones de monitoreo urbanas de Cuba y otros países

Estaciones	Zn	Cu	Mn	Ba	Fe	Se	Ni	Pb
Nuevitas	241	33	3,7	73,6	26,2	23,4	16	17
Santiago de Cuba	39	39	13	4,8	26,8	<LC	<LC	<LC
San José, Costa Rica ^a	-	4	16	-	58	-	3	5
Montreal, Canadá ^b	28	4	9,5	-	91	-	-	-
Okayama, Japón ^c	126	18	-	-	377	-	-	-

a Herrera *et al.*, 2009.

b Poissant *et al.*, 1994.

c Chiba 1987 citado en Hou *et al.*, 2005.

- no informado

LC: límite de cuantificación

De forma similar, el cuadro 9 muestra que las concentraciones promedio ponderadas de los elementos en estaciones rurales son mayores con respecto a estaciones con similares características de otros países. Esto sugiere el transporte de contaminantes desde zonas industriales hasta las localidades rurales, que no cuentan con fuentes antropogénicas.

Cuadro 9. Concentraciones promedio ponderadas por volumen ($\mu\text{g/l}$) de elementos presentes en las precipitaciones colectadas en estaciones rurales de Cuba y otros países.

Estaciones	Zn	Cu	Mn	Ba	Fe	Se	Co
Palma	186	24,7	11,2	39,6	17,9	<LC	<LC
Contramaestre	31,4	31,4	19,5	4,1	20,7	<LC	<LC
Pinares Mayarí	133	45,3	8	20,3	31,6	26,7	13,4
Gran piedra	57,9	57,9	9,9	5,7	22,2	<LC	<LC
Guantánamo	30,7	7,8	9,4	20,7	18,3	12,1	6,2
Hiroshima, Japón ^a	4,8	0,6	1,6	-	-	-	-
Oeste de Suiza ^b	22	2,8	5,6	-	8	-	-

a Takeda *et al.*, 2000

b Atteia, 1994

- no informado

LC: límite de cuantificación

Por otra parte, en anexo 3 se resumen los parámetros de la estadística descriptiva para pH, iones y otros elementos. Así, como en el anexo 4 se muestra la variación estacional de la cantidad de lluvia, temperatura y humedad relativa de cada estación durante el período del estudio.

5.2 Tasas de depositación húmeda (TDH) para iones y elementos

El cuadro 10 muestra las TDH de cada especie química en meq/m²/año en cada localidad estudiada. Los iones que poseen mayor TDH son el Cl⁻ y el Na⁺, lo cual refleja la influencia de los aerosoles marinos en la composición química de las lluvias de la isla de Cuba. Las TDH de NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺ de las estaciones rurales de Cuba muestran valores muy superiores a los de una estación rural del Noroeste de Europa. Esto sugiere un transporte de contaminantes desde otros sitios hacia las estaciones rurales.

Destacan altos valores de la TDH de formiato en Guantánamo, sugiriendo quema de biomasa en esta localidad por la presencia de campos cultivados con caña de azúcar. La literatura informa del inadecuado manejo del cultivo por la quema de su follaje con el objeto de facilitar su corte manual (Coelho *et al.*, 2008).

Cuadro 10. Tasa de depositación húmeda para iones (meq/m²/año) en estaciones rurales de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período noviembre 2008- octubre 2009 y otro sitio rural del mundo

	Palma	Colón	Palo Seco	C.Maestre	P.Mayarí	G. Piedra	Guantánamo	Noroeste de Europa
Cl ⁻	63,7	87,8	44,0	67,6	32,8	37,0	59,1	-
NO ₃ ⁻	9,0	14,0	11,4	10,3	22,5	20,6	11,9	5,0
SO ₄ ²⁻	40,2	32,3	24,5	37,9	44,4	32,4	37,3	15
CH ₃ COO ⁻	4,2	3,5	4,7	6,2	3,1	8,1	11,9	-
HCOO ⁻	11,4	4,4	3,1	10,8	3,8	7,8	37,3	-
Na ⁺	55,2	46,7	41,2	41,3	32,1	34,5	50,7	-
NH ₄ ⁺	16,0	47,5	12,5	21,1	11,4	9,1	18,1	5,0
K ⁺	2,1	15,2	4,2	8,3	2,6	2,6	11,3	-
Mg ²⁺	19,6	20,1	13,1	15,0	15,4	10,5	20,7	2,0
Ca ²⁺	74,1	37,8	29,5	54,2	32,1	28,9	67,4	5,0

* Galloway, 1982 citado en Migliavacca *et al.*, 2004

- no informado.

El cuadro 11 muestra las TDH en las estaciones urbanas donde los mayores valores fueron para Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺ y SO₄²⁻. Destacan la elevada tasa de depositación de SO₄²⁻ en las estaciones de Santiago de las Vegas, Nuevitas y Universidad de Oriente que se encuentran entre los valores de la ciudad de Piracicaba y los de la zona altamente industrializada del noreste de los EE.UU (Munger y Eisenrich, 1983 citado en Migliavacca *et al.*, 2004; Lara *et al.*, 2001). Esto sugiere que en las estaciones urbanas, la quema de combustible fósil, en especial del petróleo crudo cubano con 4-7 % de azufre, contribuye al aumento de las emisiones de SO₂. Aunque no fueron informadas las TDH de formiato y acetato en los sitios de comparación, es interesante destacar que se determinaron en las

estaciones urbanas TDH de acetato y formiato asociadas probablemente a las emisiones naturales del arbolado urbano. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Morales *et al.* (1995) y Mpeheya *et al.* (2004).

Cuadro 11. Tasa de depositación húmeda para iones (meq/m²/año) en estaciones urbanas de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período noviembre 2008- octubre 2009 y otros sitios urbanos del mundo

	S.Vegas	Casablanca	Nuevitas	U.Oriente	Noreste EE,UU ^a	Piracicaba ^b Brasil
Cl ⁻	93,9	35,2	108	74,3	25,0	7,4
NO ₃ ⁻	16,9	8,5	7,8	8,4	30,0	18,4
SO ₄ ²⁻	56,0	15,1	32,2	35,6	65,0	20,0
CH ₃ COO ⁻	6,6	2,5	3,0	5,2	-	-
HCOO ⁻	6,1	4,8	1,3	3,6	-	-
Na ⁺	72,2	22,1	57	58,7	20,0	3,5
NH ₄ ⁺	15,7	7,7	7,9	22,1	15,0	16,5
K ⁺	8,2	1,2	7,2	12,3	2,0	4,2
Mg ²⁺	41,5	6,4	20,4	10,2	5,0	2,0
Ca ²⁺	103	28,5	85,7	42,1	15,0	5,8

^a Munger y Eisenrich, 1983 citado en Migliavacca *et al.*, 2004.

^b – no informado

^b Lara *et al.*, 2001.

El cuadro 12 muestra las tasas de depositación húmeda para los elementos estudiados, donde los mayores valores fueron para Zn, Ba y Fe. La estación de Pinares de Mayarí, estación rural, recibe las TDH más alta de Zn, Cu, Mn, Fe, Se y Co, lo cual podría relacionarse con el hecho de estar bajo la influencia de los vientos predominantes de nordeste, donde se ubica un sector industrial minero metalúrgico. No obstante, no se observa la depositación de Ni, elemento que si lo hace en la estación de Nuevitas, que es además la única en donde se aprecia depositación de Pb.

Cuadro 12. Tasa de depositación húmeda para elementos (mg/ m²/año) en estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio.

	Palma (rural)	C.Maestre (rural)	P.Mayarí (rural)	G.Piedra (rural)	Guantánamo (rural)	U.Oriente (urbana)	Nuevitas (urbana)
Zn	203	31,8	215	50,3	18,2	38,1	168
Cu	27,0	19,7	73,5	8,6	4,6	12,7	22,9
Mn	12,2	4,2	13,0	5,0	5,6	4,7	2,6
Ba	43,3	37,8	32,8	25,8	12,3	23,5	51,3
Fe	19,5	21,0	51,2	19,3	10,9	26,2	18,2
Se	-	-	43,3	-	7,2	-	16,3
Co	-	-	21,6	-	3,6	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	11,2
Pb	-	-	-	-	-	-	11,7

5.3 Contribuciones ácidas

La figura 19 muestra que la contribución a la acidez total en las estaciones urbanas varía para los ácidos minerales entre 80 y 90 %, en tanto que para los ácidos orgánicos lo hace entre 10 y 20 %.

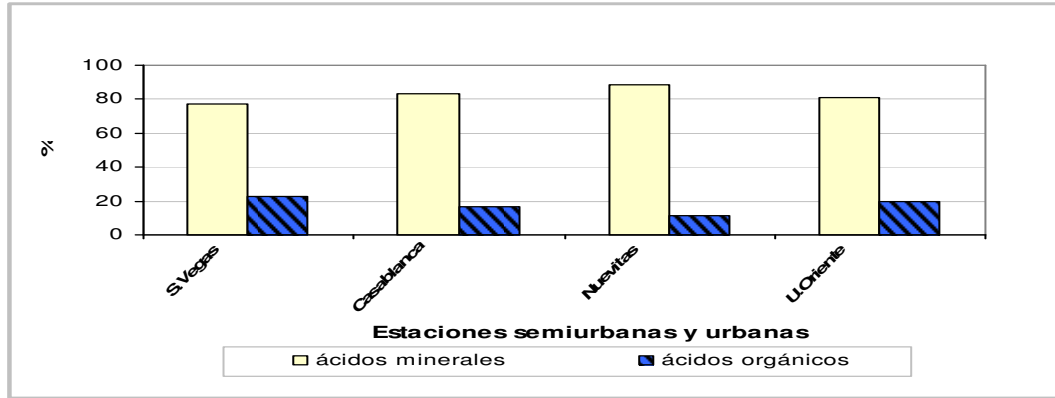


Figura 19. Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total en estaciones de monitoreo semiurbanas y urbanas de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.

En la figura 20 se observa que la contribución de los ácidos orgánicos a la acidez total en las estaciones rurales se encuentra entre 20 y 45 % y la de los ácidos minerales entre 55 - 80 %, a excepción de la estación Pinares de Mayarí, donde sólo un 10% corresponde a los ácidos orgánicos y un 90 % a los ácidos minerales. Esto sugiere nuevamente la influencia directa de los vientos que provienen de la costa norte oriental (zona industrial). En el Anexo 5 se muestra la contribución en $\mu\text{equiv/l}$ para cada grupo de ácidos en cada estación.

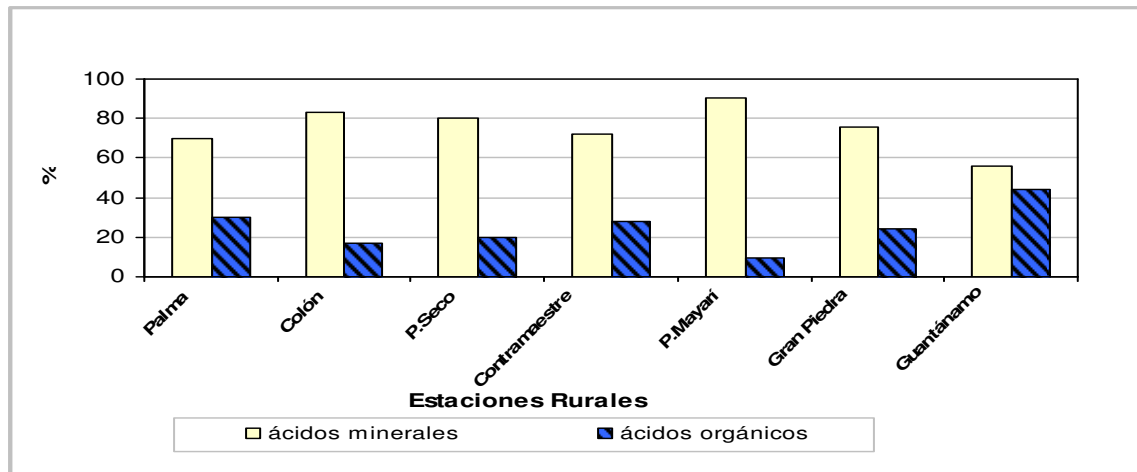


Figura 20. Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total en estaciones de monitoreo rurales de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.

5.4 Factores de neutralización

Los factores de neutralización describen las interacciones entre cationes y aniones. El cuadro 13 muestra el cálculo de los factores de neutralización para Ca^{2+} , NH_4^+ y Mg^{2+} en cada una de las estaciones durante el período de estudio. Se observa el predominio del catión Ca^{2+} como el principal agente neutralizador en el agua de las lluvias de Cuba, excepto en la estación de Colón donde NH_4^+ y Ca^{2+} constituyen los principales agentes neutralizadores; se postula que las actividades de ganadería que se desarrollan en las inmediaciones de la estación son las responsables de ello.

Los altos valores de Ca^{2+} en las lluvias de Cuba están relacionados con los procesos de turbulencia superficial que mantiene en resuspensión las partículas del suelo, los cuales son ricos en piedra caliza (López *et al.*, 1997). Otra fuente de aerosoles ricos en Ca^{2+} son las emisiones de las fábricas de cemento de la Ciudad de Habana y Nuevitas.

Los factores de neutralización más bajos se encontraron en primer lugar en la estación de Pinares de Mayarí y en segundo lugar en la estación de Gran Piedra, por lo cual la capacidad amortiguadora en las aguas de lluvias de estas estaciones es menor, lo que resulta en un aumento de la acidez de las lluvias.

Cuadro 13. Valores medios de los factores de neutralización para Ca^{2+} , NH_4^+ y Mg^{2+} en el agua de lluvia colectada en las estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio

Estación	FN Ca^{2+} ($\mu\text{equiv/l}$)	FN NH_4^+ ($\mu\text{equiv/l}$)	FN Mg^{2+} ($\mu\text{equiv/l}$)
La Palma	1,3	0,3	0,3
Santiago de las Vegas	1,3	0,2	0,5
Casablanca	1,3	0,3	0,2
Colón	0,8	0,8	0,4
Nuevitas	2,0	0,2	0,7
Palo Seco	0,8	0,3	0,3
Contramaestre	1,1	0,4	0,3
Pinares de Mayarí	0,5	0,2	0,3
Universidad de Oriente	1,0	0,5	0,3
Gran Piedra	0,6	0,2	0,2
Guantánamo	1,4	0,4	0,4

5.5 Potencial de neutralización y acidificación

Para analizar el balance entre acidez y alcalinidad se analizó la relación potencial de neutralización/potencial de acidificación (PN/PA). El cuadro 14 muestra esta relación y su comparación con los pH. La mayoría de los PN/PA fueron > 1 , lo cual sugiere, que en las lluvias caídas sobre las diferentes localidades de Cuba estudiadas existe un predominio de las especies alcalinas sobre las ácidas, excepto en las estaciones de Pinares de Mayarí y la Gran Piedra. En estas estaciones hay un predominio de las especies ácidas sobre las neutralizantes, lo cual está en concordancia con sus pH más ácidos de forma similar a lo informado por Tang *et al.*, (2005). En Palo Seco también se observó lluvias ácidas, lo cual se correlaciona con que fue la estación donde se determinó menor valor de potencial de neutralización/ acidificación después de las anteriormente mencionadas.

Cuadro 14. Valores medios del pH y la relación potencial neutralización/potencial acidificación en el agua de lluvia colectada en las estaciones de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio.

Estación	pH	PN/PA
La Palma	6,06	1,7
Santiago de las Vegas	6,08	1,8
Casablanca	6,02	1,7
Colón	6,08	1,8
Nuevitas	6,44	2,6
Palo Seco	5,42	1,1
Contramaestre	6,04	1,7
Pinares de Mayarí	4,73	0,7
Universidad de Oriente	6,02	1,7
Gran Piedra	5,19	0,8
Guantánamo	6,27	2,0

5.6 Razón $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$

La razón $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ se utiliza para indicar la contribución de las fuentes antropogénicas. El cuadro 15 muestra los resultados para las estaciones estudiadas y de otras localidades del mundo con características similares. Se observa que los valores de la razón tanto en las estaciones urbanas como en las rurales fueron superiores a 1, lo cual sugiere que la acidez de las precipitaciones está asociada principalmente a las características del ácido sulfúrico que se considera proveniente en buena medida de la transformación del SO_2 producido en la combustión del petróleo. En este caso el petróleo crudo nativo, especialmente utilizado en la generación de electricidad, sería la principal

fuente antropogénica de emisiones de SO₂ en Cuba y la responsable de los valores encontrados particularmente en las estaciones urbanas, incluso mayores que los determinados en el Distrito Federal, México.

Cuadro 15. Valores medios de la relación SO₄²⁻/NO₃⁻ en las aguas de lluvias colectadas en estaciones de Cuba durante el período de estudio y otros países

Estaciones Urbanas								
	S.Vegas	Casablanca	Nuevitas	U.Oriente	D. F. México ^a			
SO ₄ ²⁻ /NO ₃	2,5	2,7	4,7	4,2	1,5			
Estaciones Rurales								
	Palma	Colón	P.Seco	Contramaestre	P.Mayarí	G.Piedra	Guantánamo	Kavanayén Venezuela ^b
SO ₄ ²⁻ /NO ₃	3,7	2,2	2,1	3,7	1,9	1,6	3,2	1,5

a Báez *et al.*, 2007.

b Sanhueza *et al.* 2005b.

En las estaciones rurales los valores de la razón fueron mayores que el de Kavanayén, una localidad con características remoto-prístinas. Esto sugiere nuevamente el probable transporte de contaminantes desde otras localidades hacia las zonas rurales. En Pinares de Mayarí y Gran Piedra se obtuvieron los valores más bajos de la razón a consecuencia de que en éstas se determinaron mayores concentraciones de nitrato con respecto al resto de las estaciones.

5.7 Contribución de origen natural a las concentraciones de iones y elementos de aguas de lluvias colectadas en Cuba

5.7.1 Contribución marina a las concentraciones de iones

La contribución marina a las concentraciones de los iones SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, K⁺ y Mg²⁺ de las aguas de lluvias se estimó a partir del cálculo de los factores de enriquecimiento (FE) promedio, tomando Na⁺ como elemento normalizador. Los iones cuyos valores de los FE se encuentren entre 1 ± 1 tendrán un origen marino.

El cuadro 16 muestra los valores de los FE promedio para los iones anteriormente mencionados en las estaciones de la red de vigilancia de Cuba. Así, Cl⁻ y K⁺ tienen un origen natural marino en la mayoría de las estaciones con excepción de Colón y Nuevitas, en las cuales podría existir aporte desde fuentes antropogénicas a las concentraciones de

Cl⁻; en Colón por la quema de basuras y en Nuevitas por el aporte desde una minera salinera.

El SO₄²⁻, el Ca²⁺ y el Mg²⁺ en todas las estaciones tienen un origen no marino. Estos valores > 1 pueden ser atribuidos a contribuciones antropogénicas o de la corteza terrestre.

Cuadro 16. Factores de enriquecimiento para iones presentes en las aguas de lluvias colectadas en Cuba durante el período noviembre 2008-abril 2010.

Estaciones	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺⁺	K ⁺	Mg ²⁺
Palma	6	1	54	0,2	6
S. Vegas	7	1	72	0,5	13
Casablanca	10	1	107	0,4	8
Colón	7	2	46	1,4	12
Nuevitas	5	2	67	0,5	12
P.Seco	5	1	37	0,3	8
Contramaestre	7	1	56	1,1	9
P.Mayarí	12	1	50	0,4	12
U.Oriente	5	1	36	0,9	4
Gran Piedra	8	1	42	0,3	8
Guantánamo	6	1	66	1,2	10

Nota: Na⁺: elemento normalizador.

