

ESTUDIO QUIMICO-METEOROLOGICO DE LOS COMPUESTOS ATMOSFERICOS DEL NITROGENO EN UNA LOCALIDAD RURAL (CUBA)

Autores: OSVALDO CUESTA SANTOS, MARÍA GONZÁLEZ GONZÁLEZ, ARNALDO COLLAZO ARANDA, ANTONIO WALLO VÁZQUEZ
ROBERTO LABRADOR MONTERO

Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología

Resumen

El estudio realizado incluye el análisis de los Oxidos de Nitrógeno, Amoníaco, nitrato y amonio en los aerosoles y la lluvia. En la Estación Regional La Palma en conexión con los tipos de situaciones sinópticas se han realizado investigaciones de las trayectorias inversas, para conocer las posibles fuentes de origen. La deposición total de estos compuestos oscila entre 12,0 y 25,0 Kg-N.ha⁻¹.año⁻¹. La deposición húmeda representa el 30% aproximadamente, mientras que la deposición seca es el 70%. El peso de ambas deposiciones depende de nuestras condiciones de clima tropical lluvioso. Por otro lado, las formas de nitrógeno oxidado representan solamente el 20%, mientras que las formas reducidas del nitrógeno son del 80% del total. Estos valores están de acuerdo con la potencia de las fuentes naturales de nuestro clima. Las concentraciones de nitrato en los aerosoles y la lluvia están relacionados con el Anticiclón Migratorio Continental y presentan valores mayores que el resto de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre nuestro territorio, por lo que se concluye que estas concentraciones están asociadas al transporte de estos contaminantes desde el continente.

Introducción

En la actualidad muchas de las actividades antropogénicas ponen en peligro el funcionamiento y estructura de los ecosistemas naturales y semi-naturales debido a sus efectos sobre las especies endémicas de animales y plantas. En las últimas décadas uno de los principales peligros es el incremento de la contaminación atmosférica por los compuestos del nitrógeno. Los impactos más importantes debido al incremento de la deposición del nitrógeno sobre los sistemas biológicos son:

- Efectos a corto plazo sobre especies individuales de los gases y aerosoles del nitrógeno.
- Acidificación de los suelos.
- Incrementos en la susceptibilidad a factores de stress secundario.
- Cambios en las relaciones entre las especies (competitividad) dando como resultado la pérdida de la biodiversidad.

Los efectos sobre los ecosistemas naturales y semi-naturales debido a la deposición de los compuestos

oxidados y reducidos de nitrógeno (N) presentes en la atmósfera se han detectado de diversas formas en Europa (I.T.E., 1995), principalmente por el cambio de la composición de las especies, incremento en la altura de los pastos (con declinación de la biodiversidad), desbalance nutricional y el cambio en la flora de los suelos.

El conocimiento del ciclo atmosférico del nitrógeno tiene una gran importancia por el papel que desempeñan los diferentes compuestos que lo conforman sobre la química y la contaminación atmosférica. Estos contaminantes tienen la capacidad de afectar la salud humana, diversos ecosistemas terrestres y acuáticos y al clima (Galway, 1995).

El presente trabajo aborda las características de la deposición de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico como son el NO₂, NO, NH₃ y el nitrato y el amonio presente en los aerosoles y en la lluvia desde 1986 hasta 1998, en la Estación Regional La Palma, Pinar del Río, Cuba. Se hace referencia a los posibles impactos potenciales que sobre el medio ambiente pueden

provocar. Se relacionan las concentraciones de estos elementos con los tipos de situaciones sinópticas presentes, lo cual condiciona en gran medida la región de origen de estos contaminantes.

Materiales y Métodos

Para elaborar el presente trabajo se tomaron los datos de la Estación Regional La Palma, de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, la cual se guía en lo fundamental por las metodologías recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para el muestreo y análisis químico de estos compuestos a nivel regional (W.M.O., 1986).

