

Deposición atmosférica de los principales compuestos del nitrógeno en bosques tropicales, La Palma, Cuba

Atmospheric deposition of nitrogen main compounds in tropical forests, La Palma, Cuba

Dr. Osvaldo Cuesta Santos | osvaldo.cuesta@insmet.cu | Centro de Contaminación y Química Atmosférica

Dr. Antonio Wallo Vázquez | wallo@patrimonio.ohc.cu | Planetario, Oficina del Historiador de la Ciudad

Dra. Rosemary López Lee | rosemary.lopez@insmet.cu | Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera

Lic. Ángel Maren Vázquez | alain.maren@grm.insmet.cu | Centro Meteorológico Provincial de Granma

Recibido: febrero 6, 2014; aceptado: abril 1ro., 2014

Resumen

La deposición ácida y los efectos directos de los gases contaminantes del aire están causando graves daños a los ecosistemas boscosos. Se realizó el monitoreo de los principales compuestos atmosféricos del nitrógeno en la Estación para la Vigilancia Atmosférica Global (VAG), en La Palma, Cuba, con vistas a obtener su deposición atmosférica. Se aprecia una variación que oscila entre 13,3 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ y 44,8 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ en el período 1985-2008; asimismo, se comprobó que las formas oxidadas de nitrógeno representan alrededor de 25 % y la deposición húmeda depende de las características de las precipitaciones de nuestro clima tropical. El NH₃ y el amonio son los elementos más importantes en nuestras condiciones tropicales; algunos de los compuestos del nitrógeno presentan una tendencia al aumento de sus concentraciones; además, las deposiciones de estos compuestos vía la atmósfera producen efectos en la retroalimentación de fenómenos, tales como la acidez de los suelos y la atmósfera. Por todo lo anterior, se recomienda mantener un monitoreo sistemático e integrado para conocer los posibles daños a la agricultura y los bosques.

PALABRAS CLAVE: Deposición ácida, deposición atmosférica, compuestos oxidados del nitrógeno, bosques, Cuba.

Abstract

The acid deposition, as well as the direct effects of the air pollutant gases is causing serious damages to the forest ecosystems. The nitrogen principal compounds were monitored at the Station for the Global Atmospheric Watch (GAW), in La Palma, Cuba, to obtain the atmospheric deposition of the principal compounds of the nitrogen. It is appreciate changes from 13,3 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ to 44,8 kg-N.ha⁻¹.año⁻¹ during the years 1985 to 2008. The result was that the nitrogen oxidant forms represent about 25 % and the humid deposition depends on the characteristics of the precipitations of our tropical climate. The NH₃ and ammonium are the most important elements in our tropical conditions. Some of the nitrogen compounds present trend to increase of concentrations. Also the depositions of these compounds via atmosphere produce effects in the feedback of phenomena as the acidity of soils and the atmosphere. To recommend to maintain a systematic and integrated moni-

toring, to know the possible damages to the agriculture and the forests.

KEYWORDS: Acid deposition, atmospheric deposition, nitrogen oxidant forms, forests, Cuba.

Introducción

En la actualidad, muchas de las actividades antropogénicas ponen en peligro el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas naturales y seminaturales dados sus efectos sobre las especies endémicas de animales y plantas. En las últimas décadas, uno de los peligros principales es el incremento de la contaminación atmosférica por los compuestos del nitrógeno; los impactos más importantes causados por este aumento sobre los sistemas biológicos son los siguientes:

1. Efectos a corto plazo sobre especies individuales de los gases y aerosoles del nitrógeno.
2. Acidificación de los suelos.
3. Incrementos en la susceptibilidad a factores de estrés secundario.
4. Cambios en las relaciones entre las especies (competitividad) que, como resultado, provocan una pérdida de la biodiversidad.