5.7.2 Contribución de la corteza terrestre a la concentración de elementos

El cuadro 17 muestra que los factores de enriquecimiento para los elementos Cu, Mn, Ba, Co y Ni fueron inferiores a 3, lo cual sugiere como origen predominante la corteza terrestre, debido a que valores menores a 3 fueron considerados indicativos de origen natural por las diferencias en la corteza terrestre para las diferentes partes del mundo (Herrera *et al.*, 2009). Así, entonces Zn, Se y Pb tienen un origen antrópico.

Cuadro 17. Factores de enriquecimiento para elementos presentes en las aguas de lluvias colectadas en Cuba durante el período noviembre 2008 – octubre 2009

Estaciones	Zn	Cu	Mn	Ba	Se	Co	Ni	Pb
Palma	7	1	0,03	0,3	-	-	-	-
Nuevitas	7	1	0,01	0,3	893	-	0,4	65
Contramaestre	1	1	0,01	0,2	-	-	-	-
P. Mayarí	3	1	0,01	0,1	846	1	-	-
U.Oriente	1	0,4	0,01	0,1	-	-	-	-
G.Piedra	2	0,4	0,01	0,2	-	-	-	-
Guantánamo	1	2	0,03	0,1	663	1	-	-

Nota. Fe: elemento normalizador.

En La Palma, el Zn muestra enriquecimiento atribuible a las emisiones provenientes del desgaste de los neumáticos de los vehículos que circulan por la autopista próxima a la estación, mientras que en Nuevitas se asocia probablemente a las emisiones provenientes de una fábrica de alambre de púas y electrodos.

El Se muestra enriquecimiento en las estaciones de Nuevitas, Pinares de Mayarí y Guantánamo. La literatura informa de que las emisiones de dicho elemento se asocian con la quema de petróleo (Pacyma y Pacyma; 2002). Nuevitas por la quema de petróleo para la generación de electricidad en una termoeléctrica y de otras industrias de la localidad como la fábrica de cemento. Pinares y Guantánamo probablemente reciben la influencia del transporte de los contaminantes producidos en la termoeléctrica de la costa norte de las provincias orientales. Mientras el enriquecimiento del Pb en las aguas de lluvias de Nuevitas probablemente se asocia con una fábrica de pinturas.

5.8 Identificación de las fuentes por análisis de componentes principales para los iones mayoritarios en cada estación de monitoreo

Los iones que mostraron una correlación significativa en el análisis de la matriz de Spearman para cada estación fueron estudiados por análisis de componentes principales (ACP). En Anexo 6 se puede observar la matriz de correlación de Spearman para los iones de cada estación de monitoreo.

Estación La Palma

El cuadro 18 muestra los resultados de la rotación ortogonal del ACP en la estación La Palma. Se obtuvieron tres componentes con una varianza total explicada de 82,31%. El primer componente agrupa Cl^- , Na^+ y K^+ que representan la fuente marina. Varios estudios señalan la presencia de estos iones desde aerosoles marinos en las muestras de precipitaciones (Migliavacca *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2008).

El segundo componente agrupa NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , el cual caracteriza la influencia antropogénica y de los suelos. Los iones SO_4^{2-} y NO_3^- pudieran ser neutralizados por NH_4^+ especialmente durante los procesos que ocurren por debajo de la nube (Seto *et al.*, 2000). Mientras que el Mg^{2+} y Ca^{2+} se originan de fuente natural (suelo), los cuales contribuyen a las reacciones de neutralización que ocurren en las precipitaciones (Migliavacca, *et al.*, 2005).

El tercer componente agrupa al NO_3^- y al CH_3COO^- lo cual sugiere quema de biomasa. Cerón *et al.* (2002) observó elevadas concentraciones de NO_3^- en la Península

de Yucatán durante la ocurrencia de fuegos forestales, pero no de K^+ , tampoco se observaron elevadas concentraciones K^+ en las lluvias del Amazonas, debido al tipo de biomasa y a que se produce menor resuspensión del suelo en este lugar en comparación con otras localidades (Williams *et al.*, 1997). Por otra parte, varios autores señalan que el CH_3COO^- se puede utilizar como un indicador de incendios rurales (Sanhueza *et al.*, 2001; Coelho *et al.*, 2008).

Cuadro 18. Matriz de componentes principales en la estación La Palma

Estación La Palma	Componente		
	1	2	3
Cl^-	0,88	0,20	0,23
NO_3^-	0,14	0,68	0,67
SO_4^{2-}	0,11	0,87	-0,08
CH_3COO^-	0,38	0,06	0,90
Na^+	0,91	0,16	0,24
NH_4^+	0,13	0,79	0,19
K^+	0,83	0,02	0,18
Mg^{2+}	0,54	0,65	0,32
Ca^{2+}	-0,57	0,63	0,17
% de la varianza	34	30	18
Probable contribución	Sal marina	Antropogénico/suelo	Quema de biomasa

Estaciones: Santiago de Las Vegas, Casablanca, Colón, Nuevitas, Palo Seco, Pinares de Mayarí, Universidad de Santiago y Gran Piedra

Los cuadros 19, 20 y 21 muestran las estaciones de la región occidental, central y oriental, respectivamente para las cuales se obtuvieron sólo dos componentes principales.

Cuadro 19. Matriz de componentes principales en las estaciones Santiago de las Vegas, Casablanca y Colón

	Estaciones					
	S. Vegas		Casablanca		Colón	
	1	2	1	2	1	2
Cl^-	0,32	0,82	-0,04	0,95	-0,11	0,95
NO_3^-	0,91	0,24	0,85	0,20	0,95	-0,08
SO_4^{2-}	0,88	0,19	0,95	-0,01	0,80	0,37
Na^+	0,40	0,88	-0,01	0,89	0,26	0,86
NH_4^+	0,88	0,22	0,74	0,32	0,90	-0,01
K^+	0,12	0,84	0,83	0,02	0,84	0,38
Mg^{2+}	0,16	0,91	0,19	0,83	0,87	0,17
Ca^{2+}	0,90	0,29	0,81	-0,25	0,59	0,58
% varianza	44	40	44	32	53	29
Probable contribución	Antropogénico /suelo	Sal marina	Antropogénico /suelo	Sal marina	Antropogénico /suelo	Sal marina

Cuadro 20. Matriz de componentes principales en las estaciones Nuevitas y Palo Seco.

	Estaciones			
	Nuevitas		Palo Seco	
	1	2	1	2
Cl ⁻	0,93	0,30	0,87	0,33
NO ₃ ⁻	0,11	0,95	0,39	0,82
SO ₄ ²⁻	0,62	0,75	0,21	0,93
Na ⁺	0,92	0,27	0,91	0,36
NH ₄ ⁺	0,64	0,73	0,07	0,75
K ⁺	0,60	0,74	0,93	-0,01
Mg ²⁺	0,86	0,36	0,69	0,43
Ca ²⁺	0,66	0,71	0,30	0,79
% varianza	50	42	40	39
Probable contribución	Sal marina	Antropogénico	Sal marina	Antropogénico

Cuadro 21. Matriz de componentes principales en las estaciones Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Universidad de Santiago.

	Estaciones					
	Pinares de Mayarí		Gran Piedra		Universidad de Santiago	
	1	2	1	2	1	2
Cl ⁻	0,46	0,82	0,16	0,84	0,96	0,10
NO ₃ ⁻	0,95	0,23	0,83	-0,42	0,22	0,95
SO ₄ ²⁻	0,95	0,27	0,94	0,19	0,36	0,91
Na ⁺	0,51	0,82	0,08	0,81	0,90	0,36
NH ₄ ⁺	0,93	-0,10	0,79	0,19	0,65	0,68
K ⁺	0,12	0,90	-0,15	0,93	0,80	0,56
Mg ²⁺	-0,07	0,82	0,44	0,80	0,80	0,46
Ca ²⁺	0,79	0,46	0,86	0,19	0,78	0,49
% varianza	47	39	40	39	53	39
Probable contribución	Antropogénico /suelo	Sal marina	Antropogénico /suelo	Sal marina	Sal marina	Antropogénico

En todos los casos una componente agrupa principalmente NO₃⁻ y SO₄²⁻, que representan las fuentes antropogénicas (quema con aire de combustibles fósiles a alta temperatura). La otra componente agrupa Cl⁻ y Na⁺ que representan la influencia marina. Una parte del K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺ se ha asociado en muchos estudios con los aerosoles marinos, mientras otra puede provenir de la corteza terrestre (Migliavacca *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2008). Por otra parte, el Ca²⁺ de fuentes antropogénicas se asocia a las emisiones de fábricas de cemento o actividades de la construcción (López *et al.*, 1997; Huang *et al.*, 2008).

Estaciones Contramaestre y Guantánamo

En el cuadro 22 se observa que en estas estaciones se obtuvo una tercera componente asociada a la quema de biomasa que agrupa CH_3COO^- y K^+ , probablemente relacionada con la quema del follaje de la caña de azúcar para facilitar su corte manual, así como con la quema de los residuos del cultivo al culminar la zafra azucarera. Resultados similares han sido informados en las plantaciones de caña de azúcar en Sao Paulo, Brasil (Coelho *et al.*, 2008) y en otras regiones de Brasil (Allen *et al.*, 2004; Lara *et al.*, 2005).

Cuadro 22. Matriz de componentes principales en la estaciones Contramaestre y Guantánamo

	Estaciones					
	Contramaestre			Guantánamo		
	1	2	3	1	2	3
Cl^-	0,91	0,16	0,14	-0,13	0,90	0,39
NO_3^-	0,02	-0,11	0,91	0,92	-0,09	-0,11
SO_4^{2-}	0,25	0,33	0,86	0,96	-0,05	-0,16
CH_3COO^-	-0,03	0,95	0,14	-0,25	0,16	0,92
Na^+	0,92	0,15	0,01	-0,08	0,95	0,18
NH_4^+	0,05	0,10	0,87	0,82	0,24	-0,14
K^+	0,34	0,88	0,18	0,06	0,38	0,88
Mg^{2+}	0,81	0,20	0,13	0,92	-0,36	0,01
Ca^{2+}	0,36	0,74	-0,08	0,93	-0,18	0,03
% varianza	29	27	27	47	23	21
Probable contribución	Sal marina	Quema biomasa/ suelo	Antropogénico	Antropogénico /suelo	Sal marina	Quema biomasa

En la estación de Contramaestre se observó además que el Ca^{2+} se asoció con CH_3COO^- y K^+ . De forma similar, Coelho *et al.* (2008) observó una correlación significativa entre CH_3COO^- y HCOO^- y Ca^{2+} , que fue atribuida parcialmente a la resuspensión de suelo por el incremento de vehículos pesados en los campos y por los camiones en caminos no pavimentados durante el período de corte de la caña de azúcar en Sao Paulo, Brasil.

5.9 Relación entre las concentraciones mensuales de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- y las condiciones sinópticas que afectaron a Cuba durante el período noviembre 2008 - abril 2010.

El cuadro 23 muestra durante los 2 períodos poco lluviosos el predominio de la situación sinóptica anticiclón continental polar, que se caracteriza por altas polares típicas que dejan sobre el territorio de Cuba bajas temperaturas y vientos de componente norte desde el continente americano. En el período lluvioso predomina el anticiclón del Atlántico Norte, que se caracteriza por vientos húmedos del este. Según Galloway *et al.* (1983) en el mar caribe las masas de aire del oeste que provienen del continente presentan concentraciones de nitrato y sulfato significativamente superiores a las que provienen del este (Atlántico Norte).

Cuadro 23. Tipo de situación sinóptica predominante en las regiones de Cuba durante el período Noviembre 2008-abril 2010

Período	Región Occidental	Región Central	Región Oriental
Poco lluvioso Nov 2008 -Abr 2009	Anticiclón Continental Polar (tipo VIII)	Anticiclón Continental Polar (tipo VIII)	Anticiclón Continental Polar (tipo VIII)
Lluvioso May 2009 -Oct 2009	Anticiclón del Atlántico (tipo I)	Anticiclón del Atlántico (tipo I)	Anticiclón del Atlántico (tipo I)
Poco lluvioso Nov 2009 –Abr 2010	Anticiclón Continental Polar (tipo VIII)	Anticiclón Continental Polar (tipo VIII)	Anticiclón del Atlántico (tipo II)

El cuadro 24 muestra que el Occidente fue afectado por un mayor número de frentes fríos de los tipos 14 (frente frío clásico), 16 (frente casi estacionario) y 17 (frente disipándose). Estos producen lluvias asociadas a nubes que en su trayectoria han recorrido gran parte del noreste de los EE.UU. (Lapinel, 1988). Así, este tipo de situación sinóptica puede estimular el aumento de las concentraciones de las especies químicas de las precipitaciones. Diferentes autores han identificado al territorio de los EE.UU., especialmente la zona industrializada del NE, como causante de procesos de transporte transfronterizo de nitratos y sulfatos hacia el Caribe, fundamentalmente, durante el período poco lluvioso asociado con la llegada de los frentes fríos TSS VII (Jickells *et al.*, 1982; McDowell *et al.*, 1990).

Cuadro 24. Número y tipos de frentes fríos que afectaron a las regiones de Cuba durante los períodos poco lluviosos noviembre 2008 – abril 2009 y noviembre 2009 - abril 2010

Período	Año	Mes	tipos	Región Occidental	Región Central	Región Oriental
Poco lluvioso Nov 2008- Abr 2009	2008	11	14	3	3	3
			16	-	-	-
			17	-	-	-
	2008	12	14	4	4	3
			16	-	-	-
			17	-	-	-
	2009	1	14	3	3	2
			16	-	-	-
			17	2	1	1
	2009	2	14	3	2	2
			16	-	-	-
			17	-	-	-
	2009	3	14	-	-	-
			16	-	-	-
			17	-	-	-
	2009	4	14	2	2	2
			16	-	-	-
			17	-	-	-
Poco lluvioso Nov 2009- Abr 2010	2009	11	14	4	4	3
			16	-	-	-
			17	-	-	-
	2009	12	14	1	1	-
			16	3	2	1
			17	-	-	-
	2010	1	14	4	2	2
			16	1	-	-
			17	1	1	-
	2010	2	14	7	4	3
			16	-	-	-
			17	1	-	-
	2010	3	14	5	4	2
			16	-	-	-
			17	1	-	-
	2010	4	14	-	-	-
			16	-	-	-
			17	-	-	-

Las figuras 21 y 22 muestran que el comportamiento estacional de las concentraciones de los iones NO_3^- y SO_4^{2-} no marino es diferente entre las regiones de Cuba. La región Occidental y Central alcanzan mayores concentraciones durante el período poco lluvioso en comparación con el período lluvioso; en la región Oriental se observó lo contrario.

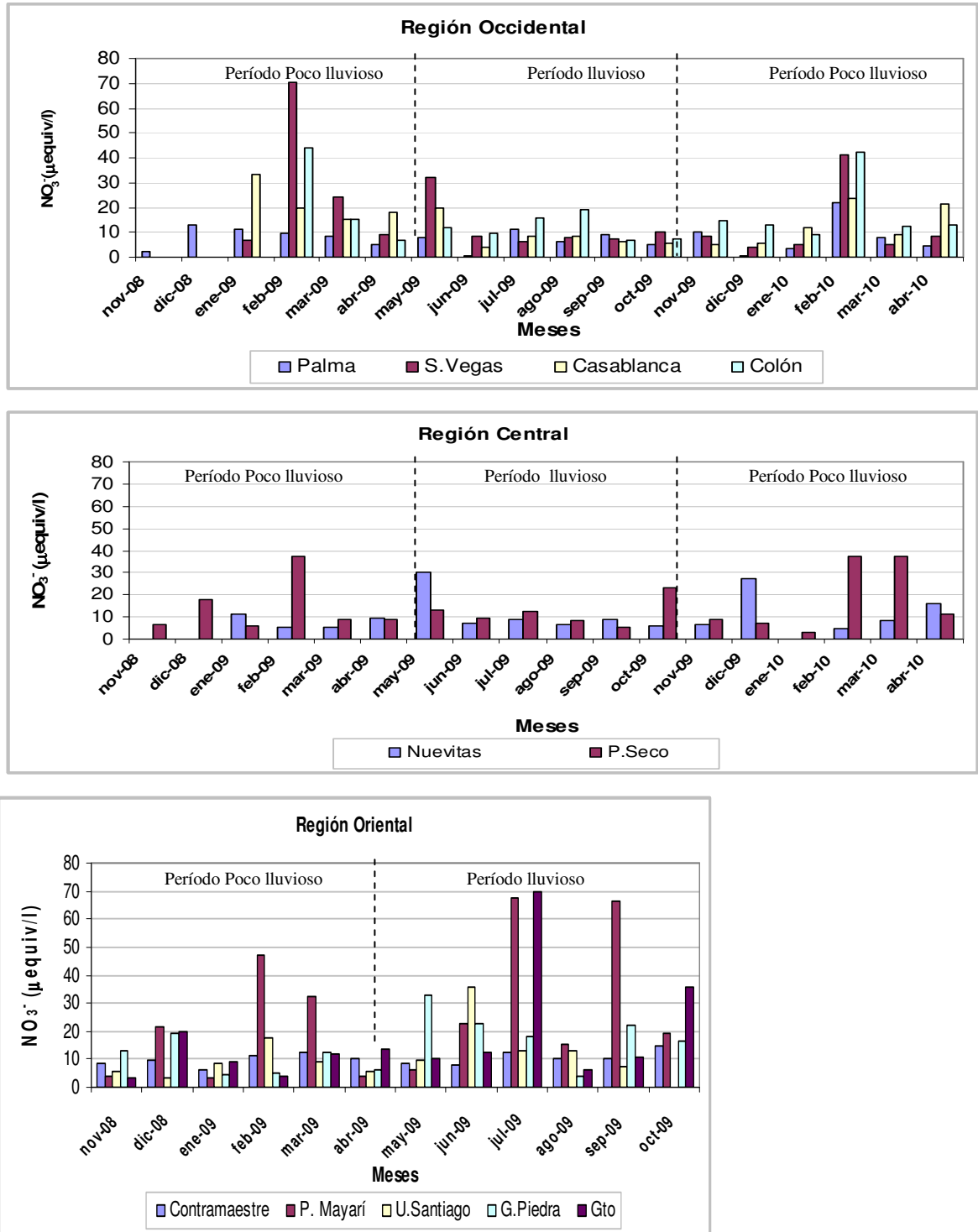


Figura 21. Variación mensual del NO_3^- durante el período Noviembre 2008-abril 2010 en las estaciones de monitoreo de la región Occidental, Central y Oriental.