La estación se encuentra situada en los 22 45' de Latitud Norte y los 83 32' de Longitud Oeste y a una altura de 51 metros sobre el nivel medio del mar (NMM) y a unos 6 Km. de la costa norte. En los alrededores de la estación no existen fuentes antropogénicas importantes de contaminantes y la misma está rodeada de bosques de pinos en su porción sur y oeste. Mientras que por el norte y el este existen tierras cultivadas de caña, granos, pastos y cultivos menores.

Para el cálculo de los flujos de la deposición seca y húmeda del nitrógeno atmosférico, se convierten las concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de cada compuesto gaseoso y aerosoles en N (Nitrógeno) y para la lluvia (expresadas en mg/l) también se realizó esta conversión (Cuesta, 1995). Para los flujos de deposición seca, dada las deficiencias reconocidas para los métodos de muestreo existentes según nuestras posibilidades de equipos en la actualidad, se procedieron al cálculo utilizando la velocidad de deposición y las concentraciones obtenidas del muestreo (W.M.O., 1991). Mientras que para los flujos de la deposición húmeda se utilizaron concentraciones medias pesadas para cada año a partir de las muestras sumarias mensuales y la cantidad de lluvia. En ambas los flujos de deposición se expresan en $\text{Kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Cuesta et al., 1998).

En este caso se aplicó una forma de cálculo sencilla basada en la relación entre la concentración medida en el lugar y una velocidad de deposición determinada experimentalmente, cuya expresión matemática es:

$$F = C \cdot V_d$$

donde F representa el flujo de materia hacia la superficie, C la concentración medida y V_d la mencionada velocidad de deposición.

Para la selección de los valores de Velocidad de Deposición (V_d) se analizaron datos reportados por diferentes autores seleccionando los que más se adaptan a las condiciones climáticas de Cuba (Cuesta et al., 2000). En la Tabla 1 se muestran los valores seleccionados de velocidad de deposición (V_d) para los elementos estudiados en el presente trabajo en dependencia del tipo de compuesto, el uso de la tierra y las condiciones climáticas.

Tabla 1. Valores seleccionados de velocidad de deposición en dependencia con las condiciones climáticas y el uso de la tierra.

Elemento	Uso de la tierra	Cond. climáticas	V_d (cm/h)
NO ₃	A	a	0.5
			0.1
NH ₄	A	a	1.0
			0.3
NH ₄	B	a	0.1
			0.1

Nota: NO₃ (a) = Aerosol de Nitrato. NH₄ (a) = Aerosol de Amonio.

Para identificar los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) se utilizó la clasificación de Lapinel (1988). A continuación se realiza una breve síntesis de los tipos de situaciones sinópticas para una mejor comprensión de los resultados.

TSS-I. Referido a la cercana influencia del anticiclón del Atlántico o de las Azores- Bermudas, el cual constituye el principal centro de acción en nuestra área y es sin duda el sistema sinóptico que con mayor frecuencia influye sobre Cuba. Se considera este tipo cuando el anticiclón penetra en forma de cuña sobre toda Cuba, llegando a cubrir el Golfo de México y el SE de los Estados Unidos. El viento predominante asociado a este sistema puede ser del primero o segundo cuadrante, lo que da origen a los subtipos Ia y Ib.

TSS-II. Se corresponde con aquellas configuraciones del campo bórico que tiene lugar cuando la región central del Anticiclón del Atlántico se aleja sensiblemente de nuestras áreas, permitiendo una modificación mayor de sus características iniciales, producto de una más prolongada interacción océano - atmósfera (flujo extendido). Se consideran dos subtipos: Ia flujo extendido no perturbado y el Ib que corresponde a la influencia del sector de divergencia de ondas u hondonadas.

TSS - III. Esta situación la relacionamos con aquellas configuraciones del campo bórico que expresan una débil influencia anticiclónica o a la existencia de hondonadas, vaguadas o sistemas de bajas presiones en regiones adyacentes a nuestras áreas cercanas, por lo que las isobaras se muestran de una manera espaciada, predominando un débil gradiente barométrico.

TSS - IV. Se relaciona con el desplazamiento cercano o sobre nuestro territorio de situaciones ciclónicas, tales como depresiones, perturbaciones o huracanes.