Los efectos sobre los ecosistemas naturales y seminaturales por la deposición de los compuestos oxidados y reducidos de nitrógeno (N) presentes en la atmósfera se han detectado de formas diversas en Europa (ITE, 1995; Lorenz *et al.*, 2006; EEA, 2008), principalmente, dado el cambio en la composición de las especies, el incremento en la altura de los pastos (con declinación de la biodiversidad), el desbalance nutricional y el cambio en la flora de los suelos.

El conocimiento del ciclo atmosférico del nitrógeno posee gran importancia por el papel que desempeñan los diferentes compuestos que lo integran

sobre la química y la contaminación atmosférica. Estos contaminantes tienen la capacidad de afectar la salud humana, los diversos ecosistemas terrestres y acuáticos, y el clima (Galoway, 1995; IPCC, 2007; ICP Forests, 2007).

El presente trabajo aborda las características de las concentraciones y deposiciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico (NO₂, NO, NH₃, el nitrato y el amonio) presentes en los aerosoles y en la lluvia, de 1985 a 2008, en la Estación Regional La Palma (Pinar del Río, Cuba), representativa de las características de un ecosistema boscoso tropical (Cuesta, 1995; Cuesta *et al.*, 1998). Se hace referencia a los posibles impactos potenciales que estos compuestos pueden provocar sobre el medio ambiente.

Materiales y métodos

Para elaborar el presente trabajo se tomaron los datos de la Estación Regional La Palma y 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 el análisis químico de estos compuestos a nivel regional (WMO, 1986 y 2004).

1. La estación (Fig. 1) se encuentra situada en los 22° 45' 59'' de latitud norte y los 83° 33' 41'' de longitud oeste, en el municipio de La Palma, en la parte este de la provincia de Pinar del Río, a una altura de 51 m sobre el nivel medio del mar (NMM) y a 6 km de la costa norte. En sus alrededores de la estación no existen fuentes antropogénicas importantes de contaminantes; está rodeada de bosques de pinos en sus porciones sur y oeste, mientras que por el norte y el este existen tierras cultivadas de caña,