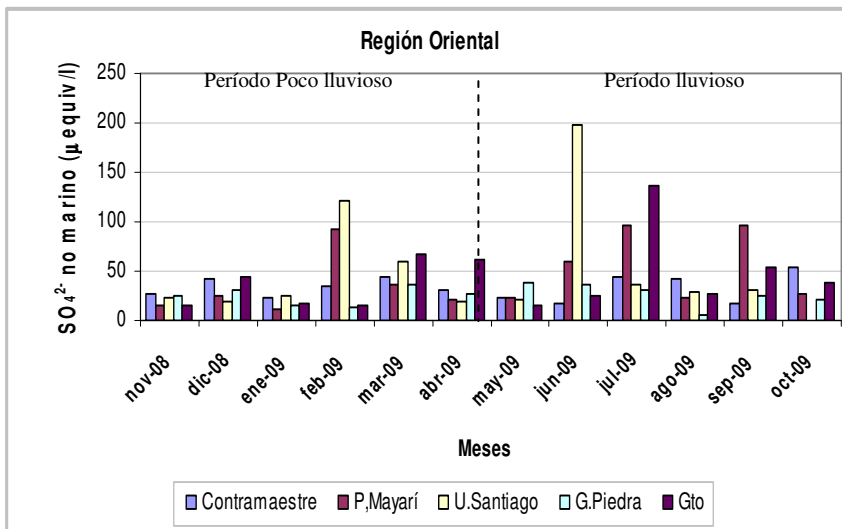
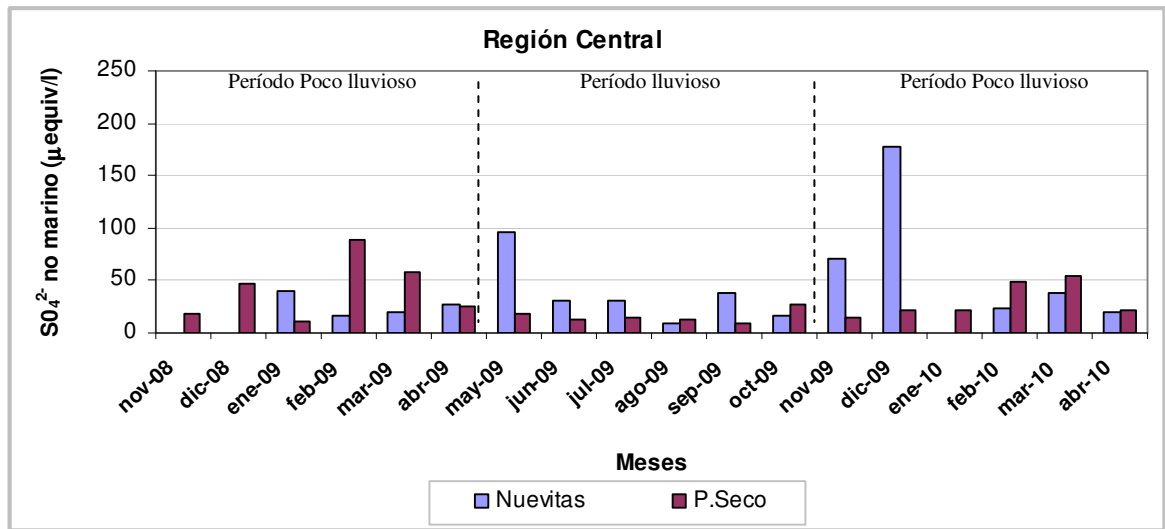
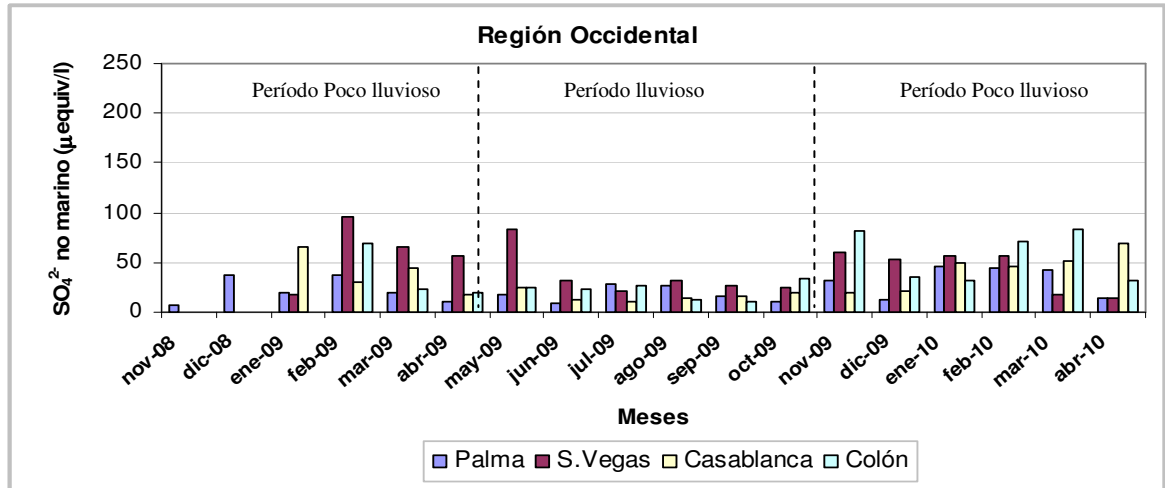


Figura 22. Variación mensual del SO₄²⁻ no marino durante el período Noviembre 2008-abril 2010 en las estaciones de monitoreo de la región Occidental, Central y Oriental.

La variabilidad regional del comportamiento de las concentraciones mensuales de NO_3^- y SO_4^{2-} no marino de Cuba pudiera estar asociada con el tipo de situación sinóptica predominante, debido a que durante el período poco lluvioso, por la presencia del anticiclón continental y los frentes fríos, llegan a Cuba masas de aire que en su trayectoria han recorrido gran parte de los EE.UU. Estas pudieran estar enriquecidas en nitratos y sulfatos afectando primero a la región occidental. Además, en la estación de Casablanca, región occidental, durante el período poco lluvioso 2007 hubo una mayor contribución de masas de aire del TSS VIII asociadas con trayectorias provenientes de fuentes externas a Cuba (Collazo, 2011).

Por otra parte, los frentes fríos pueden transportar hacia el este contaminantes desde sitios urbanos e industriales situados en el oeste de Cuba, que pudieran aumentar las concentraciones de nitratos y sulfatos no marinos en las estaciones de Santiago de las Vegas, Casablanca y Colón situadas en la región occidental (Figura 8).

Sin embargo, en las estaciones de la región Oriental se observan mayores concentraciones durante el período lluvioso posiblemente asociado al predominio de la situación sinóptica del anticiclón del atlántico norte, que se caracteriza por vientos predominantes de componente noreste. Esto probablemente facilita el transporte de nitratos y sulfatos no marinos, hacia las estaciones de monitoreo de las provincias orientales desde el noreste de la región Oriental, donde se encuentra una termoeléctrica y una zona industrial para el procesamiento de níquel.

5.10 Medidas de gestión para mejorar la calidad del aire en Cuba

Los resultados de este trabajo muestran que las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- en las precipitaciones de Cuba se encuentran por encima de los valores de fondo informados para el hemisferio norte tanto en estaciones urbanas como rurales. Ello sugiere el transporte a mesoescala de estas especies desde zonas industrializadas, dando lugar a una redistribución de estos compuestos a lo largo del territorio. Por esta razón, se hace evidente que la única forma de disminuir la contaminación del aire es disminuir las emisiones de los precursores, SO_2 y NO_x .

Las principales fuentes estacionarias de emisiones de compuestos de azufre y nitrógeno a la atmósfera provienen de termoeléctricas, fábricas de cemento y producción de níquel; en las fuentes móviles se debe destacar la obsolescencia de la mayoría del parque disponible y la no aplicación de medidas de control a las emisiones.

En consecuencia, se proponen una serie de medidas, que deben implementarse de forma integrada para llevar a cabo una adecuada gestión de la calidad del aire.

- *Sector industrial*

En este sector una medida prioritaria es el control de las emisiones de las grandes fuentes estacionarias. Para ello se pueden utilizar diferentes técnicas de abatimiento, entre las cuales están las que implementan procedimientos de optimización o reformulación del proceso de combustión o la utilización de dispositivos que actúan sobre la corriente de los gases originados en la combustión.

Entre las técnicas utilizadas para la eliminación de los contaminantes gaseosos, se encuentran las siguientes:

a) Absorción: transferencia de materia de un gas a un líquido

b) Adsorción: transferencia de materia entre un gas y un sólido

c) Combustión (ordinaria o catalítica): cuando los contaminantes son oxidables y se utilizan antorchas, incineradores térmicos, incineradores catalíticos, calderas y calefactores)

d) Reducción catalítica: técnica opuesta a la combustión ya que supone el paso de los contaminantes a formas más reducidas.

La aplicación de técnicas de abatimiento de las emisiones ha sido aplicada con éxito en la mayoría de los países desarrollados y algunos en vías de desarrollados como México, Brasil y Chile lo que ha provocado una reducción sensible de la tendencia al incremento de las emisiones y mejoras en la calidad del aire fundamentalmente en relación con los compuestos de azufre y el material particulado (Butler *et al.*, 2003; Rutherford, 1993).

Otra medida en este sector a corto – mediano plazo será contar con un catastro detallado de las fuentes de emisión de cada localidad.

A mediano plazo establecer las emisiones máximas permisibles de las industrias de procesamiento de níquel y fábricas de cemento, en las cuales se utiliza petróleo crudo nativo. Para las instalaciones generadoras de electricidad se estableció la norma NC 55.2009.

- *Sector transporte*

- Los vehículos pesados de servicio público a diesel (autobuses, camiones de recogida de basura, camiones de limpieza vial o camiones de bomberos) deberán ser sustituidos gradualmente por vehículos de menos de 4 años de

antigüedad a partir de la fecha de fabricación y no por el modelo y deberán contar con convertidores catalíticos.

- Establecer normas de emisión para el parque vehicular de uso público y de uso particular, teniendo en cuenta que la mayor proporción de los automóviles son estadounidenses de antes de 1959 y rusos de antes de 1990. Hasta el momento sólo se cuenta con la norma de emisión para vehículos y maquinarias que se utilizan en actividades agrícolas y de la construcción.
- Fiscalización de la circulación de vehículos de motor con deficiente estado técnico y la inexistencia o el incumplimiento de normas sanitarias adecuadas.
- Implementar la conducción eficiente, esta es una práctica que, aprovechando sólo un cambio de hábitos y sin requerir inversiones en equipamientos, permite reducir el consumo de combustible y aprovechar mejor lo que se consume. En este sentido, la conducción eficiente permite ahorrar de un 10% a un 25% del carburante y reducir considerablemente las emisiones de contaminantes de ciudad. Se capacitará a la población a través de programas en el canal educativo de la televisión cubana.
- A largo plazo desarrollar la administración electrónica, el teletrabajo y el comercio electrónico que aminoren la necesidad de desplazamientos y el desarrollo de una planificación territorial que minimice la necesidad de desplazamientos.

Según Santana y Fernández (2010) en la Región Metropolitana de Santiago, Chile una de las líneas de acción más efectivas para la descontaminación del aire ha sido el control de las emisiones de vehículos a gasolina, principalmente en aquéllos no provistos de convertidor catalítico, pues estas fuentes intervienen en la formación de todos los contaminantes sobre norma, ya sea mediante su emisión directa o la de sus precursores.

- *Sector Residencial*

Desarrollar medidas para reducir el consumo de combustibles por el consumo de energía eléctrica, como por ejemplo: la renovación de electrodomésticos, sustitución de bombillas convencionales por bombillas eficientes, cambio de hábitos de uso y consumo menos contaminantes, como apagar luces y equipos encendidos innecesariamente.

- *Sector energético*

Incrementar la utilización de energías renovables como eólica y solar de manera de contribuir de manera sustantiva a la reducción de las emisiones de sulfatos y nitratos por la quema de combustibles fósiles.

Otras medidas que pueden implementarse en Cuba por el gran desarrollo de la industria azucarera serán:

- El incremento de la cogeneración de electricidad en la industria azucarera a partir del bagazo de la caña.
- El incremento progresivo del uso energético de la paja de caña en la industria azucarera.

- *Calidad del aire*

- Actualización de la NC 39.1999 en materia de las concentraciones máximas admisibles de NO₂ y SO₂ en el aire a valores similares a los recomendados en la guía de la calidad del aire de la OMS (2005).
- Implementar modelos predictivos de la calidad del aire para NO₂ y SO₂.
- Integración de un sistema único de vigilancia de la calidad del aire, que consolide el monitoreo en las ciudades. Este debe contemplar actividades relacionadas con el aseguramiento y control de la calidad de la toma de muestra y análisis de laboratorio.

La Ciudad de México, Santiago de Chile y Sao Paulo cuentan con programas de vigilancia de la calidad del aire e impacto sobre la salud y se encuentran en la fase de implementación de planes viables de control y prevención de la contaminación de la atmósfera (Korc, 2010). Estos pueden servir de guía para otros países de Latinoamérica.

- *Calidad de los combustibles*

No se proponen medidas para mejorar la calidad de los combustibles, porque en Cuba se fomenta la utilización del petróleo crudo nativo (con contenido de azufre entre 5 - 7%) para la generación de energía eléctrica y producción de cemento, por los altos precios del petróleo en el mercado.

- *Inventario de emisiones*

Un aspecto esencial es el de incrementar el conocimiento de las emisiones que corresponden a cada fuente y para esto se propone:

- Incrementar las capacidades humanas y de infraestructura para la preparación del inventario nacional de emisiones de contaminantes y su actualización periódica.
- Detallar las contribuciones por sector, contaminante, combustibles, fuentes fijas, fuentes móviles y fuentes naturales presentes.

- *Financiamiento*

- Desarrollo de las actividades de monitoreo y de modelos predictivos de la calidad del aire a través de los estudio de impacto ambiental que deberán implementar las empresas estatales o las empresas mixtas (con capital extranjero).
- Generar alianzas entre las universidades y los empresarios extranjeros para el desarrollo de proyectos de investigaciones del impacto de sus actividades industriales.

Por otra parte, en este trabajo de tesis se determinaron por primera vez concentraciones de formiato y acetato en las estaciones rurales indicativos de la quema de biomasa en terrenos de cultivo de la caña de azúcar. Esto es difícil de controlar y fiscalizar, por tanto las medidas estarán dirigidas hacia:

- Desarrollar programas de educación de buenas prácticas agrícolas, que difundan la necesidad de enterrar los residuos de la cosecha y la no utilización de prácticas de quema de follaje de la caña de azúcar durante el corte manual, por las consecuencias negativas para los suelos en el largo plazo.
- Establecer en coordinación con las autoridades locales incentivos o sanciones que contribuyan a la implementación de las buenas prácticas agrícolas.

6 Conclusiones

El estudio de las aguas lluvias de Cuba incluyó la cuantificación de cationes, aniones y elementos traza, lo cual permitió informar por primera vez concentraciones de los aniones orgánicos formiato y acetato y de los elementos traza Mn, Fe, Zn, Cu, Ba, Se, Pb, Ni y Co.

El estudio de las potenciales fuentes de las especies encontradas en las lluvias permitió sugerir que sulfato, nitrato, amonio y parte del calcio probablemente provienen de fuentes antropogénicas, potasio, magnesio y parte del calcio de los minerales de la corteza terrestre, y sodio y cloro de los aerosoles marinos.

Los altos niveles de depositación ácida principalmente de sulfatos, en diferentes localidades, que están cercanos a niveles en los cuales han aparecido impactos ambientales adversos en zonas de Norteamérica, sugiere que las emisiones antropogénicas de SO_2 , por el uso de combustible fósil, en especial del petróleo crudo nativo en la generación de electricidad, constituye el principal problema de la calidad del aire de Cuba.

Por otra parte, el origen antrópico de los elementos Zn, Se y Pb muestra la necesidad de introducir procesos de producción ambientalmente racionales por los riesgos de estas especies para la salud humana y los ecosistemas.

A pesar de una posible subestimación de las concentraciones observadas de algunas especies más volátiles como NH_4^+ , HCOO^- y CH_3COO^- fue posible determinar que las especies orgánicas acetato y formiato contribuyeron más a la acidez de la lluvia en las estaciones rurales que en las urbanas. De ahí que evitar la quema de biomasa constituye una de las medidas prioritarias a implementar por los agricultores con la finalidad de prevenir las lluvias ácidas y sus efectos.

En la mayor parte del país las concentraciones de calcio contribuyen a neutralizar la acidez de las precipitaciones, lo cual evita la existencia de lluvias ácidas. La acidez libre de las lluvias sólo es evidente en áreas donde es mayor la influencia de las emisiones de los gases antropogénicos precursores probablemente debido a las fuentes locales y a las menores concentraciones de los compuestos neutralizantes, como ocurre en la región Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Palo Seco.

A nivel país, las fuentes antropogénicas más probables fueron la quema de combustibles fósiles en termoeléctricas, la industria del níquel, las fábricas de cemento

y la quema de biomasa en terrenos cultivados con caña de azúcar. Destaca entonces la prioridad de controlar y fiscalizar de forma eficiente y eficaz estas actividades.

La variación estacional de los nitratos y sulfatos está determinada no sólo por la magnitud y cercanía a las fuentes de emisión, sino también por los factores meteorológicos. Así, la química de las precipitaciones en Cuba es influenciada por el transporte local y regional de contaminantes. Esto destaca la importancia de los procesos de transporte atmosféricos a escalas cortas, medias y largas en la generación de la contaminación ambiental.

La aplicación de técnicas de abatimiento de las emisiones de SO_2 y NO_x (especialmente el primero) es la única vía posible para reducir a mediano y largo plazo la depositación de estos acidificantes en Cuba. El desarrollo programado y en marcha para el sector energético puede contribuir de manera significativa a la reducción de las emisiones de los precursores ácidos en Cuba.

7 Recomendaciones

Los resultados de esta tesis podrían contribuir a fortalecer y mejorar la organización de las actividades de monitoreo del sistema de vigilancia de la calidad del aire en Cuba.

En primer lugar con el fin de disminuir los riesgos de la contaminación atmosférica a la salud humana se propone:

- Establecer el monitoreo de los elementos traza en aquellas localidades del país en que se evidenciaron concentraciones de estas especies, como por ejemplo Nuevitás, Pinares de Mayarí y Guantánamo.
- Instalar nuevas estaciones de monitoreo de la calidad del aire en pueblos que puedan estar recibiendo el efecto directo de actividades antropogénicas por centrales termoeléctricas e industria de níquel como son: Mariel, Holguín, Moa y Nicaro.

Para poder enfrentar el reto de la conservación de los ecosistemas terrestres y marítimos:

- Monitoreo de las principales especies acidificantes de las precipitaciones, esto es sulfato, nitrato, formiato y acetato y de los principales neutralizantes calcio y amonio que permita la cuantificación antes de 30 días, con el fin de conocer la tendencia de estas concentraciones en el país y su fiscalización futura.

Para realizar un estudio en mayor profundidad, en especial en ciertos aspectos y para algunas especies químicas, es preciso desarrollar un monitoreo por evento de lluvia de la siguiente manera:

- Para analizar la variación de las concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} , en función de las condiciones meteorológicas en la estación La Palma, ubicada más hacia el occidente y que no cuenta con fuentes antropogénicas y en la estación de Casablanca para evaluar las contribuciones de las fuentes locales.

- Para poder analizar la contribución del amonio a la neutralización de la acidificación en la estación de Pinares de Mayarí, Gran Piedra y Palo Seco.
- Para analizar el impacto de las emisiones de acetato y formiato por quema de biomasa en las estaciones rurales, principalmente en Guantánamo y Contramaestre.

Los resultados muestran la necesidad e importancia de continuar con los estudios acerca de la composición química de la lluvia en Cuba, especialmente por los eventuales efectos de la depositación de contaminantes sobre los ecosistemas terrestres.