TSS - V. Incluye todas aquellas perturbaciones o disturbios que en diferentes formas se manifiestan sobre nuestro territorio. Existen dos subtipos: el Va que comprende ondas y hondonadas que se generan y propagan en el flujo del este y el Vb que se considera extensiones meridionales de vaguadas de latitudes medias, líneas de cizalladuras entre dos altas y bajas frías.

TSS - VI. Se incluyen en este tipo las bajas extratropicales que por regla se originan en zonas troposfericas de intensa baroclinidad (frentes ártico y polar) resultantes de ondas de grandes dimensiones, ocasionalmente se originan en el Golfo de México o en regiones muy cercanas a Cuba. Existen cuatro subtipos según la forma de influencia sobre nuestro territorio.

TSS - VII. Se relaciona con los frentes fríos. A los efectos de la clasificación y en consideración a la estructura de los frentes, se consideran cuatro subtipos: el frente clásico (VIIa), el frente revesino (VIIb), el frente casi estacionario (VIIc) y el frente disipándose (VIId).

TSS - VIII. Se asocia al anticiclón continental polar de poco espesor, considerándose su profundidad en el orden 1,5 a 3 Km, aunque en ocasiones puede ser superior. Se consideran tres subtipos: cuando el centro del anticiclón continental se encuentra en la parte central del continente (VIIIa), el centro del anticiclón se encuentra al sur de los Estados Unidos y el Golfo de México (VIIIb) y cuando el anticiclón se encuentra sobre el Océano Atlántico al este de los Estados Unidos (VIIIc).

Una vez obtenida la clasificación de los tipos de situaciones sinópticas para cada día, estas se asocian con las concentraciones obtenidas para cada uno de los contaminantes estudiados y se analiza su comportamiento conociendo las características de cada TSS y la de los elementos químicos analizados.

Discusión de los resultados

Los valores promedios de la deposición total (seca y húmeda) de los principales compuestos del nitrógeno aparecen reflejados en la Figura 1 para el período de 1986 al 1998. Estos valores expresados en Kg-N. ha⁻¹. año⁻¹ muestran que en el amoníaco y el amonio en la lluvia son los valores mas altos. La potencia de las fuentes naturales emisoras de estos compuestos, la gran cantidad de precipitación producto de la ubicación geográfica de esta estación y el estar enclavada en una zona agroforestal justifican las elevadas concentraciones de estos compuestos. La producción agropecuaria es reconocida como la mayor fuente de amoníaco atmosférico en Europa y contribuye con la mitad de las emisiones de -NH₃ a nivel global (Sommer and Hutchings, 1995).

En general estos valores anuales son similares a los reportados en gran parte de Europa (NN. UU., 1991), con excepción de los centros urbanos e industriales donde la deposición en Europa es significativamente mayor. Los valores en la estación oscilan desde 12,8 hasta 24,8 Kg - N.ha⁻¹.año⁻¹ reportados en los años 1996 y 1991 respectivamente.

Figura 1. Deposición de Nitrógeno según aporte de cada elemento



Nota: NO₂ = Dióxido de Nitrógeno. NO = Monóxido de Nitrógeno. NH₃ = Amoníaco. NO₃⁻(a) = Aerosol de Nitrato. NH₄⁺(a) = Aerosol de Amonio. NO₃⁻(p) = Nitrato en la precipitación. NH₄⁺(p) = Amonio en la precipitación.

En La Palma, los valores obtenidos de los compuestos oxidados del nitrógeno (Figura 2) alcanzan el 20%, representativa de los ecosistemas boscosos del occidente de Cuba, (Cuesta et al., 1998), mientras que la deposición seca (Figura 3), de los compuestos del nitrógeno representa el 70% del total. Estos valores reflejan el gran peso que tiene el amoníaco en la deposición del nitrógeno total en nuestras condiciones tropicales. Es conocido además que el amoníaco a corto plazo neutraliza la acidez de la atmósfera, pero en los últimos tiempos se ha demostrado que a mediano y largo plazo puede producir la acidificación de los suelos y las aguas (Galoway, 1995).