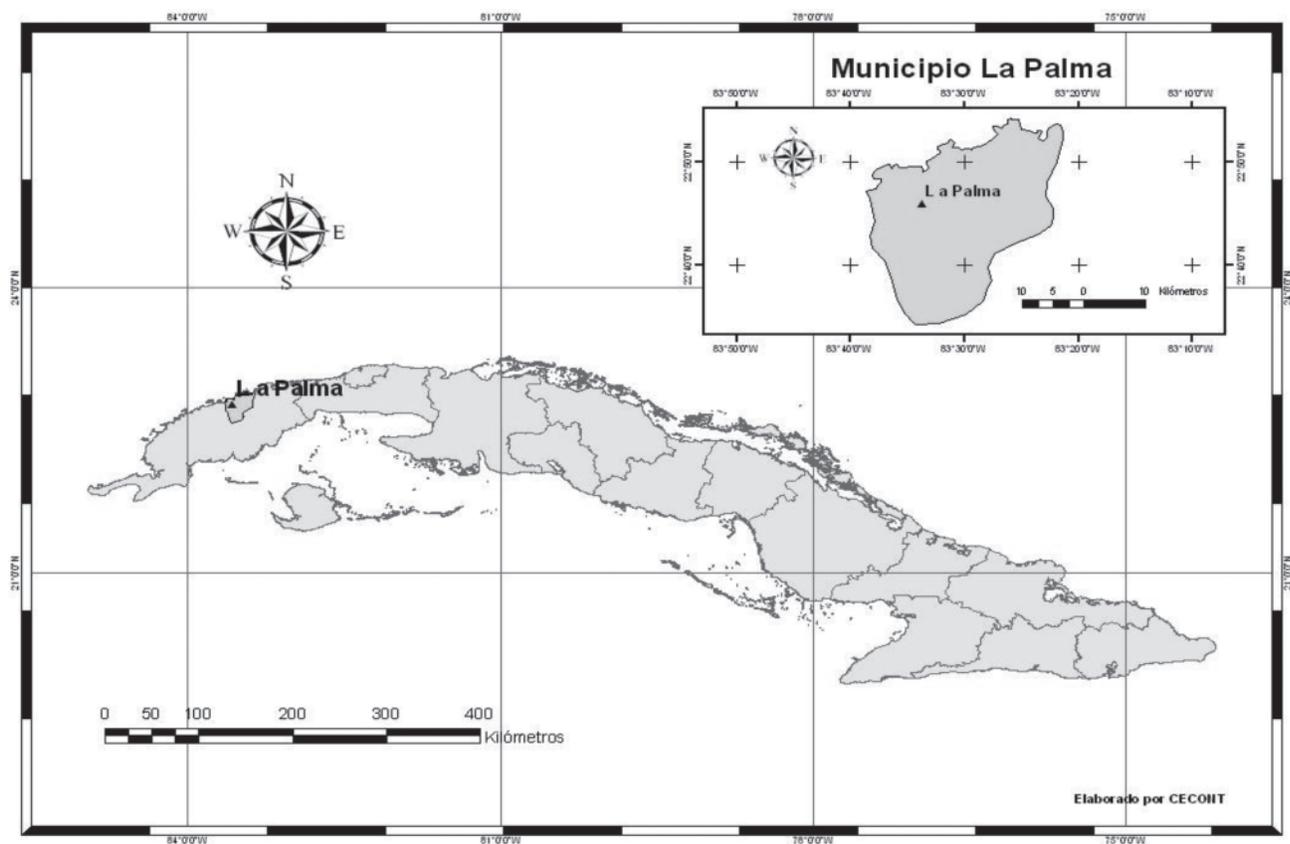


Fig. 1 Ubicación de la Estación de La Palma, Cuba.

granos, pastos y cultivos menores. Se considera representativa del ecosistema boscoso de la región occidental de Cuba (Cuesta *et al.*, 2006).

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); asimismo, en el caso de la lluvia (expresadas en mg/l) se realizó esta conversión (Cuesta, 1995; Cuesta *et al.*, 2006). Para los flujos de deposición seca, dadas las deficiencias reconocidas en los métodos de muestreo existentes, según nuestras posibilidades de equipos actuales, se procedió al cálculo utilizando la velocidad de deposición y las concentraciones obtenidas del muestreo (WMO, 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 can-

tidade de lluvia. En ambos, los flujos de deposición se expresan en $\text{kg-N. ha}^1.\text{año}^1$ (Cuesta *et al.*, 1998 y 2001).

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 la siguiente:

$$F = C \cdot V_d$$

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

Para la selección de los valores de velocidad de deposición (V_d) se analizaron los datos reportados por diferentes autores, y se escogieron los que más se adaptan a las condiciones climáticas de Cuba (Loblod and Erisman, 1992; Holland *et al.*, 1996; López *et*

al., 1998; Cuesta *et al.*, 2001 y López, 2007). La tabla 1 muestra los valores seleccionados para la velocidad de deposición (V_d) de 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 para la velocidad de deposición, según las condiciones climáticas y el uso de la tierra

Elementos	NO ₂	NO	NH ₃	NO ₃ (a)	NH ₄ (a)
Velocidad de deposición (cm/s)	0.2	0.15	0.3	0.2	0.2

Nota: NO₃(a) = Aerosol de nitrato; NH₄(a) = Aerosol de amonio.

Discusión de los resultados

Caracterización de las concentraciones

Las figuras 2, 3 y 4 muestran los valores de las concentraciones medias mensuales para los compuestos de nitrógeno estudiados encontrados en la estación rural de La Palma (período 1985–2008). Para el NO₂, estos oscilan entre 0,2 µg/m³ y 7,2 µg/m³, con un valor medio de 1,4 µg/m³, similares a los hallados en localidades alejadas de fuentes potentes.