8 Referencias Bibliográficas

- Abdul, Hameed M.; Al Obaidy, J. y Joshi, H. 2006. Chemical composition of rainwater in a tropical urban area of northern India. *Atmospheric Environment* 40: 6886-6891.
- Allen, A.G.; Cardoso, A.A. y da Rocha, G.O. 2004. Influence of sugar cane burning on aerosol soluble ion composition in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment* 38: 5025–5038.
- Anatolaki, C. y Tsitouridou, R. 2009. Relationship between acidity and ionic composition of wet precipitation. A two years study at an urban site, Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research* 92: 100–113.
- Andre, F.; Jonard, M. y Ponette, Q. 2007. Influence of meteorological factors and polluting environment on rain chemistry and wet deposition in a rural area near Chimay, Belgium. *Atmospheric Environment* 41: 1426–1439.
- Astel, A.; Mazerski, J.; Polkowska, Z. y Namiesnik, J. 2004. Application of PCA and time series analysis in studies of precipitation in Tricity (Poland). *Advances in Environmental Research* 8: 337–349.
- Atteia, O., 1994. Major and trace elements in precipitation on western Switzerland. *Atmospheric Environment* 28: 3617–3624.
- Babich, H.; Davis, D.L. y Stotzky, G. (1980). Acid precipitation. Causes and consequences. *Environment* 22: 6-13.
- Báez, A.P.; Belmont, R.D.; García, R.M.; Torres, M.C.B. y Padilla, H.G. 2006. Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research* 80: 67– 85.
- Báez, A., Belmont, R., García, R., Padilla, H. y Torres, M., 2007. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research* 86: 61-75.
- Bravo, H.A.; Saavedra, M.I; Sánchez, P.A; Torres, R.J y Granada, L.M. 2000. Chemical Composition of Precipitation in a Mexican Maya Region. *Atmospheric Environment*. 34 B: 1197-1204.
- Bravo, H.A.; Soto, R.; Sosa, R.; Sánchez, P.A.; Alarcón, J.; Kahl, J. y Ruíz, B. 2006. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environmental Pollution* 144: 655-660.

- Buda, A. y DeWalle, D.R. 2002. Potential effects of changes in precipitation and temperature on wet deposition in central Pennsylvania. *Atmospheric Environment* 36: 3767–3778.
- Butler, T.; Likens, G.; Vermeylen, F. y Stunder, B. 2003. The relation between NO_x emissions and precipitation NO₃ in the eastern USA. *Atmospheric Environment* 37: 2093–2104.
- Campos, V.; Costa, A. y Tavares, T. 2007. Partial neutralization of rain by seaspray: The case of Reconcavo, Bahia—Brazil. *Journal of Environmental Management* 84: 204–212.
- Camuffo, D. 1992. Acid rain and deterioration of monuments: how old is the phenomenon? *Atmospheric Environment* 26B (2): 241-247.
- Casimiro, A.P.; Salgueiro, M.L. y Nunez, V.T. 1991. Seasonal and air mass trajectory: effects on rainwater quality at the southwestern European border. *Atmospheric Environment* 25A (10), 2259–2266.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2007. Energía, Desarrollo Industrial, Contaminación del aire, atmósfera y cambio climático en la región de América Latina y el Caribe: Nuevas Políticas, Lecciones, Mejores prácticas y Oportunidades de Cooperación horizontal. Documento CEPAL para la CDSIS Sesión Regional, 61p.
- Cerón, R.M.B.; Padilla, H.G.; Belmont, R.D. ; Torres, M.C.B.; García, R.M. y Báez, A.P. 2002 Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in the Caribbean shore of the Yucatan Peninsula. *Atmospheric Environment* 36: 2367–2374.
- Chestnut, L.G. y Mills, D.M. 2005. A fresh look at the benefits and costs of the US acid rain program. *Journal of Environmental Management* 77: 252–266.
- Coelho, C.H.; Francisco, J.G.; Nogueira, R.F.P. y Campos, M.L.A.M. 2008. Dissolved organic carbon in rainwater from areas heavily impacted by sugar cane burning. *Atmospheric Environment* 42: 7115–7121.
- Collazo, A. 2011. Análisis de la contaminación transfronteriza y local de contaminantes gaseosos precursores de la deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba. Tesis para optar al grado de Magíster en: Gestión y Planificación Ambiental. Santiago de Chile, 92 pp.

- Dai, Z.; Liu, Y.; Wang, X. y Zhao, D. (1998). Changes in pH, CEC, and exchangeable acidity of some forest soils in southern China during the last 32–35 years. *Water Air Soil Pollution*. 108: 377–390.
- Dayan, U. y Lamb, D. 2003. Meteorological indicators of summer precipitation chemistry in central Pennsylvania. *Atmospheric Environment* 37: 1045–1055.
- Díaz, R.; Díaz, A.; Molina, E. y Suárez, B. 2007. La calidad del aire en Cuba. Informe del Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y microbiología. Ministerio de Salud Pública de Cuba: 12 p.
- Duce, R.A.; Hoffman, G.L. y Zoller, W.H. 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural. *Science* 187: 59–61.
- Fornaro, A. y Gutz, I. 2003. Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil: Part 2 — contribution of formic and acetic acids. *Atmospheric Environment*, 37 (1): 117-123.
- Galloway, J.N., Knap A.H. y Church, T.M. 1983. The composition of western Atlantic precipitation using shipboard collectors, *Journal of Geophysical Research* 88, 10: 859-864.
- Galloway, J.N.; Likens, G.E. y Hawley M.E. 1984. Acid precipitation: natural versus anthropogenic components. *Science* 226: 829-831.
- González, M. y Bergowist, E. 1986. El impacto de emisiones de gases y otros productos desde chimeneas de fundiciones de minerales sobre las actividades agropecuarias. *Ambiente y Desarrollo* II (3): 117-122.
- Hernández, B. 2002. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana. *Investigaciones Marinas* 30 (2): 3-19.
- Herrera, M. y Rodríguez, S. 2009. Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica. Primera parte. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25, (2): 65-72.
- Herrera, M.; Rodríguez, S y Báez, A.P. 2009. Chemical composition of bulk precipitation in the metropolitan area of Costa Rica, Central America. *Atmospheric Research* 94: 151–160.
- Hruška, J., Moldan, F. y Krám, P. 2002. Recovery from acidification in central Europe—observed and predicted changes of soil and streamwater chemistry in the Lysina catchment, Czech Republic. *Environmental Pollution* 120, 2: 261-274.

- Huang, K.; Zhuang, G.; Xu, C., Wang, Y. y Tang, A. 2008. The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China. *Atmospheric Research* 89: 149–160.
- Hou, H.; Takamatsub, T.; Koshikawab, M.K. y Hosomi, M. 2005. Trace metals in bulk precipitation and throughfall in a suburban area of Japan. *Atmospheric Environment* 39: 3583–3595.
- Jickells, T.; Knap, A.; Church, T.; Galloway, J. y Miller, J. 1982. Acid rain on Bermuda. *Nature* 297, 55-57.
- Keene, W. C.; Pszenny, A. A. P.; Galloway, J. N. y Hartley, M. E. 1986. Sea-salt corrections and interpretation of constituents ratios in marine precipitation. *Journal Geophysical. Research* 91: 6647–6658.
- Keith, L.; Annis, C.; Edmunds, C.; Mickelson, S. y Wysalek, M. 2005. Colección and preservation of samples. In Standard method for water and wastewater examination. Ed 21. American Public Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF).
- Korc, M. 2010. calidad del aire y su impacto en la salud en América Latina y el Caribe. Gestión de la calidad del aire. CEPAL serie Seminarios y Conferencias. 14-22.
- Kucera, V. y Fitz, V. 1995. Direct and indirect air pollution effects on materials including cultural monuments. *Water, Air Soil Pollution* 85:153-165.
- Kulshrestha, U.C., Sarkar, A.K.; Srivastava, S.S.; Parashar, D.C. 1995. Wet-only and bulk deposition studies at New Delhi (India). *Water, Air and Soil Pollution* 85: 2137–2142.
- Kulshrestha, U.C.; Jain, M.; Mandal, T.K.; Gupta, P.K.; Sarkar A.K. y Parashar D.C. (1999). Measurements of acid rain over Indian Ocean and surface measurements of atmospheric aerosols at New Delhi during INDOEX Pre-Campaigns. *Current Science* 76: 968-972.
- Kurtz, J. y Scheider, W.A. 1981. An analysis of acidic precipitation in south central ontario using air parcel trajectories. *Atmospheric Environment* (1967), 15 (7): 1111-1116.
- Krusche, A.V.; Camargo, P.B.; Cerri, C.E.; Ballester, M.V.; Cara, L.B.; Victoria, R.L. y Martinelli, L.A.. 2003. Acid rain and nitrogen deposition in a sub-tropical watershed (Piracicaba) ecosystem consequences. *Environmental Pollution* 121: 389-399.

•Lapinel, B. (1988): La Circulación Atmosférica y Las Características Espacio Temporales de las Lluvias en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Candidato a Dr. en Ciencias Geográficas. Camagüey.

•Lara, L.L.; Artaxo, P.; Martinelli, L.A.; Victoria, R.L.; Camargo, P.B.; Krusche, A.; Ayers, G.P.; Ferraz, E.S.B. y Ballester, M.V., 2001. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba river basin, southeast Brazil. *Atmospheric Environment* 35, 4937–4945.

•Lara, L.L.; Artaxo, P.; Martinelli, L.A.; Camargo, P.B.; Victoria, R.L. y Ferraz, E.S.B. 2005. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment* 39: 4627–4637.

•Lee, B.K.; Hong, S.H. y Lee, D.S. 2000. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula. *Atmospheric Environment* 34: 563–575.

•Li, C., Kang, S., Zhang y Q., Kaspari, S., 2007. Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, Central Tibetan Plateau. *Atmospheric Research* 85: 351-360.

•Likens, G. E.; Driscoll, C.T. y Buso, D.C.. 1996. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science* 272:244-246.

•López, C. 2006. Introducción a la gestión de la calidad del aire. Instituto de Meteorología-DESOFT, ISBN 978-959-982-049-4, 703 pp.

•López, C.; González, M.; Collazo; Wallo, A.; Cuesta, O.; Sánchez, P.; Manso, R.; Imbert, C., Morejón, L.E. y Moreno, E. 1997. La deposición ácida atmosférica a nivel regional en Cuba y su contribución al riesgo de los ecosistemas terrestres. Informe de proyecto CITMA, La Habana, 108 pp.

•López, C.; Fernández, P.V.; Manso, R. W.; Valdés, A.; León, A.; Guevara, A.V.; González, C.; García, M.E.; Legañoa, G.; González, M.; Dávalos, J.; López, I.; Pérez, I.; Ricardo, H.; Pire, S.F.; Ameneiros, J.M.; Mercadet, A. y Álvarez, A. 2009. Emisiones y Remociones de Gases de Invernadero en Cuba. Reporte Preliminar para el Año 2004, CITMA/AMA/Instituto de Meteorología. La Habana, 37 pp.

•Loÿe-Pilot, M.D.; Martin, J.M. y Morelli J. 1986. Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input on the Mediterranean. *Nature* 321, 427–428.

•Mason, B. 1966. Principles of Geochemistry. 3ra Ed. J. Wiley and Sons. New York. 346 pp.

- McDowell, W.H.; Sánchez, C.G.; Asbury, C.E. y Ramos, C.R. 1990. Influence of sea SALT aerosols and long range transport on precipitation chemistry at El verde, Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, Part A, 24 (11): 2813-2821.
- Medha, S.; Momin, G.; Rao, P.S.; Safai, P. y Ali, K. 2002. Chemical composition of rainwater around an industrial region in Mumbai. *Current Science* 82 (9): 33-42.
- Menz, F.C. y Seip, H.M. 2004. Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science & Policy* 7: 253-265.
- Mphepya, J. N.; Pienaar, J.J.; Galy-Lacaux, C. ; Held, G. y Turner, C. R. 2004. Precipitation Chemistry in Semi-Arid Areas of Southern Africa: A Case Study of a Rural and an Industrial Site. *Journal of Atmospheric Chemistry* 47: 1–24.
- Migliavacca, D., Teixeira, E.C.; Pires, M. y Fachel, J. 2004. Study of chemical elements in atmospheric precipitation in South Brazil. *Atmospheric Environment* 38 (11): 1641–1656.
- Migliavacca, D.; Teixeira, E.C.; Wiegand, F.; Machado, A.C.M. y Sanchez, J. 2005. Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmospheric Environment* 39: 1829-1844.
- Morales, J.A., Bifano, C. y Escalona, A. (1995). Rainwater chemistry at the western savannah region of the Lake of Maracaibo Basin, Venezuela. *Water, Air Soil Pollution* 85: 2325-2330.
- Navrátil, T.; Kurz, D.; Krám, P.; Hofmeister, J. y Hruška, J. 2007. Acidification and recovery of soil at a heavily impacted forest catchment (Lysina, Czech Republic)—SAFE modeling and field results. *Ecological Modelling* 205, 3-4: 464-474.
- Okuda, T.; Iwase, T.; Ueda, H.; Suda, Y.; Tanaka, S.; Dokiya, Y.; Fushimi, K. y Hosoe, M. 2005. Long-term trend of chemical constituents in precipitation in Tokyo metropolitan area, Japan, from 1990 to 2002. *Science of the Total Environment* 339: 127– 141.
- Özsoy, T. y Örnektekin, S. 2009. Trace elements in urban and suburban rainfall, Mersin, Northeastern Mediterranean. *Atmospheric Research* 94: 203-219.
- Peña, R.; García, S.; Herrero, C.; Losada, M.; Vázquez, A. y Lucas, T. 2002. Organic acids and aldehydes in rainwater in a northwest region of Spain. *Atmospheric Environment* 36: 5277–5288.

- Pacyma, J.M. y Pacyma, E.G. 2001. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environment Research* 9: 269-298.
- Poissant, L.; Schmit, J.P. y Beron, P.,1994. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmospheric Environment* 28: 339–346.
- Reins, G.P.; Posch, M. y Leemans, R. 2009. Modelling recovery from soil acidification in European forests under climate change. *Science of The Total Environment* 407, 21: 5663-5673.
- Reyes-Rodríguez, G.J.; Gioda, A.; Mayol-Bracero, O.L. y Collett, J.Jr. 2009. Organic carbon, total nitrogen, and water-soluble ions in clouds from a tropical montane cloud forest in Puerto Rico. *Atmospheric Environment* 43: 4171–4177.
- Rodríguez, A. (1991): Composición química de las precipitaciones de sistemas meteorológicos y acidez de la lluvia en Cuba. Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas. La Habana, 111 pp.
- Rutherford, W. 1993. Tecnologías de abatimiento. En Contaminación atmosférica de Santiago. Estado actual y soluciones. Sandoval, H. Préndez, M y Ulriksen, U (Editores). Universidad de Chile, Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana y Banco Santander. Santiago de Chile: 377-410 pp.
- Santana, C y Fernández, M. 2010. Calidad del aire en Santiago, su evolución y algunos lineamientos para su control. Gestión de la calidad. CEPAL, serie Seminarios y Conferencias: 23-31.
- Sánchez, L.; Morales, J.; Velásquez, H.; Portillo, D.; Cano, Y.; Montilla, B.; Iriarte, N. y Mesa, J. 2009. Composición iónica y niveles de acidez de las lluvias en Maracaibo, Venezuela, entre 1989 y 2001. *Revista Internacional de contaminación ambiental* 25 (3): 169-179.
- Sandoval, H.; Préndez, M. y Ulriksen, P. 1993. (Eds). Contaminación Atmosférica de Santiago: Estado Actual y Soluciones. Santiago, Universidad de Chile, Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana y Banco Santander. Santiago de Chile: 429 p.
- Sakihama, H.; Ishiki, M. y Tokuyama, A. 2008. Chemical characteristics of precipitation in Okinawa Island, Japan. *Atmospheric Environment* 42: 2320–2335.

- Sanhueza, E.; Figueroa L. y Hermoso, M. 1996. Atmospheric formic acetic acids in Venezuela. *Atmospheric Environment*, 30 (10-11): 1861-1873.
- Sanhueza, E.; Holzinger, R.; Donoso, L.; Santana, M.; Fernández, E. y Romero, J. 2001. Compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Gran Sabana I: Concentraciones y química atmosférica. *Interciencia* 26: 597-605.
- Sanhueza, E.; Alfonso, Y. y Santana, M. (2003). Compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Gran Sabana. II: HCHO, HCOOH y CH₃COOH en llluvias. *Interciencia* 28: 29-35.
- Sanhueza, E.; Fernández, E.; Donoso, L.; Garabato, MA. y Alfonso, Y. 2005a. Química atmosférica en La Gran Sabana I: Composición y fotoquímica de gases inorgánicos y orgánicos. *Interciencia* 30: 602-610.
- Sanhueza, E.; Santana, M.; Donoso, L. y Pacheco, M. 2005b. Química atmosférica en la Gran Sabana III. Composición iónica y características ácido-básicas de las llluvias. *Interciencia* 30: 618-622.
- Sant'Anna-Santos, B.; Campos da Silva, L.; Azevedo, A.; Araújo, J.; Figueiredo, E.; Monteiro da Silva, E. y Aguiar, R. 2006. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species. *Environmental and Experimental Botany* 58: 158–168.
- Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. 2006. Wet deposition in Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change: from air pollution to climate change. Editorial John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, Segunda edición, 932-979p.
- Seto, S.; Oohara, M. y Ikeda, Y. 2000. Analysis of precipitation chemistry at a rural site in Hiroshima Prefecture, Japan. *Atmospheric Environment* 34: 621–628.
- Schuurkers, J.; Maenen, M. y Roelofs, J. 1988. Chemical characteristics of precipitation in NH₃ affected areas. *Atmospheric Environment* 22: 1689-1698.
- Schwella, D. 2002. Manejo de calidad del aire. División 44, Medio ambiente e Infraestructura. Proyecto de sector "Transport Policy Advice". Editorial Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Alemania, 58 p.
- Takeda, K.; Marumoto, K.; Minamikawa, T.; Sakugawa, H. y Fujiwara, K. 2000. Three-year determination of trace metals and the lead isotope ratio in rain and snow depositions collected in Higashi-Hiroshima, Japan. *Atmospheric Environment* 34: 4525–4535.

- Tang, A.; Zhuanga, G.; Wanga, Y.; Yuana, H. y Suna, Y. 2005. The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment* 39: 3397–3406.
- Tiwari, S.; Kulshresthab, U. y Padmanabhamurtyc, B. 2007. Monsoon rain chemistry and source apportionment using receptor modeling in and around National Capital Region (NCR) of Delphi, India. *Atmospheric Environment*, 41 (27): 5595 – 5604.
- Vogt, R.; Guo, J.; Luo, J.; Peng, X.; Xiang, R.; Xiao, J.; Zhang, X.; Zhao, D. y Zhao, Y. 2007. Water chemistry in forested acid sensitive sites in sub-tropical Asia receiving acid rain and alkaline dust. *Applied Geochemistry* 22: 1140–1148.
- Wang, Y.; Solberg, S.; Yu, P.; Myking, T.; Vogt, R. y Du, S. 2007. Assessments of tree crown condition of two Masson Pine forest in the acid rain region in south China. *Forest Ecology and Management* 242: 530-540.
- Williams, M.R.; Fisher, T.R. y Melack, J.M. 1997. Chemical composition and deposition of rain in the central Amazon, Brazil. *Atmospheric Environment* 31: 207–217.
- WHO, 2005. Guías de calidad del aire de la OMS. Actualización mundial 2005. [en línea]. Calidad del aire y salud. Nota descriptiva 313
< www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html> [consulta 20 febrero 2011]
- World Meteorological Organization. 1988. International Operations Handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution, WMO-No. 491, 110 p.
- World Meteorological Organization. 2004. Manual for the GAW precipitation chemistry programme guidelines, data quality objectives and standard operating procedures, 182 p.
- Zang, Y y Hopke, P.K. 1989. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canadá. *Atmospheric environment* 23 , 7:1499-1509.
- Zhang ,G.; Zhang, J. y Liu, S. 2007. Chemical composition of atmospheric wet depositions from the Yellow Sea and East China Sea. *Atmospheric Research* 85: 84–97.
- Zhu, J. y Liu, Z. 2003. Long-range persistence of acid deposition. *Atmospheric environment*. 37: 2605-2613.