Figura 2. Relación entre los compuestos del Nitrógeno



En esta estación se recibe la mayor contribución de nitrato vía la lluvia (Cuesta et al., 1998), atribuyéndose al posible traslado desde las fuentes del continente a través de las especies del nitrógeno que funcionan como reservorios del mismo en la atmósfera, como el nitrato de peroxiacetilo (Cuesta, 1995). Esta región por su tipo de suelo, clasificado como de acidez muy fuerte (pH 4,1-4,5), es muy sensible a la deposición ácida, lo que puede causar riesgos ecológicos nocivos sobre la productividad de los suelos, afectando el crecimiento de los árboles en las zonas boscosas y la productividad de algunos otros cultivos.

Figura 2. Deposición Seca y Húmeda de los compuestos del Nitrógeno



Según Cuesta, et al., (1998), el incremento en la dirección de la tendencia de los aerosoles de amonio, es causado principalmente por el uso del amoniaco como fertilizante en esta región. El nitrato y el amonio en la lluvia y los NO_x ($\text{NO}_2 + \text{NO}$) presenta una tendencia significativa al incremento de sus concentraciones. El amoniaco, por su parte presenta una tendencia al decrecimiento de sus concentraciones.

Relaciones de las Concentraciones con los Tipos de Situaciones Sinópticas

Se considera que para un mejor estudio de las características de los gases y aerosoles e inclusive de las precipitaciones asociadas a las diversas masas de aire debemos regimos por los mecanismos elementales de circulación, que constituyen un único mecanismo integrado que actúa en la atmósfera del hemisferio norte y que se caracteriza con mantener la dirección del transporte principal de masas de aire en el transcurso de 2 a 10 días y más específicamente por la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) propuestas para nuestro país (Lapinel, 1988).

Las características de las concentraciones medias diarias de los principales compuestos de nitrógeno atmosféricos estudiados según su vinculación con los TSS se reflejan en la Tabla 2. Según esta clasificación tenemos que los tres primeros tipos de TSS, los cuales reflejan la influencia del Anticiclón del Atlántico presentan valores de los compuestos gaseosos por encima del valor medio encontrado durante el periodo de estudio. Estos valores responden a la influencia de las altas temperaturas en la activación de las fuentes biogénicas y naturales asociadas a estas condiciones sinópticas.

El TSS IV que corresponde que corresponde a las situaciones ciclónicas es el que presenta las concentraciones menores, lo cual responde a las características de fuerte dispersión y limpieza por el arrastre de las impurezas por la lluvia.

El TSS V presenta uno de los mayores valores de concentración de los compuestos gaseosos sobre todo por el aporte tropical, ya que mas del 90% de su ocurrencia es en el verano, que favorece el incremento de la actividad biológica de los suelos debido a la mayor humedad de los mismos y también a la disminución de la fuerza del viento y al incremento

Tabla 2. Concentraciones medias de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico según los TSS. Estación "La Palma"

TSS	NO_2 (a)	NO_2 (p)	NH_4^+ (a)	NH_4^+ (p)	pH	NO	NO_x	% Ocur.	Observaciones	
I	2.5	0.16	0.59	0.88	0.93	5.62	1.2	2.3	7.7	Anticiclón del Atlántico
II	1.8	0.17	0.68	0.65	0.33	5.35	0.9	2.7	22.9	Anticiclón del Atlántico Alejado
III	1.9	0.20	1.00	0.76	0.53	5.61	1.0	3.4	7.5	Influencia muy débil del Anticiclón del Atlántico
IV	0.7	0.11	0.42	0.77	0.05	5.50	0.9	2.2	2.7	Situaciones ciclónicas
V	2.1	0.11	0.39	0.46	0.42	5.21	1.4	1.1	21.5	Perturbaciones o disturbios
VI	1.3	0.06	0.69	0.05	0.80	5.56	0.6	1.6	4.1	Bajas Extratropicales
VII	1.3	0.14	0.77	0.34	0.73	5.22	0.8	2.3	11.0	Frentes Fríos
VIII	1.3	0.26	0.70	1.16	0.44	5.46	0.8	2.2	22.6	Anticiclón migratorio
Trop.	1.9	0.16	0.73	0.66	0.41	5.46	1.1	2.7	60.7	Características Tropicales
Exp.	1.3	0.21	0.68	0.63	0.64	5.28	0.8	2.2	39.3	Características Extratropicales
Total	1.6	0.19	0.70	0.65	0.53	5.39	0.9	2.4	100.0	