Algunos estudios realizados en zonas rurales de Australia (Ayers *et al.*, 1995) reportan valores anuales para el NO₂ entre 1.6 µg/m³ y 2.8 µg/m³. Estas estaciones rurales no presentan un ciclo estacional evidente, mientras que las estaciones que poseen cierta influencia urbana exhiben concentraciones entre dos y cuatro veces más altas, y un ciclo estacional donde ocurren las máximas concentraciones en el invierno.

En el trópico, el comportamiento regional de las fuentes de los óxidos de nitrógeno es menos intenso que el provocado por la quema de los combustibles fósiles en las latitudes medias; las fuentes principales son la quema de la biomasa, la actividad biológica de los suelos y las descargas eléctricas (Logan, 1983; Levine *et al.*, 1984; Cuesta, 1995). Ciertas mediciones en áreas rurales de los Estados Unidos muestran valores medios en superficie desde 0,3 µg/m³ a 20,3

µg/m³ (Johansson *et al.*, 1988), pero se aprecia que las concentraciones en las localidades más cercanas a las ciudades son mayores. Para zonas rurales en Inglaterra y Japón se obtuvieron resultados similares (Martin y Barber, 1984; Fukino *et al.*, 1984). En Suecia, para localidades alejadas de fuentes contaminantes, estas cifras oscilan entre 1,3 µg/m³ y 6,8 µg/m³ (Grennfelt, 1984; Hinrichsen, 1985).

Los valores encontrados para el NO y el amoniaco en Cuba son equivalentes a los reportados en zonas rurales de clima subtropical de Europa y los Estados Unidos, donde el amoniaco presenta concentraciones en el rango de 1,0 a 10,0 µg/m³ y el NO muestra valores entre 0,1 µg/m³ y 6,0 µg/m³; los máximos ocurren en verano y las concentraciones son superiores sobre el continente que sobre los océanos. Para el trópico, en regiones rurales, estos compuestos poseen un comportamiento semejante (Galoway, 1995). Los valores encontrados en el presente estudio muestran que el NO en La Palma fluctúa entre 0,1 µg/m³ y 7,0 µg/m³, mientras que las concentraciones medias mensuales del amoniaco se encuentran entre 0,2 µg/m³ y 15,4 µg/m³.

El comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico en la Estación de La Palma no presenta contrastes grandes (Fig. 2), aunque se manifiestan dos máximos de concentraciones para los óxidos de nitrógeno: uno al final del período poco lluvioso (posiblemente, asociado al incremento de incendios forestales y la quema de biomasa, de forma natural o provocada) y otro asociado al período lluvioso, en junio y julio, cuando la lluvia y las altas temperaturas deben incentivar las fuentes biológicas de los suelos, además del incremento de las descargas eléctricas (Cuesta *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2008), que resultan una fuente importante de óxidos de nitrógeno en el trópico húmedo.

El comportamiento del amoniaco muestra que las concentraciones mayores ocurren en el período lluvioso, en el cual son máximas la temperatura y la