ANEXOS

Anexo 1. Índice de calidad ambiental de la norma cubana 111.2004

Cuadro 1. Relación entre el Índice de calidad del aire y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad

Índice	Categoría	Comentarios
0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la Cma prescrito en la NC. 39. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
80 - 99	Aceptable	No supera el 99 % de la Cma. Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones.
100 - 199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la Cma prescrito en la NC 39. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
200 - 299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 – 300 %) el valor de la Cma. Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una SITUACIÓN DE ATENCIÓN.
300 - 499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la Cma. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una SITUACIÓN DE ALERTA.
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la Cma, dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales. Da lugar a una SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL.

Fuente: NC 111.2004

Anexo 2. Inventario de emisiones de Cuba durante el período 1990-2004.

Cuadro 1. Emisiones para gases contaminantes (Gg) en Cuba para año pares del período 1990-2004

Año	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	COVDM	SO ₂
1990	33899,59	348,51	20,71	139,71	1141,98	195,69	477,49
1992	21598,81	348,46	14,03	92,57	972,83	143,75	349,14
1994	22193,47	342,59	10,33	84,95	645,62	88,47	401,9
1996	26382,13	352,06	11,47	103,63	662,09	108,27	444,3
1998	27973,77	354,77	11,64	97	545,99	98,02	462,72
2000	26586,22	365,81	11,06	96,81	594,92	432,46	513,64
2002	24892,94	398,34	9,82	83,82	484,5	283,52	622,51

Nota: No se consideran las emisiones y remociones de estos gases procedentes del cambio del uso de tierra y la silvicultura. Fuente: López *et al.*, 2009

Cuadro 2. Emisiones anuales para gases contaminantes (Gg) por sectores en Cuba, 1990-2004

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	COVDM	SO ₂
1990							
Energía	31699,41	31,74	1,2	129,12	1047,29	42,81	469,76
Procesos Industriales	2200,18	0	3,32	8,01	3,82	137,17	7,73
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	15,71	NA
Agricultura	NA	198,23	15,73	2,58	90,87	0	NA
Desperdicios	NE	118,54	0,46	NE	NE	NE	NE
1992							
Energía	20755,31	38,07	1,01	90,19	897,31	33,37	343,43
Procesos Industriales	843,49	0	0,11	0,27	1,34	99,2	5,71
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	11,18	NA
Agricultura	NA	200,34	12,53	2,11	74,18	NA	NA
Desperdicios	NE	110,05	0,39	NE	NE	NE	NE
1994							
Energía	21352,04	45,16	0,75	83,42	607,03	21,35	397
Procesos Industriales	841,43	0	0,19	0,47	1,41	57,28	4,91
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	9,84	NA
Agricultura	NA	196,05	9,02	1,06	37,17	NA	NA
Desperdicios	NE	101,37	0,37	NE	NE	NE	NE
1996							
Energía	25324,11	51,19	0,76	100,98	608,85	24,75	437,74
Procesos Industriales	1058,02	0	0,49	1,19	2,07	72,35	6,57
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	11,17	NA
Agricultura	NA	199,5	9,84	1,45	51,17	NA	NA
Desperdicios	NE	93,61	0,38	NE	NE	NE	NE
1998							
Energía	26722,25	55,66	0,67	95,84	511,65	21,43	455,18
Procesos Industriales	1251,52	0	0,1	0,26	2,57	63,45	7,54
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	13,14	NA
Agricultura		206,01	10,47	0,9	31,78	NA	NA
Desperdicios	NE	93,11	0,41	NE	NE	NE	NE
2000							
Energía	25342,12	78,24	0,71	95,35	554,99	23,2	506,02
Procesos Industriales	1241,53	0	0,15	0,38	2,96	390,91	7,61
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	18,27	NA
Agricultura	NA	195,48	9,72	1,05	36,95	NA	NA
Desperdicios	2,56	92,09	0,48	0,03	0,02	0,08	0,01
2002							
Energía	23570,9	112,22	0,6	82,75	451,56	18,9	614,47
Procesos Industriales	1318,51	0	0,06	0,16	2,38	246,65	8,02
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	17,85	NA
Agricultura	NA	190,16	8,58	0,87	30,53	NA	NA
Desperdicios	3,53	95,97	0,56	0,04	0,03	0,12	0,02
	23570,9	112,22	0,6	82,75	451,56	18,9	614,47
2004							
Energía	23058,64	114,27	0,67	83,65	569,19	41,7	657,6
Procesos Industriales	1184,12	0	0,06	0,19	1,94	57,15	8,19
Uso de Solventes	NA	NA	NE	NA	NA	16,98	NA
Agricultura	NA	199,15	8,69	0,64	22,49	NA	NA
Desperdicios	NE	114,26	0,92	NE	NE	NE	NE

Nota: No se consideran las emisiones y remociones de estos gases procedentes del cambio del uso de tierra y la silvicultura. NA- No aplicable

NE- no estimado por falta de datos de actividad.

Fuente: López *et al.*, 2009

Anexo 3. Resumen del análisis estadístico descriptivo de la concentración de los iones y elementos en las 11 estaciones de monitoreo de vigilancia de la contaminación de la atmósfera de Cuba.

Cuadro 1. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación La Palma.

Estación La Palma	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	17,76	12,53	25,10	20,34	6	16,28	11,73	25,10	16,06	6	21,86	14,92	34,79	23,40	18	18,39	11,73	34,79	19,63
H ⁺	6	1,08	0,13	1,78	0,64	6	0,88	0,05	2,88	0,42	6	1,72	0,98	3,16	1,69	18	1,19	0,05	3,16	0,85
pH	6	5,97	5,75	6,86	6,19	6	6,06	5,54	6,89	6,37	6	5,77	5,50	6,01	5,77	18	5,93	5,50	6,89	6,07
F ⁻	2	7,47	7,41	7,52	7,44	2	9,14	7,75	10,53	10,53	1	7,41	7,41	7,41	7,41	5	8,12	7,41	10,53	8,03
Cl ⁻	6	57,19	12,93	101,01	48,17	6	51,16	30,62	72,88	51,32	6	80,27	46,01	158,69	90,31	18	62,87	12,93	158,68	60,76
NO ₂ ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
NO ₃ ⁻	6	8,26	2,25	12,90	10,75	6	7,94	0,50	12,90	6,79	6	8,15	0,52	21,97	9,90	18	7,69	0,50	21,97	9,09
SO ₄ ²⁻	6	28,27	17,98	41,59	36,62	6	26,51	13,73	41,59	26,00	6	39,59	20,76	53,21	40,28	18	30,46	13,73	53,21	33,78
SO ₄ ²⁻ (n.s.)	6	21,55	6,31	37,88	31,51	6	18,0	9,51	27,66	20,80	6	32,14	12,61	45,64	32,30	18	23,928	6,310	45,637	27,86
CH ₃ COO ⁻	6	4,31	3,56	6,58	4,09	6	4,68	3,41	7,63	4,38	6	3,99	0,68	8,50	4,58	18	4,33	0,68	8,50	4,33
HCOO ⁻	3	12,28	4,57	20,00	13,87	1	9,20	9,20	9,20	9,20	1	15,01	15,01	15,01	15,01	5	3,39	4,57	20,00	11,44
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	56,13	23,88	107,20	42,69	6	45,44	27,37	79,69	43,48	6	62,25	41,05	88,92	66,66	18	54,61	23,88	107,21	49,49
NH ₄ ⁺	6	9,38	1,65	37,28	20,51	6	2,62	1,66	3,38	2,71	6	7,40	2,25	21,39	9,19	18	6,46	1,65	37,28	11,01
K ⁺	6	2,04	0,78	3,63	1,72	6	1,42	0,98	2,38	1,49	6	2,04	0,75	2,93	2,25	18	1,83	0,75	3,63	1,78
Mg ²⁺	6	11,94	5,67	22,14	15,59	6	4,83	2,53	7,60	4,17	6	17,78	7,50	43,05	20,80	18	11,52	2,54	43,04	12,89
Ca ²⁺	6	39,94	15,05	74,10	60,05	6	47,17	19,62	65,48	55,56	6	40,85	30,00	48,95	42,01	18	42,65	15,05	74,10	53,52
Zn	3	155,48	47,02	375,30	167,31	5	145,06	367,20	176,90	189,90	-	-	-	-	-	8	148,97	47,02	375,30	186,10
Cu	3	15,96	10,12	22,35	16,49	5	26,93	7,41	35,24	26,36	-	-	-	-	-	8	22,82	7,41	35,24	24,70
Mn	3	11,45	9,80	13,85	11,55	5	10,64	8,01	12,60	11,09	-	-	-	-	-	8	10,94	8,01	13,85	11,17
Ba	3	37,60	36,89	38,90	37,67	5	41,37	35,00	60,12	40,04	-	-	-	-	-	8	39,96	35,00	60,12	39,64
Fe	3	20,68	19,04	21,12	20,81	5	17,64	15,56	20,16	17,26	-	-	-	-	-	8	18,78	15,56	21,12	17,26

N: Número de muestras. Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 2. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y concentración promedio ponderada por volumen de cada ión estudiado ($\mu\text{eq}/\text{l}$) para las muestras de precipitación colectadas en la estación Santiago de las Vegas.

Estación S.Vegas	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	4	27,49	14,48	49,48	25,85	6	16,81	12,50	23,13	16,06	6	16,81	12,50	23,13	16,06	16	20,64	10,00	49,48	19,9
H ⁺	4	1,28	0,24	2,29	1,26	6	1,95	0,58	3,80	1,53	6	1,95	0,58	3,80	1,53	16	1,26	0,23	3,80	0,85
pH	4	5,89	5,54	6,61	5,90	6	5,71	5,42	6,24	5,81	6	5,71	5,42	6,26	5,81	16	5,90	5,42	6,63	6,07
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	1	7,94	7,94	7,94	7,94	0	<LD	<LD	<LD	<LD	1	7,94	7,94	7,94	7,94
Cl ⁻	4	72,48	53,50	93,28	71,25	6	73,12	43,21	102,27	77,52	6	44,85	29,83	80,10	54,08	16	62,36	29,83	102,27	70,73
NO ₂ ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
NO ₃ ⁻	4	27,57	6,71	70,18	26,89	6	11,99	6,35	32,29	11,32	6	12,00	3,71	41,04	8,87	16	15,89	3,71	70,18	12,49
SO ₄ ²⁻	4	65,15	22,28	103,69	56,94	6	43,65	24,71	97,29	43,55	6	47,86	19,12	64,84	35,99	16	50,61	19,12	103,69	43,15
SO ₄ ²⁻ (n.s.)	4	59,44	18,27	95,68	51,46	6	36,66	21,37	83,18	36,19	6	43,25	14,97	59,72	31,05	16	44,83	14,97	95,68	36,64
CH ₃ COO ⁻	4	5,70	3,29	8,45	5,08	6	5,29	2,99	8,23	5,45	6	4,42	3,03	5,48	4,89	16	5,07	2,99	8,45	5,26
HCOO ⁻	2	9,44	7,60	11,29	7,84	3	7,89	7,13	9,36	7,73	3	12,09	9,35	14,91	13,02	4	9,855	7,135	14,909	9,00
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	4	47,79	33,50	66,92	45,83	6	57,91	18,50	117,90	61,26	6	38,48	19,77	52,06	41,24	16	48,09	18,50	117,90	54,29
NH ₄ ⁺	4	21,99	1,83	60,14	16,41	6	10,66	2,16	29,97	10,97	6	9,37	1,93	22,77	9,81	16	13,01	1,83	60,14	11,25
K ⁺	4	3,05	1,71	4,25	2,80	6	7,09	1,24	15,97	7,36	6	4,43	0,30	8,17	4,71	16	5,08	0,30	15,97	6,15
Mg ²⁺	4	21,91	13,04	36,14	22,67	6	31,39	3,66	55,05	35,94	6	13,11	6,77	17,45	12,95	16	22,17	3,66	55,05	28,46
Ca ²⁺	4	113,26	103,28	22,67	111,21	6	78,97	40,24	184,79	78,69	6	66,02	52,07	84,65	63,90	16	82,69	40,245	192,39	78,64

N: Número de muestras.

LD: límite de detección

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

Cuadro 3. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y concentración promedio ponderada por volumen de cada ión estudiado ($\mu\text{eq}/\text{l}$) para las muestras de precipitación colectadas en la estación Casablanca.

Estación Casablanca	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	4	15,53	10,00	22,87	14,76	6	12,41	7,62	15,92	14,17	6	15,82	8,76	24,76	15,25	16	14,47	7,62	24,76	13,75
H ⁺	4	1,42	0,32	4,37	1,08	6	1,00	0,44	2,75	0,65	6	1,58	0,33	4,47	1,17	16	1,32	0,32	4,47	0,95
pH	4	5,85	5,37	6,49	5,97	6	5,99	5,56	6,35	6,19	6	5,80	5,35	6,48	5,93	16	5,88	5,35	6,49	6,02
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	4	41,25	29,13	67,79	47,71	6	59,13	31,64	84,34	64,20	6	44,0	26,96	65,29	40,89	16	48,99	26,96	84,34	51,10
NO ₂ ⁻	2	1,82	1,50	2,14	1,75	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	1,82	1,50	2,14	1,75
NO ₃ ⁻	4	21,58	15,29	33,34	19,22	6	8,70	3,67	19,50	13,98	6	12,76	4,94	23,53	11,53	16	13,44	3,67	33,35	13,19
SO ₄ ²⁻	4	42,08	20,38	68,24	39,32	6	20,85	14,34	30,19	25,38	6	45,37	20,40	76,41	44,58	16	35,35	14,34	76,41	36,20
SO ₄ ²⁻ (n,s.)	4	39,49	18,31	66,15	36,43	6	16,17	9,90	25,09	20,42	6	42,78	19,35	69,38	41,98	16	31,98	9,90	69,38	32,60
CH ₃ COO ⁻	4	2,73	1,75	3,75	2,80	6	3,50	1,70	5,83	4,68	6	3,60	1,73	5,16	3,45	16	3,35	1,70	5,83	3,90
HCOO ⁻	2	9,44	7,60	11,29	9,85	3	6,41	2,74	9,36	8,32	3	9,87	2,69	14,91	8,26	8	8,47	2,68	14,91	5,18
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	4	21,71	17,32	31,82	24,12	6	39,12	9,60	56,65	41,44	6	21,58	8,73	58,73	21,72	16	28,19	8,73	58,73	30,07
NH ₄ ⁺	4	20,41	17,63	22,41	20,23	6	6,68	2,79	17,07	12,10	6	17,30	2,03	45,09	16,75	16	14,10	2,03	45,09	15,12
K ⁺	4	4,75	2,44	6,51	5,11	6	1,21	0,79	2,00	1,43	6	2,97	0,88	5,95	3,07	16	2,75	0,79	6,51	2,56
Mg ²⁺	4	10,77	8,82	13,35	11,08	6	10,19	5,66	15,09	11,18	6	8,04	3,35	10,81	7,17	16	9,52	3,35	15,10	9,16
Ca ²⁺	4	70,75	30,66	130,12	62,37	6	45,86	32,93	67,54	47,12	6	78,24	58,72	96,52	78,68	16	64,22	30,66	30,66	30,66

N: Número de muestras.

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 4. Resultados de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y concentración promedio ponderada por volumen de cada ión estudiado ($\mu\text{eq}/\text{l}$) para las muestras de precipitación colectadas en la estación Colón.

Estación Colón	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	3	25,22	10,02	47,23	27,30	6	19,27	8,48	31,79	16,85	6	23,68	12,33	41,62	21,53	15	22,07	8,48	47,23	18,22
H ⁺	3	0,93	0,18	1,58	0,86	6	0,64	0,15	1,41	0,73	6	6,24	5,40	6,81	1,05	15	0,99	0,15	3,98	0,83
pH	3	6,03	5,74	5,80	6,07	6	6,19	5,85	6,82	6,14	6	5,20	5,17	5,27	5,98	15	6,01	5,40	6,82	6,08
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	1	7,83	7,83	7,83	7,83	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	3	47,50	36,94	67,34	46,36	6	83,17	31,23	137,03	71,78	6	98,84	28,23	266,39	79,61	15	82,31	28,23	266,39	72,60
NO ₂ ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
NO ₃ ⁻	3	22,11	6,81	44,18	24,20	6	11,75	9,10	42,39	13,92	6	17,47	12,35	12,75	42,39	15	16,11	6,68	44,18	12,02
SO ₄ ²⁻	3	43,05	23,08	75,10	46,11	6	62,10	33,92	89,83	53,44	6	62,10	33,92	89,83	53,44	15	44,30	12,95	89,83	33,29
SO ₄ ²⁻ (n,s.)	3	37,00	19,57	68,74	40,07	6	22,26	22,26	34,45	20,54	6	55,65	31,16	84,13	47,39	15	38,56	10,70	84,13	28,47
CH ₃ COO ⁻	3	4,61	2,96	6,42	4,62	6	4,33	2,21	9,48	4,72	6	4,33	2,21	9,48	4,72	15	4,22	2,21	9,48	3,89
HCOO ⁻	3	3,97	3,97	3,97	3,97	3	4,78	3,97	5,89	4,45	3	5,09	3,18	8,86	4,29	4	4,80	3,18	8,86	4,42
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	3	50,57	29,38	69,19	50,51	6	40,60	10,50	78,90	37,31	6	53,90	23,09	93,11	50,58	15	47,91	10,50	93,11	40,28
NH ₄ ⁺	3	40,29	3,33	77,43	43,63	6	40,22	28,01	74,40	37,94	6	36,58	29,33	39,82	33,88	15	38,78	3,33	77,43	37,99
K ⁺	3	19,43	5,76	41,34	21,53	6	13,93	5,90	32,29	11,98	6	17,22	3,09	42,14	12,94	15	16,35	3,09	42,14	12,57
Mg ²⁺	3	12,36	8,76	15,46	12,63	6	18,45	6,88	50,56	16,88	6	30,35	12,42	64,99	27,90	15	21,99	6,88	64,99	19,52
Ca ²⁺	3	51,12	42,88	65,34	52,49	6	35,05	21,41	47,21	29,73	6	62,99	48,23	111,23	56,43	15	49,44	21,41	111,23	37,37

N: Número de muestras.

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 5. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Nuevitas.