Nota: NO_2 (a) = Aerosol de Nitrato. NH_4^+ (a) = Aerosol de Amonio. NO_2 (p) = Nitrato en las precipitaciones. NH_4^+ (p) = Amonio en las precipitaciones. pH de las precipitaciones.

de la actividad eléctrica típica de los meses del periodo lluvioso (Alfonso, 1988 y Cuesta, 1995).

En el TSS VI, bajas extratropicales, las concentraciones están por debajo del valor medio para el periodo estudiado. Mientras que los compuestos gaseosos en los TSS VII y VIII (Frentes Fríos y Anticiclón Continental) se caracterizan por presentar valores de concentraciones por debajo del promedio histórico hallado. Las causas posibles de estos valores son el aumento de la dispersión por el incremento de la fuerza del viento y su incidencia de región norte lo cual implica para esta estación la ausencia de fuentes emisoras cercanas. También la presencia de precipitaciones provoca la limpieza por lluvia (Washout).

En los tres primeros TSS asociados a la influencia de Anticiclón del Atlántico, los aerosoles del nitrato presentan poca variación y se corresponde con los valores de origen tropical. En los TSS de origen extratropical lo más notable es la presencia de las concentraciones mas altas en el TSS VIII motivado por las transformaciones químicas que se producen en la troposfera. Además como consecuencia de los procesos químicos de la troposfera es muy probable la contribución antropogénica de compuestos de nitrógeno desde las zonas industriales densamente pobladas del continente por el transporte a largas distancias a través de las masas de aire que se desplazan de norte a sur en esta época del año. Siendo el PAN (Nitrato de peroxiacetilo) con sus propiedades de reservorio temporal de NO_2 , uno de los elementos responsable en el incremento del nitrato

(aerosoles y lluvia) en los meses invernales en nuestro país.

El aerosol de amonio según los valores medios hallados en los diferentes TSS presenta los máximos valores cuando están bajo influencia del Anticiclón del Atlántico. Sobre todo cuando esta influencia es muy débil, lo cual propicia dentro de los TSS de origen tropical, que las fuentes naturales de este compuesto en esta localidad rural sean mucho más activa y que también la dispersión de estos aerosoles sea mínima, ya que es característico la poca fuerza en estos TSS. Los mínimos están asociados a TSS de origen extratropical y su explicación viene dada por la inhibición de las fuentes naturales en este período más frío y en el cual también aumenta la fuerza del viento con su poder de dispersión.

Para el caso del nitrato en la lluvia presenta las mayores concentraciones en el TSS VIII, o sea las precipitaciones provocadas bajo la influencia del Anticiclón Continental Migratorio; aspecto coincidente tratado con anterioridad sobre la posible fuente de origen antropogénico que es el Continente Norteamericano y la factibilidad del traslado desde grandes distancias de los precursores del nitrato en la lluvia.

Los valores de las concentraciones de nitratos en los tres primeros TSS coinciden con los valores hallados por Rodríguez (1991) en las lluvias de origen convectivas en esta localidad y que tiene su origen en el calentamiento local de la masa de aire subyacente.

Al comparar todos los TSS de origen tropical y extratropical no aparece una diferencia significativa entre las concentraciones del nitrato en la lluvia y en general los valores de las concentraciones se encuentran entre los rangos típicos reportados para regiones tropicales (Dash, 1987).

La caracterización de las concentraciones de los principales compuestos de nitrógeno vinculados a los TSS permiten clasificar genéticamente el origen de los contaminantes según la procedencia de las masas de aire, los resultados nos brindan características de las concentraciones que resultan de gran interés para conocer los problemas regionales de la contaminación atmosférica.