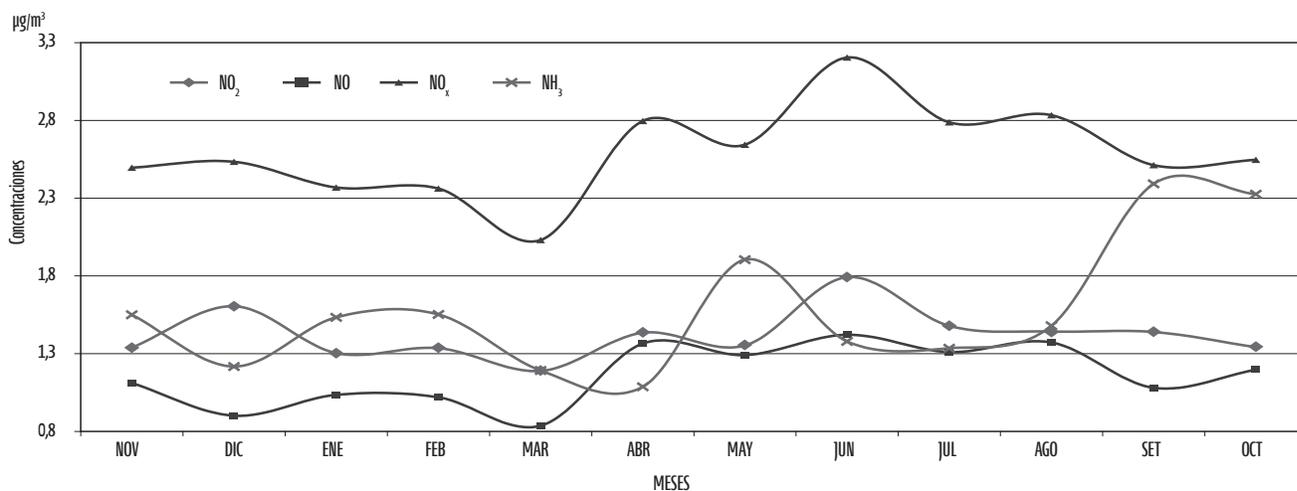


Fig. 2 Marcha anual de las concentraciones de los compuestos gaseosos del nitrógeno. Período 1985-2008.

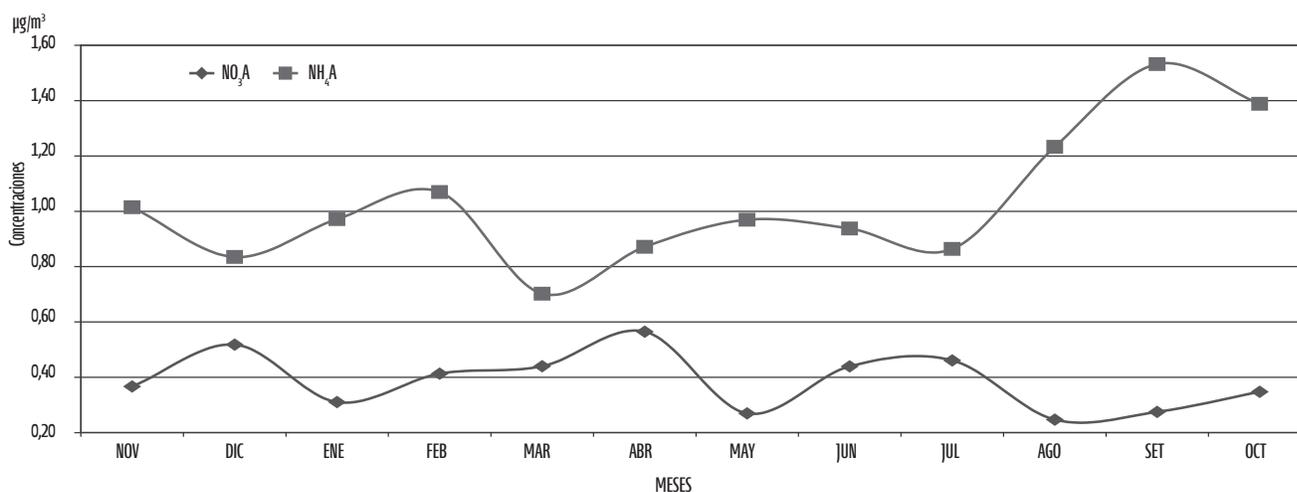


Fig. 3 Marcha anual de las concentraciones de los aerosoles de nitrógeno. NO₃-(a) como aerosol de nitrato y NH₄-(a) como aerosol de amonio. Período 1985-2008.