Estación Nuevitas	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	4	35,52	18,36	75,24	32,82	6	27,93	15,45	61,34	26,69	6	44,06	14,90	83,40	40,75	15	35,33	14,90	83,40	29,94
H ⁺	4	0,24	0,15	0,40	0,20	6	0,34	0,13	0,79	0,35	6	0,44	0,11	0,63	0,46	15	0,34	0,11	0,79	0,36
pH	4	6,62	6,40	6,82	6,70	6	6,46	6,10	6,88	6,46	6	6,35	6,20	6,95	6,34	15	6,47	6,10	6,95	6,44
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	7,88	7,88	7,88	7,88	1	7,31	7,31	7,31	7,31	3	7,59	7,31	7,88	7,69
Cl ⁻	4	241,20	100,65	555,46	222,32	6	145,40	80,97	336,49	139,27	6	204,17	60,10	551,66	233,99	15	204,15	60,10	555,46	169,57
NO ₂ ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	11,63	2,36	20,90	6,67	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	11,63	2,36	20,90	6,67
NO ₃ ⁻	4	7,92	5,31	11,21	8,32	6	11,23	6,01	30,19	11,09	6	12,69	5,0	27,46	10,65	15	10,84	5,00	30,19	10,75
SO ₄ ²⁻	4	42,38	21,55	84,00	40,80	6	46,03	14,08	116,30	44,73	6	82,52	27,48	207,07	71,16	15	57,22	14,08	207,07	50,90
SO ₄ ²⁻ (n.s.)	4	25,72	16,17	40,33	26,13	6	36,92	8,80	96,53	36,01	6	65,62	19,15	177,88	177,88	15	65,62	19,15	177,88	55,36
CH ₃ COO ⁻	4	5,34	4,53	5,95	5,29	6	5,19	2,21	12,70	4,01	6	4,62	2,98	8,23	4,12	15	5,04	2,21	12,70	4,15
HCOO ⁻	2	9,25	7,13	11,37	10,27	2	0,72	0,69	0,74	0,73	2	4,04	3,93	4,15	4,02	6	4,67	0,69	11,37	2,51
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	4	139,24	44,98	364,98	122,63	6	76,11	44,13	165,18	72,87	6	141,26	33,62	287,07	132,03	15	114,66	33,62	364,98	91,61
NH ₄ ⁺	4	11,49	8,82	15,64	11,26	6	10,35	3,52	22,88	10,78	6	18,03	6,10	25,85	20,29	15	13,22	3,52	25,85	13,16
K ⁺	4	9,60	5,65	19,82	8,59	6	9,77	5,34	19,99	10,02	6	17,34	3,02	38,02	14,37	15	12,25	3,02	38,02	10,97
Mg ²⁺	4	47,70	26,71	92,89	45,54	6	26,15	17,01	50,19	25,91	6	96,72	14,81	215,18	89,34	15	55,42	14,81	215,18	43,17
Ca ²⁺	4	106,05	72,40	198,67	96,58	6	121,52	68,44	303,39	120,62	6	148,37	54,47	308,63	135,17	15	126,34	54,47	308,63	122,18
Zn	2	44,98	27,76	62,19	53,24	6	231,06	42,97	611,30	255,49	-	-	-	-	-	8	184,54	27,76	611,30	240,85
Cu	2	57,27	56,00	60,89	58,45	6	31,02	10,97	59,82	27,91	-	-	-	-	-	8	32,92	10,97	60,89	35,54
Mn	2	4,28	3,45	5,12	4,68	2	3,53	3,31	3,75	3,41	-	-	-	-	-	4	3,91	3,31	5,12	3,73
Ba	2	57,39	25,78	89,00	72,57	6	70,35	20,45	140,60	73,70	-	-	-	-	-	8	67,11	20,45	140,60	73,62
Fe	2	22,78	21,67	23,89	22,25	6	27,32	15,28	39,30	26,46	-	-	-	-	-	8	26,18	15,28	39,30	26,16
Se	2	31,05	28,67	31,89	30,28	3	22,29	17,67	26,58	22,34	-	-	-	-	-	5	23,36	17,67	31,89	25,52
Ni	2	19,60	16,20	23,00	17,97	1	15,14	15,14	15,14	15,14	-	-	-	-	-	8	18,11	15,14	23,00	16,01
Pb	1	17,00	17,00	17,00	17,00	1	16,76	16,76	16,76	16,76	-	-	-	-	-	2	16,88	16,76	17,00	16,81

N: Número de muestras.

LD: límite de detección

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

Cuadro 6. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y concentración promedio ponderada por volumen de cada ión estudiado ($\mu\text{eq}/\text{l}$) para las muestras de precipitación colectadas en la estación Palo Seco.

Estación Palo Seco	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Período poco lluvioso (noviembre 2009-abril 2010)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	15,40	6,30	24,60	12,64	6	11,30	6,50	11,93	11,64	6	16,43	10,29	23,81	15,98	18	14,38	6,30	24,60	16,42
H ⁺	6	2,83	0,05	9,77	2,10	6	4,75	0,63	5,21	5,50	6	1,63	0,21	2,51	1,79	18	3,07	0,05	12,30	4,22
pH	6	5,55	5,01	6,00	5,66	6	5,32	5,28	6,23	5,26	6	5,79	5,60	6,70	5,75	6	5,52	4,91	6,00	5,37
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	6	42,87	17,72	66,61	45,25	6	41,11	23,50	67,16	43,23	6	51,72	38,91	67,69	49,65	18	45,23	17,72	67,69	45,04
NO ₂ ⁻	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	2	4,01	3,17	4,84	4,44	2	4,01	3,17	4,84	4,44
NO ₃ ⁻	6	14,27	6,07	37,52	9,19	6	12,01	5,40	23,27	12,57	6	17,36	3,05	37,10	17,70	18	14,55	3,05	37,52	12,58
SO ₄ ²⁻	6	46,70	13,92	95,31	30,35	6	20,38	12,43	30,92	21,22	6	36,75	21,79	62,83	35,37	18	34,61	12,43	95,31	95,31
SO ₄ ²⁻ (n,s,)	6	41,57	11,56	89,02	25,23	6	15,75	9,58	27,25	12,01	6	30,40	14,77	53,86	29,35	18	29,24	9,58	89,02	21,41
CH ₃ COO ⁻	6	4,65	3,44	8,90	3,82	6	5,46	2,53	7,66	5,11	6	5,71	4,14	8,12	5,54	18	5,27	2,53	8,90	4,82
HCOO ⁻	3	7,99	5,19	12,84	5,29	1	2,04	2,04	2,04	2,04	2	7,38	7,21	7,55	7,26	6	6,80	2,04	12,84	3,85
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	42,90	19,69	78,69	42,84	6	38,73	17,55	66,35	40,33	6	53,05	30,10	79,33	50,30	18	44,90	17,55	79,33	42,96
NH ₄ ⁺	6	16,31	1,91	37,58	6,89	6	14,19	1,74	33,05	15,59	6	8,94	1,71	27,04	13,51	18	13,15	1,71	37,58	12,70
K ⁺	6	3,43	0,79	5,34	4,46	6	4,06	0,94	8,61	4,09	6	3,75	1,34	7,17	3,91	18	3,75	0,79	8,61	3,38
Mg ²⁺	6	15,69	11,40	16,86	12,60	6	13,52	8,24	19,35	13,32	6	16,44	7,47	27,00	14,93	18	15,22	7,47	27,00	13,42
Ca ²⁺	6	45,16	12,71	68,41	35,37	6	24,33	21,44	30,03	25,19	6	47,63	26,28	64,37	45,56	18	39,04	12,71	68,41	32,02

N: Número de muestras.

LD: límite de detección

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen

Cuadro 7. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Contra maestre.

Estación Contra maestre	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	20,56	18,52	26,27	19,38	6	15,86	8,92	21,20	16,55	12	18,21	8,92	26,27	17,51
H ⁺	6	0,46	0,26	0,56	0,41	6	6,03	0,41	2,14	1,14	12	0,76	0,26	2,14	0,89
pH	6	6,33	6,25	6,56	6,38	6	5,22	5,66	6,39	5,95	12	6,12	5,67	6,59	6,05
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	6	84,73	44,27	109,99	80,05	6	58,43	35,84	75,49	61,26	12	71,58	35,84	109,99	67,60
NO ₂ ⁻	0	0,00	0,00	0,00	0,00	1	6,16	6,16	6,16	6,16	1	6,16	6,16	6,16	6,16
NO ₃ ⁻	6	9,67	6,05	12,26	9,13	6	10,73	2,50	8,19	10,94	12	10,20	6,05	14,82	11,12
SO ₄ ²⁻	6	40,24	30,30	52,95	35,37	6	37,24	19,51	58,07	39,20	12	38,74	19,51	58,07	40,76
SO ₄ ²⁻ (n,s.)	6	33,48	22,31	44,22	29,53	6	33,13	22,31	44,22	29,53	12	33,31	17,00	53,20	35,41
CH ₃ COO ⁻	6	8,55	4,23	13,27	6,40	6	6,02	2,59	13,65	6,08	12	7,29	2,59	13,65	7,79
HCOO ⁻	2	11,68	8,86	14,50	9,31	2	13,12	7,95	18,28	12,10	4	12,40	7,95	18,28	10,79
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	56,47	18,89	76,67	48,79	6	34,37	12,30	53,40	37,54	12	45,42	12,30	76,67	51,11
NH ₄ ⁺	6	20,47	16,75	22,99	19,56	6	21,11	12,53	32,26	21,94	12	20,79	12,53	32,26	20,33
K ⁺	6	12,96	8,38	19,17	9,44	6	7,49	1,88	19,69	7,75	12	10,22	1,88	19,69	10,35
Mg ²⁺	6	21,81	9,60	48,34	17,22	6	12,28	5,61	24,52	13,90	12	17,04	5,61	48,34	18,22
Ca ²⁺	6	67,38	58,96	78,26	72,41	6	43,37	26,95	60,02	44,91	12	55,38	26,95	78,26	57,06
Zn	6	53,96	14,45	85,70	46,74	6	25,99	14,39	67,84	23,56	12	39,98	14,39	85,70	31,38
Cu	6	11,70	9,37	15,32	11,63	6	24,73	18,57	34,23	23,47	12	18,21	9,37	34,23	19,48
Mn	6	4,06	3,13	5,67	3,56	6	4,34	3,52	5,34	4,39	12	4,20	3,13	5,67	4,11
Ba	5	38,65	20,22	82,75	36,84	4	53,31	37,34	80,89	37,63	9	45,16	20,22	82,75	37,36
Fe	6	20,74	14,42	32,91	27,43	6	17,25	14,64	19,32	17,24	12	18,99	14,42	32,91	20,68

N: Número de muestras.

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 8. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Pinares de Mayarí.

Estación P.Mayarí	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	14,09	5,31	24,71	12,05	6	17,22	9,54	29,14	15,34	12	15,65	5,31	29,14	14,30
H ⁺	6	13,63	1,55	41,69	10,47	6	27,39	1,66	75,86	22,41	12	20,51	1,55	75,86	18,63
pH	6	4,86	4,38	5,81	4,99	6	4,56	4,12	5,78	4,65	12	4,69	4,12	5,81	4,73
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	6	40,58	18,85	54,32	41,28	6	30,80	18,10	45,08	28,89	12	35,69	18,10	54,32	32,81
NO ₂ ⁻	1	2,23	2,23	2,23	2,23	0	0,00	0,00	0,00	0,00	1	2,23	2,23	2,23	2,23
NO ₃ ⁻	6	18,68	3,54	47,21	13,13	6	33,01	6,14	67,53	26,89	12	25,85	3,54	67,53	22,53
SO ₄ ²⁻	6	37,92	13,70	98,65	32,53	6	57,89	24,69	102,07	49,91	12	47,91	13,70	102,07	44,41
SO ₄ ²⁻ (n,s.)	6	33,45	12,10	92,36	27,93	6	54,17	22,26	96,62	46,42	12	43,81	12,10	96,62	40,56
CH ₃ COO ⁻	6	5,70	1,79	14,75	5,03	6	2,21	1,90	2,52	2,24	12	3,96	1,79	14,75	3,12
HCOO ⁻	3	6,36	1,76	14,85	9,22	1	1,08	1,08	1,08	1,08	4	5,04	1,08	14,85	3,81
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	37,38	13,43	52,56	38,42	6	31,08	15,23	45,98	29,19	12	34,23	13,43	52,56	32,11
NH ₄ ⁺	6	4,06	0,96	7,53	3,89	6	17,08	3,72	28,07	14,85	12	10,57	0,96	28,07	11,38
K ⁺	6	4,98	0,15	8,32	3,83	6	2,28	0,66	3,92	1,98	12	3,63	0,15	8,32	2,57
Mg ²⁺	6	17,93	5,33	28,65	13,04	6	15,27	6,00	33,33	16,50	12	16,60	5,33	33,33	15,40
Ca ²⁺	6	30,58	12,81	58,82	30,57	6	34,83	20,40	48,90	32,81	12	32,70	12,81	58,82	32,10
Zn	6	98,08	18,18	206,10	56,51	6	182,76	25,32	265,10	168,22	12	140,42	18,18	206,10	132,84
Cu	6	41,07	8,11	91,34	33,66	6	61,36	10,62	190,70	50,71	12	51,21	8,11	190,70	45,31
Mn	6	8,11	6,84	10,48	8,51	6	8,05	5,65	10,54	7,77	12	8,08	5,65	10,54	8,01
Ba	4	26,95	10,27	52,65	27,64	3	16,51	9,67	28,49	14,45	7	22,48	9,67	52,65	20,26
Fe	6	27,91	14,78	52,43	38,17	6	30,88	14,71	64,49	28,51	12	29,39	14,71	64,49	31,57
Se	2	23,14	16,95	29,32	28,55	1	24,07	24,07	24,07	24,07	3	23,45	16,95	24,07	26,72
Co	4	13,66	8,97	20,01	17,77	3	9,24	5,76	15,52	8,37	7	11,76	5,76	20,01	13,35

N: Número de muestras.

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 9. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Universidad de Santiago.

Estación U.Santiago	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	20,59	9,90	34,28	16,37	5	23,30	14,30	41,99	19,05	11	21,82	9,90	41,99	18,02
H ⁺	6	1,25	0,08	2,51	1,70	5	0,41	0,13	0,85	0,48	11	0,87	0,08	2,51	0,95
pH	6	5,90	5,60	6,00	5,77	5	6,38	6,14	6,88	6,32	11	6,06	5,60	6,00	6,02
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Cl ⁻	6	84,17	35,46	119,14	66,65	5	73,82	54,65	90,05	81,23	11	79,47	35,46	119,14	75,60
NO ₂ ⁻	2	4,16	1,59	6,74	3,78	1	8,62	8,62	8,62	8,62	3	5,65	1,59	8,62	4,37
NO ₃ ⁻	6	8,27	3,30	17,47	5,72	5	15,72	7,16	35,95	10,36	11	11,66	3,30	35,95	8,57
SO ₄ ²⁻	6	52,68	22,83	133,31	34,54	5	70,01	28,24	206,64	37,34	11	60,56	22,83	206,64	36,26
SO ₄ ²⁻ (n,s)	6	44,44	18,72	121,03	27,86	5	62,51	20,27	197,29	29,90	11	52,65	18,72	197,29	29,11
CH ₃ COO ⁻	6	6,48	2,65	21,92	6,11	5	4,47	2,41	6,41	4,83	11	5,57	2,41	21,92	5,33
HCOO ⁻	1	6,27	6,27	6,27	6,27	2	4,38	1,88	6,87	3,01	3	5,01	1,88	6,87	3,69
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	68,89	34,39	102,58	55,81	5	62,72	40,37	78,09	62,22	11	66,09	34,39	102,58	59,75
NH ₄ ⁺	6	23,54	1,48	74,73	12,39	5	36,34	5,19	76,91	28,90	11	29,36	1,48	76,91	12,48
K ⁺	6	15,22	1,94	39,16	8,79	5	15,97	8,58	28,93	14,80	11	15,56	0,98	0,98	39,16
Mg ²⁺	6	14,76	4,88	36,57	10,06	5	12,61	7,03	20,44	10,54	11	13,78	4,88	36,57	10,35
Ca ²⁺	6	48,21	32,39	63,70	42,19	5	44,90	20,90	65,56	43,30	11	46,71	20,90	65,56	42,87
Zn	5	50,20	31,09	95,28	48,25	5	35,79	18,70	54,14	33,38	10	42,99	18,70	95,28	39,05
Cu	5	9,68	5,92	19,29	10,10	5	14,14	7,43	21,96	14,77	10	11,91	5,92	21,96	12,98
Mn	5	6,20	4,47	8,53	6,20	5	4,87	3,15	6,11	3,95	10	5,54	3,15	8,53	4,81
Ba	3	73,09	57,42	101,50	43,78	3	36,63	13,64	46,78	11,88	6	54,86	13,64	101,50	24,05
Fe	5	28,68	18,32	48,54	32,29	5	21,27	15,33	23,74	23,46	10	24,97	15,33	48,54	26,83

N: Número de muestras.

LD: límite de detección

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen

Cuadro 10. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Gran Piedra.

Estación Gran Piedra	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	12,67	8,62	18,04	12,04	6	13,01	9,46	16,64	13,49	12	12,84	8,62	18,04	13,12
H ⁺	6	4,38	0,45	20,89	9,89	6	7,43	0,52	34,67	5,24	12	5,90	0,45	34,67	6,42
pH	6	5,36	4,68	6,35	5,01	6	5,13	4,46	6,30	5,28	12	5,23	4,46	6,35	5,19
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	1	7,45	7,45	7,45	7,45	1	7,45	7,45	7,45	7,45
Cl ⁻	6	47,05	33,16	56,24	44,37	6	40,17	27,88	52,52	34,45	12	43,61	27,88	56,24	36,97
NO ₂ ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	1	0,04	0,04	0,04	0,04	1	0,04	0,04	0,04	0,04
NO ₃ ⁻	6	10,16	4,76	19,46	10,35	6	19,39	3,73	33,12	24,05	12	14,77	3,73	33,12	20,57
SO ₄ ²⁻	6	29,69	18,63	44,27	29,77	6	30,46	11,02	42,04	33,27	12	30,08	11,02	44,27	32,39
SO ₄ ²⁻ (n,s)	6	24,58	13,91	36,14	24,95	6	26,20	6,02	38,71	29,37	12	25,39	6,02	38,71	28,25
CH ₃ COO ⁻	6	4,75	2,36	9,64	3,46	6	6,51	2,48	13,57	9,69	12	5,63	2,36	13,57	8,11
HCOO ⁻	2	6,92	5,14	8,71	5,52	0	8,41	8,09	8,73	8,62	4	7,66	5,14	8,73	7,79
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	42,75	34,15	67,98	40,26	6	35,61	27,80	41,75	32,59	12	39,18	27,80	67,98	34,54
NH ₄ ⁺	6	6,37	1,99	20,23	5,72	6	6,24	1,57	21,46	10,30	12	6,30	1,57	21,46	9,14
K ⁺	6	5,79	0,92	9,86	4,81	6	2,68	1,09	6,65	1,92	12	4,23	0,92	9,86	2,65
Mg ²⁺	6	17,93	5,33	28,65	15,87	6	9,45	6,00	15,62	8,64	12	13,69	5,33	28,65	10,47
Ca ²⁺	6	29,08	20,39	38,81	26,61	6	28,70	14,39	40,32	29,64	12	28,89	14,39	40,32	28,87
Zn	5	60,06	34,87	81,40	52,64	5	46,23	17,38	79,07	59,53	10	53,15	17,38	81,40	57,91
Cu	5	9,84	7,37	28,69	21,26	5	9,95	7,26	30,56	20,75	10	9,92	7,26	30,56	21,00
Mn	5	5,46	4,56	6,34	5,12	5	8,26	5,60	9,58	6,87	10	6,86	6,86	9,58	5,72
Ba	5	49,27	11,28	100,30	64,76	5	18,12	14,14	24,32	18,89	10	33,70	11,28	100,30	29,68
Fe	5	29,30	14,18	42,50	32,99	5	19,55	17,63	24,69	18,93	10	24,43	14,18	42,50	22,24

N: Número de muestras.

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo.

Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

LD: límite de detección

Cuadro 11. Resultados de pH, conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración promedio ponderada por volumen de los iones ($\mu\text{eq}/\text{l}$) y concentración promedio ponderada por volumen de los elementos ($\mu\text{g}/\text{l}$) en las muestras de precipitación colectadas en la estación Guantánamo.

Estación Guantánamo	Período poco lluvioso (noviembre 2008-abril 2009)					Período lluvioso (mayo 2009-octubre 2009)					Promedio Global (noviembre 2008-abril 2010)				
	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV	N	Media	Min	Max	CPPV
Cond	6	16,11	9,48	23,96	13,43	6	22,12	14,64	36,27	20,23	12	19,11	9,48	36,27	18,77
H ⁺	6	0,96	0,28	2,00	1,29	6	0,46	0,02	1,86	0,32	12	0,71	0,02	2,00	0,53
pH	6	6,02	5,70	6,55	5,89	6	6,33	5,73	6,00	6,49	12	6,15	5,70	6,00	6,27
F ⁻	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	7,80	7,43	8,17	7,49	2	7,80	7,43	8,17	7,49
Cl ⁻	6	49,16	37,94	66,53	44,80	6	51,90	30,77	74,71	62,96	12	50,53	30,77	74,71	59,06
NO ₂ ⁻	2	1,84	1,48	2,19	1,66	0	<LD	<LD	<LD	<LD	2	1,84	1,48	2,19	1,66
NO ₃ ⁻	6	10,24	3,64	19,78	7,57	6	24,17	6,22	69,94	13,13	12	17,21	3,64	69,94	11,94
SO ₄ ²⁻	6	41,94	19,07	73,87	34,29	6	54,78	22,74	138,78	38,10	12	48,36	19,07	138,78	37,28
SO ₄ ²⁻ (n,s.)	6	37,18	15,21	67,21	30,04	6	49,31	15,69	136,01	31,54	12	43,25	15,21	136,01	31,22
CH ₃ COO ⁻	6	6,87	3,43	13,72	6,79	6	5,65	1,91	14,22	9,30	12	6,26	1,91	14,22	8,76
HCOO ⁻	3	3,27	2,44	3,68	3,45	4	28,04	22,43	31,38	25,54	7	13,89	2,44	31,38	24,89
MAS	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD	0	<LD	<LD	<LD	<LD
Na ⁺	6	39,83	32,20	55,69	35,48	6	45,67	23,17	67,72	54,82	12	42,75	23,17	67,72	50,67
NH ₄ ⁺	6	11,69	2,03	35,28	7,70	6	14,15	4,65	38,46	20,96	12	12,92	2,03	38,46	18,11
K ⁺	6	9,33	1,32	15,45	8,21	6	9,08	3,26	17,16	12,16	12	9,20	1,32	17,16	11,31
Mg ²⁺	6	21,49	8,91	33,55	16,02	6	55,92	10,53	234,03	22,00	12	38,71	8,91	234,03	20,72
Ca ²⁺	6	45,25	31,67	59,25	39,44	6	104,47	33,98	264,97	75,04	12	74,86	31,67	264,97	67,40
Zn	6	73,10	22,30	219,10	55,91	5	32,84	14,18	73,98	21,29	11	54,80	14,18	219,1	30,70
Cu	4	34,08	11,44	54,25	40,10	2	26,93	23,54	30,32	25,23	6	31,69	11,44	54,25	33,80
Mn	4	8,78	4,83	11,77	8,40	2	9,62	3,49	15,75	8,27	6	9,16	3,49	15,75	9,42
Ba	6	19,60	9,99	35,21	18,78	5	18,16	12,40	24,12	17,92	11	18,95	9,99	35,21	20,74
Fe	6	23,47	14,67	50,85	19,11	5	19,67	17,34	22,34	19,41	11	21,74	14,67	50,85	18,33
Se	2	18,53	18,50	18,56	18,51	2	19,43	16,45	22,41	7,11	4	18,98	16,45	22,41	12,15
Co	3	7,40	6,32	8,56	4,98	1	5,32	5,32	5,32	5,32	4	6,88	5,32	8,56	6,15

N: Número de muestras.

LD: límite de detección

Cond: Conductividad.

Min: Valor mínimo. Max: Valor máximo.

CPPV: Concentración promedio ponderada por volumen.

Anexo 4. Comportamiento mensual de la cantidad de lluvia, temperatura, humedad relativa y rapidez del viento en 11 estaciones de monitoreo de Cuba durante el período Noviembre 2008 – Abril 2010.

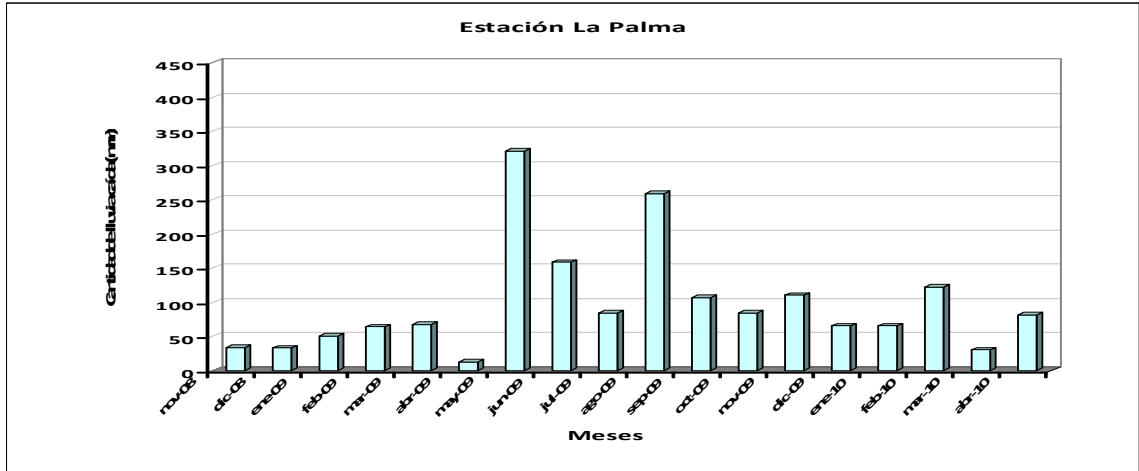


Figura 1. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación La Palma.

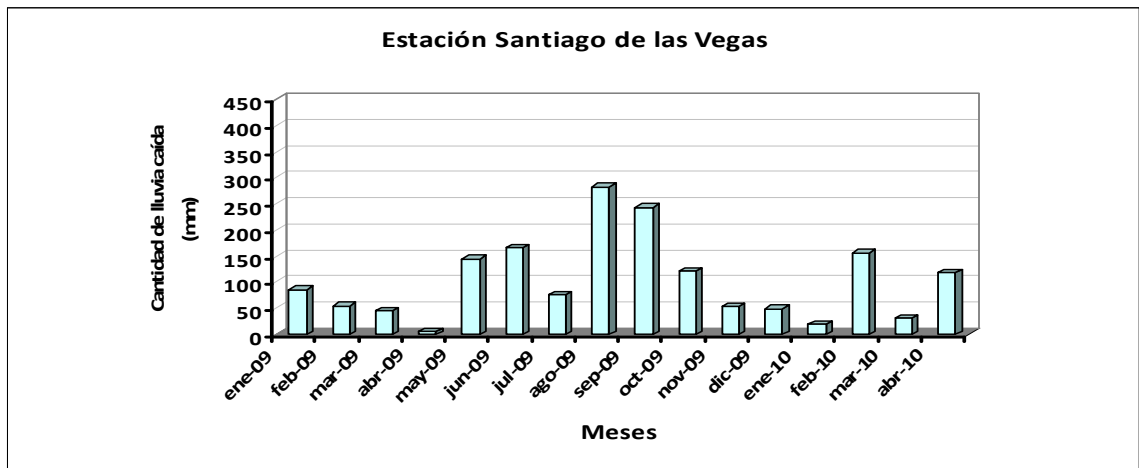


Figura 2. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Santiago de las Vegas.

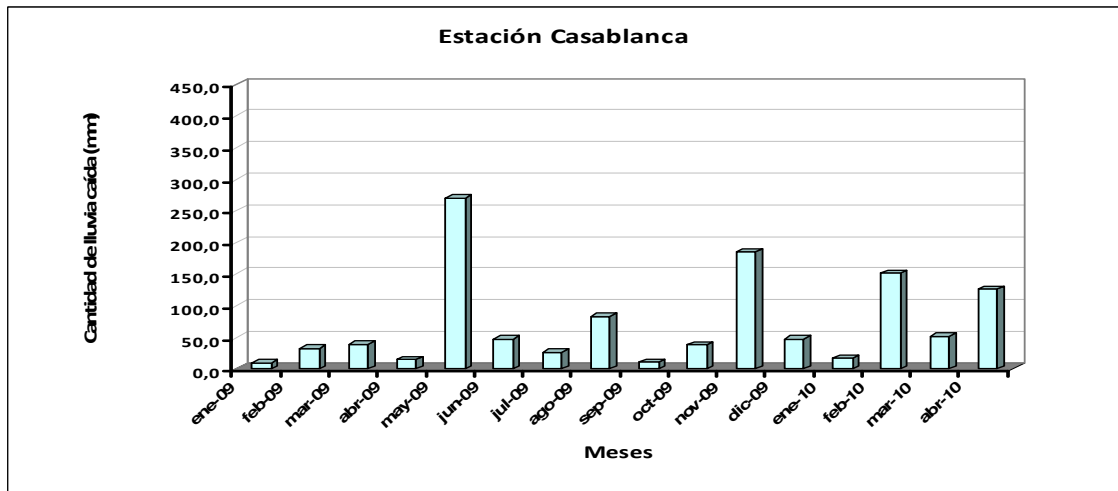


Figura 3. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Casablanca.

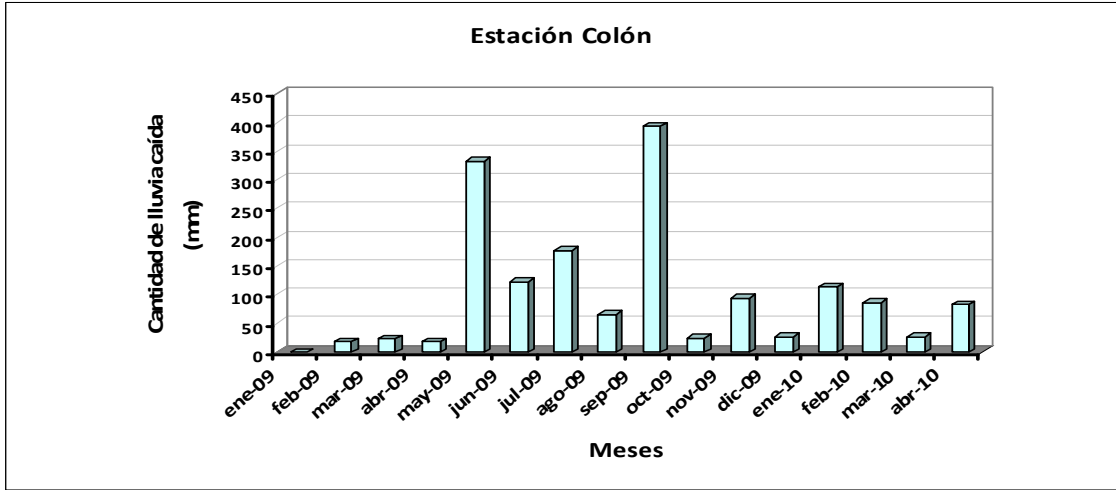


Figura 4. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Colón.

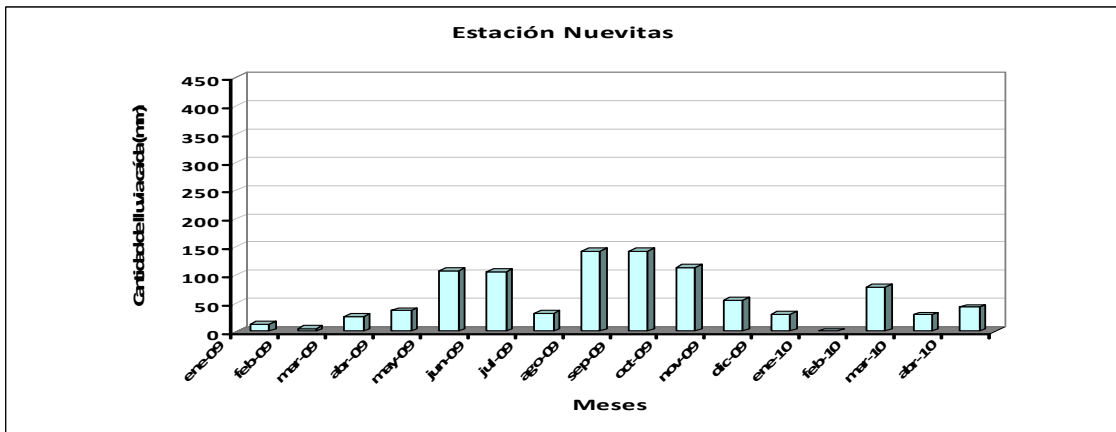


Figura 5. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Nuevitas.

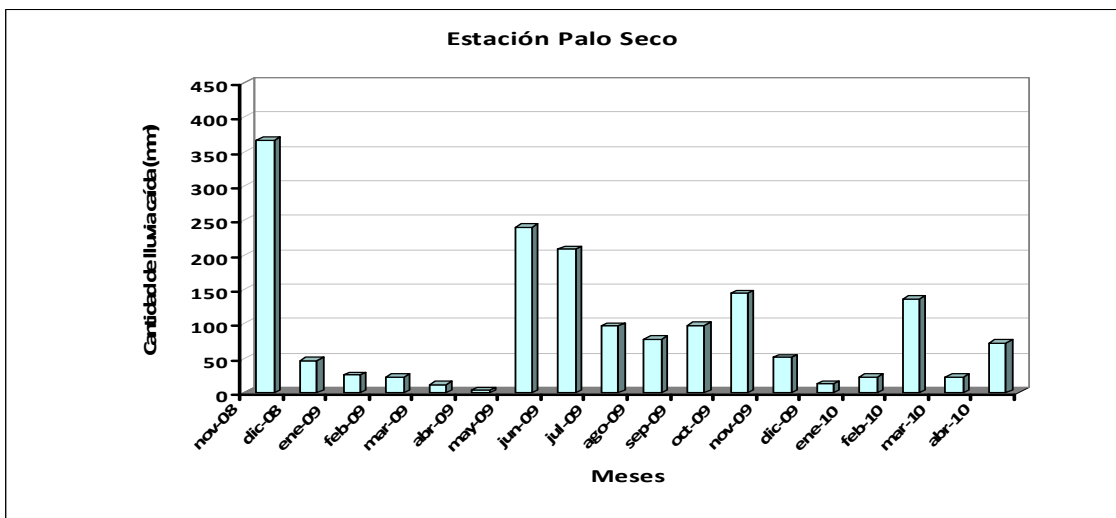


Figura 6. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Palo Seco.

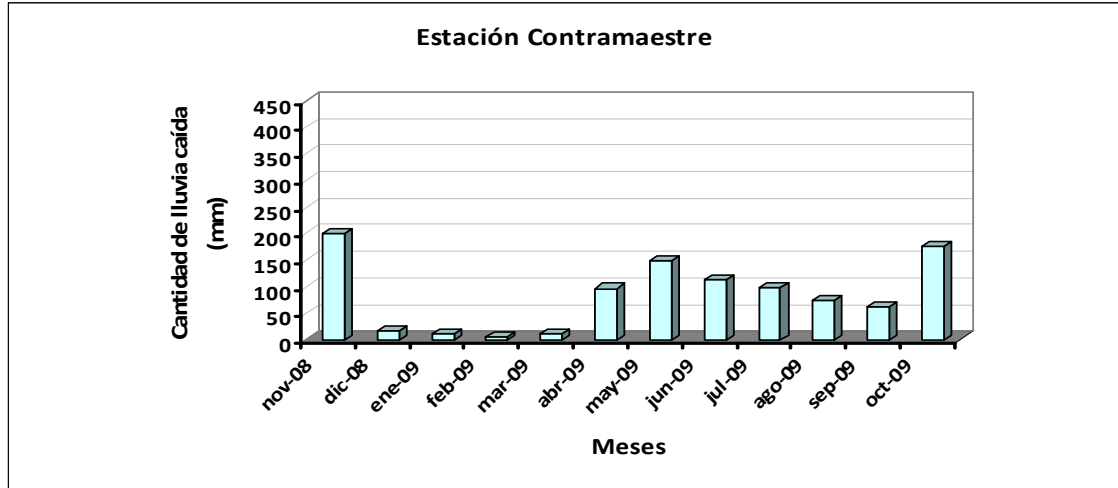


Figura 7. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Contraamaestre.

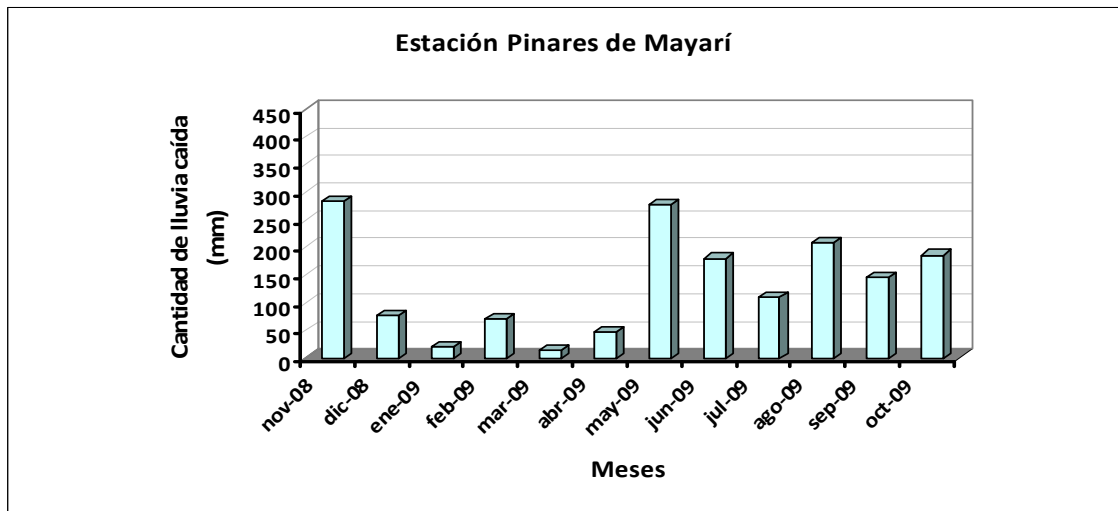


Figura 8. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Pinares de Mayarí.

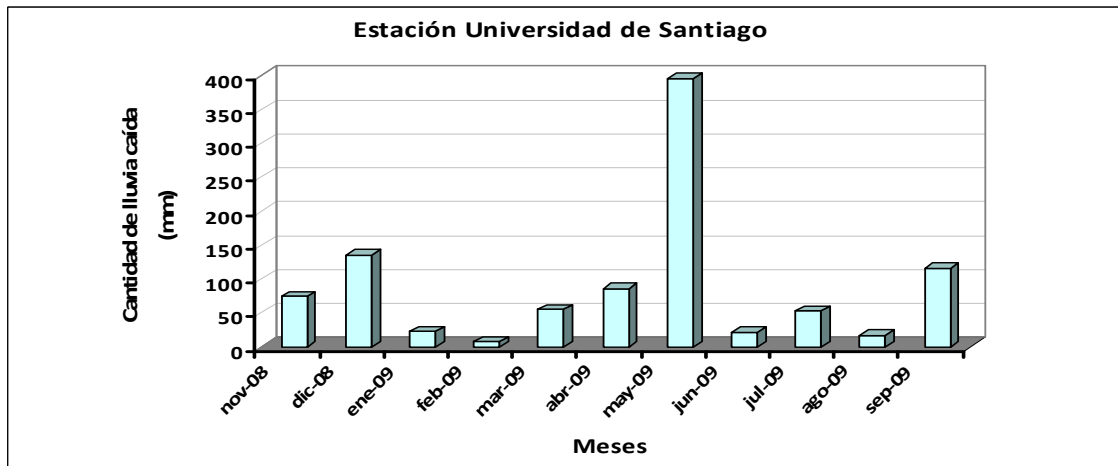


Figura 9. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Universidad de Santiago.