Conclusiones

Se encontró que la deposición total de estos compuestos oscila entre 12,8 y 25,0 Kg-N.ha⁻¹.año⁻¹. La deposición húmeda representa el 30% aproximadamente, mientras que la deposición seca es el 70%. Por otro lado, las formas de nitrógeno oxidado representan solamente el 20%, mientras que las formas reducidas del nitrógeno son del 80% del total.

La tendencia al aumento de las concentraciones de los compuestos oxidados del nitrógeno, puede provocar en un futuro daños potenciales a la agricultura y a los bosques de esta región, por lo

que se considera necesario mantener un monitoreo sistemático que permita su control.

Las concentraciones de nitrato en los aerosoles y la lluvia relacionadas con el Anticiclón Migratorio Continental presentan valores mayores de concentraciones al compararlos con el resto de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre nuestro territorio, por lo que se concluye que una parte de estas concentraciones están asociadas al transporte de estos contaminantes desde el continente y a los mecanismos de transformación química y fotoquímica de los mismos.

Referencias Bibliográficas

Alfonso, A (1988): Climatología de las tormentas locales severas en Cuba y fundamentos para su pronóstico. Tesis en opción al grado de Dr. En Ciencias Geográficas, 174 pp. INSMET, Matanzas.

Cuesta, O. (1995): Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geográficas, La Habana, pp. 104.

Cuesta, O.; Ortiz, P. and M. Gonzalez, (1998): Deposition and atmospheric nitrogen concentrations trend in Cuba. Journal Water, Air and Soil Pollution, 114, 163 - 167.

Cuesta, O. et al., (2000): Caracterización de la deposición de los principales compuestos gaseosos del nitrógeno y el azufre a nivel regional en Cuba. Efectos potenciales al medio ambiente. Informe Científico Técnico, pp. 89, Instituto de Meteorología, La Habana.

Dash, J.M. (1987): On the difference between sulphate and nitrate in wintertime precipitation. Atmos. Environ. 21 (1), 137-141.

Galway, J. (1995): Acid deposition: Perspectives in time and space, Water, Air and Soil Pollution, 1, 15-24.

Institute of Terrestrial Ecology I.T.E (1995): Mapping and Modelling of critical loads for nitrogen. A Workshop Report. Pp207, United Kingdom.

Lapinel, B. (1988): La circulación y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba. Tesis en opción al grado de Dr. En Ciencias Geográficas, 120 pp. INSMET, La Habana.

NN.UU. (1991): Assesment of long range transboundary air pollution. Air pollution studies No. 7. New York.

Rodríguez, A. (1991): Composición química de las precipitaciones de sistemas meteorológicos y acidez de la lluvia en Cuba. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geográficas, pp. 111. La Habana.

Sommer, S.G., and N. Hutchings. (1995): Techniques and strategies for the reduction of ammonia emission from agriculture. Water, Air and Soil Pollution, 1, 237-248.

W.M.O. (1986): Environmental pollution monitoring research programme. No. 45. WMO - Technical Document No. 151, Geneva.

W.M.O. (1991): Meeting of experts on the role of clouds in the chemistry, transport, transformation and deposition of pollutants. WMP. Report No. 17, WMO No. 448 (GEMS).

Abstract: This paper includes the analysis of Nitrogen oxides, Ammonia, nitrate and ammonium concentrations in aerosols and rainfall. According to the Kinds of Synoptic Situations (KSS), many researches about back tracks were carried out in La Palma regional monitoring station, in order to know its possible sources of origin. A result of interest has been found that the total deposition of these compounds oscillates between 12,0 and 25,0 Kg-N,ha⁻¹.year⁻¹. The wet deposition exhibits approximately 30% of this total, while the dry one is about 70%. The weight of both depositions depends of our tropical rainy climate's features. On the other hand, the oxidized nitrogen forms only give 20% of the total depositions, while the reduced ones are about 80%. These results are in accordance with the power of natural sources in accordance our climate. The nitrate's concentrations in aerosols and rainfall are connected with Continental Migratory Anticyclone, and show higher values than the concentrations in the rest kinds of synoptic situations influencing on our territory, so it can be concluded this concentrations are associated with the transport of these pollutants from the continent.

Key words: Nitrogen, Acid Deposition, Meteorological Situation.