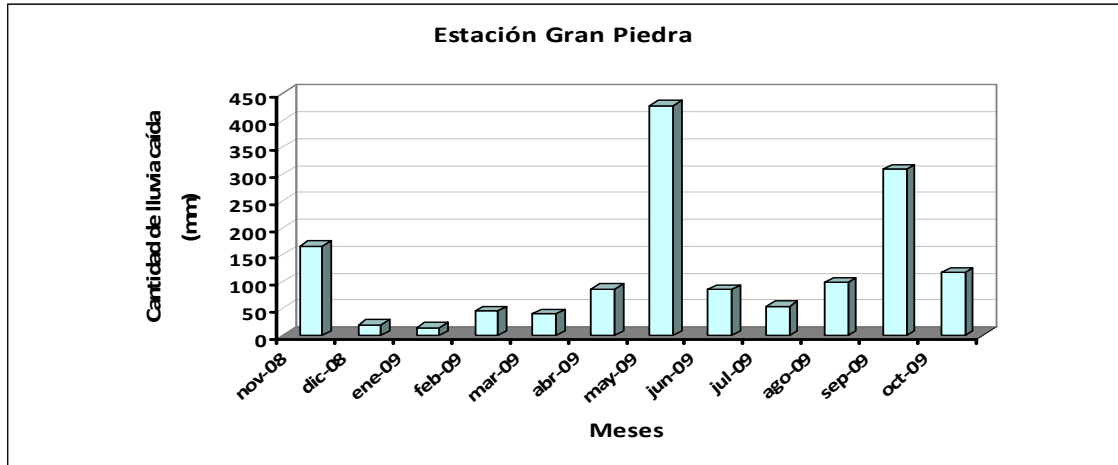


Figura 10. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Gran Piedra.

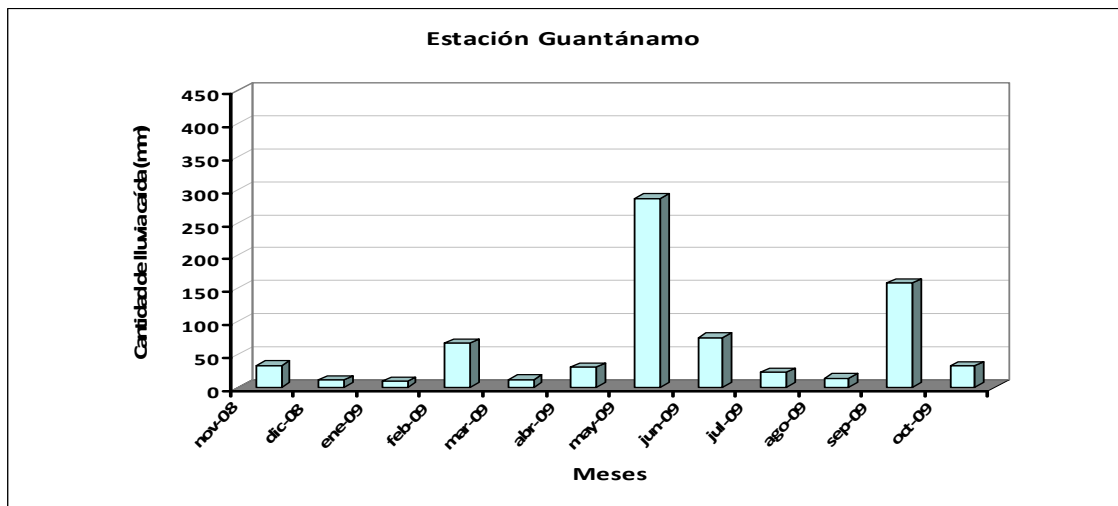


Figura 11. Variación estacional de la cantidad de lluvia en la estación Guantánamo.

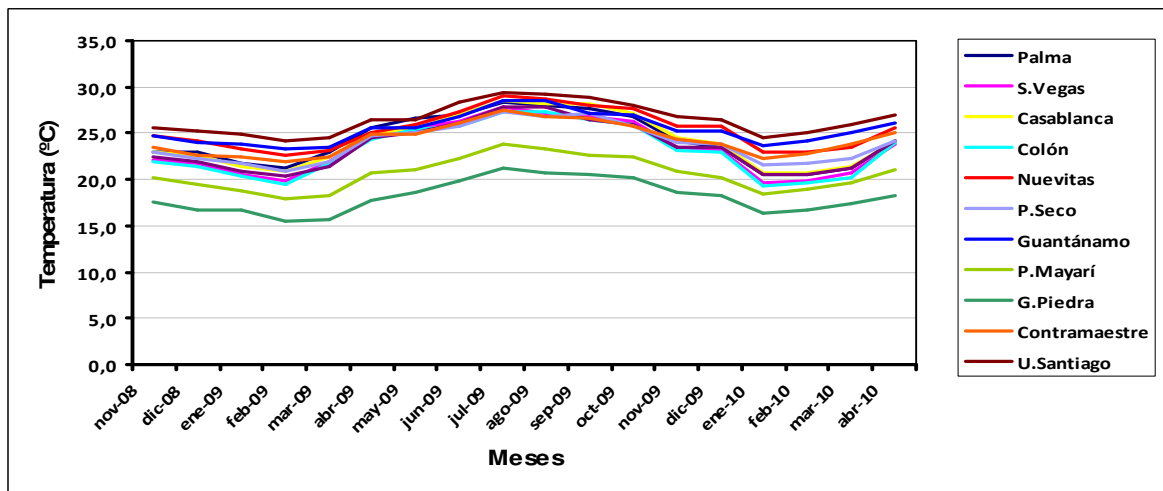


Figura 12. Variación estacional de la temperatura en diferentes zonas de Cuba durante el período noviembre 2008 - abril 2010.

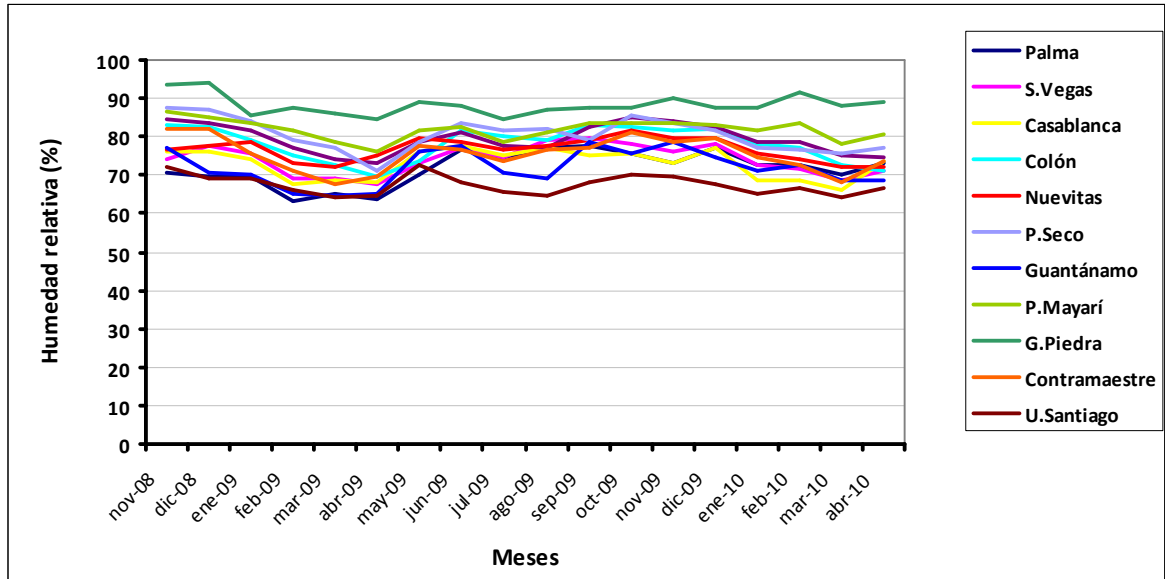


Figura 13. Variación estacional de la humedad relativa en diferentes zonas de Cuba durante el período noviembre 2008 - abril 2010.

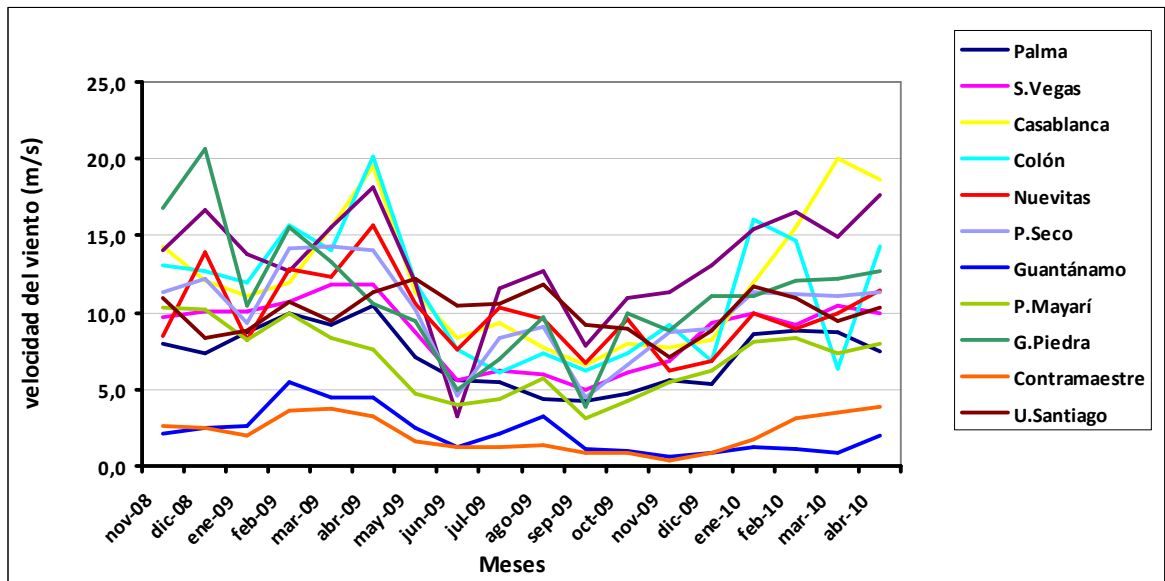


Figura 14. Variación estacional de la velocidad del viento en diferentes zonas de Cuba durante el período noviembre 2008 - abril 2010.

Anexo 5. Contribuciones ácidas a las lluvias de Cuba

Cuadro 1. Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total de las lluvias colectadas en las estaciones rurales de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio

	La Palma (Rural)		Colón (Rural)		Palo Seco (Rural)		Contramaestre (Rural)	
	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%
H ₂ SO ₄ HNO ₃	36,95	70,10	40,49	82,97	37,59	80,35	43,29	71,82
CH ₃ COOH HCOOH	15,76	29,90	8,31	17,03	9,19	19,65	16,98	28,18
Total Estimado H ⁺	52,71		48,80		46,78		60,27	
	Pinares de Mayarí (Rural)		Gran Piedra (Rural)		Guantánamo (Rural)			
	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%	(μeq)	%		
H ₂ SO ₄ HNO ₃	63,10	90,10	48,82	75,44	43,16	56,19		
CH ₃ COOH HCOOH	6,93	9,90	15,90	24,56	33,65	43,81		
Total Estimado H ⁺	70,03		64,72		76,81			

Cuadro 2. Contribución de los ácidos minerales y orgánicos a la acidez total de las lluvias colectadas en las estaciones semiurbanas y urbanas de vigilancia de la contaminación atmosférica de Cuba durante el período de estudio

	Santiago de las Vegas (semiurbana)		Casablanca (urbana)		Nuevitas (urbana)		Universidad de Oriente (urbana)	
	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%	($\mu\text{eq/l}$)	%
H ₂ SO ₄ HNO ₃	49,13	77,55	45,79	83,44	50,69	88,40	37,68	80,71
CH ₃ COOH HCOOH	14,26	22,45	9,09	16,56	6,65	11,60	9,02	19,32
Total Estimado H ⁺	63,39		54,88		57,34		46,69	

Anexo 6. Matrices de Spearman para las concentraciones de los iones analizados en el agua de lluvia de cada estación de monitoreo de vigilancia de la contaminación de la atmósfera en Cuba.

Cuadro 1. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación La Palma durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	-,044	1							
SO ₄ ²⁻	,069	,577*	1						
CH ₃ COO ⁻	,298	,503*	-,040	1					
Na ⁺	,971**	,005	,164	,350	1				
NH ₄ ⁺	-,028	,763**	,765**	,300	,082	1			
K ⁺	,709**	,294	,108	,356	,742**	,282	1		
Mg ²⁺	,327	,352	,536*	,207	,434	,604**	,420	1	
Ca ²⁺	-,286	,513*	,451	-,168	-,368	,317	-,304	-,051	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 18

Cuadro 2. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Santiago de las Vegas durante el período noviembre 2008 -abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,456	1							
SO ₄ ²⁻	,238	,638**	1						
CH ₃ COO ⁻	,274	,132	,094	1					
Na ⁺	,844**	,518*	,374	,076	1				
NH ₄ ⁺	,432	,600*	,547*	,100	,615*	1			
K ⁺	,453	,406	,385	,076	,609*	,579*	1		
Mg ²⁺	,800**	,400	,318	,138	,888**	,359	,547*	1	
Ca ²⁺	,256	,341	,676**	,253	,226	,303	-,071	,232	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 16

Cuadro 3. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Casablanca durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,249	1							
SO ₄ ²⁻	,071	,715**	1						
CH ₃ COO ⁻	,100	,050	,024	1					
Na ⁺	,829**	,294	,047	,129	1				
NH ₄ ⁺	,829**	,294	,047	,129	,829**	1			
K ⁺	-,015	,652**	,679**	,094	,094	,744**	1		
Mg ²⁺	,624**	,408	,232	-,062	,579*	,488	,294	1	
Ca ²⁺	-,103	,430	,856**	,012	-,041	,421	,524*	-,124	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 16

Cuadro 4. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Colón durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	-,014	1							
SO ₄ ²⁻	,282	,425	1						
CH ₃ COO ⁻	-,054	-,021	-,054	1					
Na ⁺	,746**	,411	,643**	-,125	1				
NH ₄ ⁺	,007	,989**	,421	-,021	,432	1			
K ⁺	,464	,468	,539*	,000	,632*	,457	1		
Mg ²⁺	,354	,586*	,932**	,139	,729**	,582*	,661**	1	
Ca ²⁺	,039	,368	,750**	,011	,321	,321	,286	,596*	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 15

Cuadro 5. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Nuevitas durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,365	1							
SO ₄ ²⁻	,639**	,490	1						
CH ₃ COO ⁻	,489	,059	,293	1					
Na ⁺	,900**	,553*	,807**	,339	1				
NH ₄ ⁺	,514*	,558*	,943**	,168	,729**	1			
K ⁺	,629**	,728**	,793**	,182	,832**	,793**	1		
Mg ²⁺	,932**	,374	,650**	,471	,861**	,536*	,704**	1	
Ca ²⁺	,811**	,343	,811**	,400	,786**	,632*	,711**	,825**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 15

Cuadro 6. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Palo Seco durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,637**	1							
SO ₄ ²⁻	,579*	,765**	1						
CH ₃ COO ⁻	-,267	-,218	-,298	1					
Na ⁺	,944**	,622**	,589*	,944**	1				
NH ₄ ⁺	,385	,835**	,655**	-,073	,428	1			
K ⁺	,853**	,521*	,428	-,129	,853**	,373	1		
Mg ²⁺	,697**	,567*	,507*	-,055	,800**	,331	,635**	1	
Ca ²⁺	,697**	,567*	,507*	-,055	,800**	,331	,635**	,697**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 18

Cuadro 7. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Contra maestre durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,119	1							
SO ₄ ²⁻	,378	,727**	1						
CH ₃ COO ⁻	,231	-,056	,252	1					
Na ⁺	,853**	,224	,294	,385	1				
NH ₄ ⁺	,217	,664*	,881**	,133	,105	1			
K ⁺	,517	,014	,378	,923**	,566	,210	1		
Mg ²⁺	,650*	,014	,084	,322	,825**	-,112	,406	1	
Ca ²⁺	,469	-,105	,322	,643*	,350	-,014	,699*	,343	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 12

Cuadro 8. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Pinares de Mayarí durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,678*	1							
SO ₄ ²⁻	,601*	,972**	1						
CH ₃ COO ⁻	,025	-,063	-,147	1					
Na ⁺	,979**	,685**	,608*	-,091	1				
NH ₄ ⁺	,186	,788**	,827**	-,323	,242	1			
K ⁺	,832**	,573	,497	,035	,804**	,007	1		
Mg ²⁺	,559	,308	,287	,217	,524	-,130	,622*	1	
Ca ²⁺	,762**	,811**	,839**	,102	,741**	,497	,615*	,517	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 12

Cuadro 9. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Universidad de Santiago durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,564	1							
SO ₄ ²⁻	,500	,836**	1						
CH ₃ COO ⁻	,055	,018	,155	1					
Na ⁺	,055	,018	,155	,036	1				
NH ₄ ⁺	,682*	,855**	,818**	,109	,836**	1			
K ⁺	,855**	,809**	,700**	,227	,927**	,818**	1		
Mg ²⁺	,736**	,773**	,736**	,145	,855**	,709**	,918**	1	
Ca ²⁺	,900**	,682*	,609*	-,082	,955**	,764**	,900**	,818**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 11

Cuadro 10. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Gran Piedra durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	-,112	1							
SO ₄ ²⁻	,406	,692*	1						
CH ₃ COO ⁻	-,238	,245	,161	1					
Na ⁺	,692*	-,329	,028	-,007	1				
NH ₄ ⁺	,273	,664*	,909**	,105	,007	1			
K ⁺	,797**	-,329	,098	,049	,839**	,028	1		
Mg ²⁺	,699*	,112	,559	,252	,364	,406	,727**	1	
Ca ²⁺	,280	,566	,839**	,308	,028	,811**	-,014	,420	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 12

Cuadro 11. Correlación por rangos de Spearman entre las concentraciones de los iones obtenidos del agua de lluvia colectada en la estación Guantánamo durante el período noviembre 2008-abril 2010

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CH ₃ COO ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	,063	1							
SO ₄ ²⁻	-,091	,790**	1						
CH ₃ COO ⁻	,455	-,573	-,385	1					
Na ⁺	,888**	,189	,084	,238	1				
NH ₄ ⁺	,028	,643*	,895**	-,294	,133	1			
K ⁺	,825**	-,070	-,133	,657*	,538	-,077	1		
Mg ²⁺	-,021	,580*	,769**	-,182	,000	,566	,210	1	
Ca ²⁺	,231	,650*	,587*	-,210	,385	,462	,196	,615*	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

n = 12