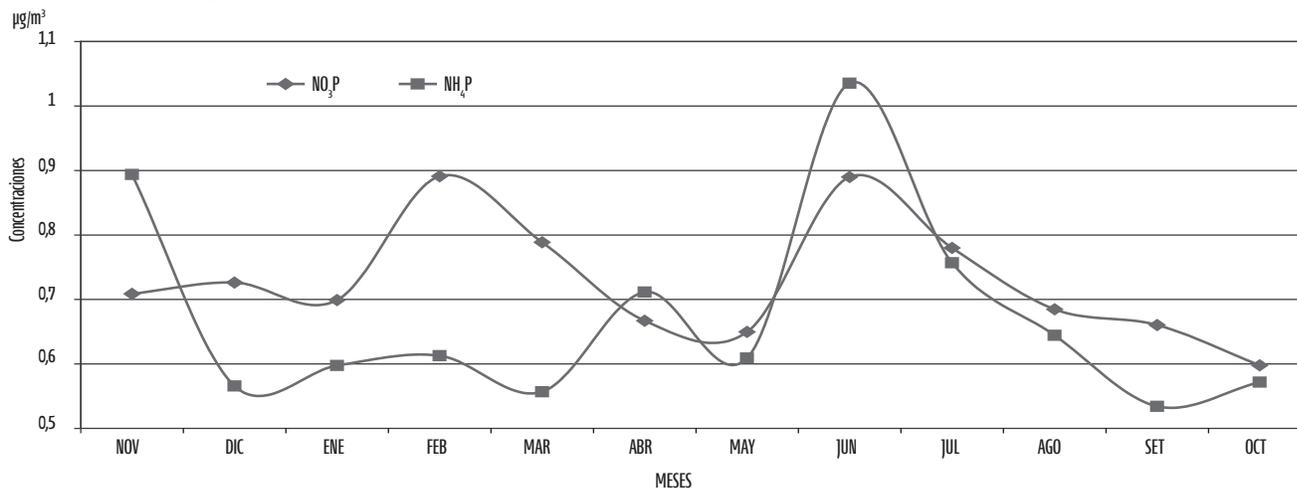


Fig. 4 Marcha anual de las concentraciones de los compuestos del nitrógeno en las precipitaciones. NO₃-(p) como nitrato en la precipitación y el NH₄-(p) como amonio en la precipitación. Período 1985-2008.

humedad relativa, y se produce el máximo durante mayo. Posteriormente, durante agosto a octubre, el amoníaco aumenta paulatinamente.

Las concentraciones de los aerosoles de nitrato (Fig. 3) presentan un comportamiento similar al NO_x, aunque con menos contraste entre sus valores, mientras que el amonio también refleja un comportamiento análogo respecto al amoníaco, pero el máximo de inicios del período lluvioso (mayo) no es tan marcado como el de su precursor. Estos valores se asemejan a los reportados por Prospero y Jennings (1996 y 1997) para el Atlántico Norte, sobre todo para Barbados e Izaña (0,53 µg/m³ y 0,77 µg/m³). Por su parte, Bermudas y Miami (1,49 µg/m³ y 1,87 µg/m³) exhiben valores más altos, lo cual se corresponde con una mayor influencia continental y antrópica en estas localidades.

El comportamiento del nitrato en la lluvia (Fig. 4) ha reflejado dos máximos. El primero, durante febrero y marzo; esta característica se mantiene reportada para las décadas de los ochenta y los noventa del siglo xx, según Cuesta (1995), Cuesta *et al.* (2000) y Cuesta *et al.* (2006), atribuyéndose al posible traslado desde las fuentes del continente mediante las especies del nitrógeno que fungen como reservorios de este en la atmósfera, tales como el nitrato de peroxiacetilo (PAN), y el arribo frecuente de masas de aire desde el norte del continente en esos meses. El segundo máximo es durante los meses lluviosos de junio y julio; este último máximo es común para el amonio, que también presenta un máximo durante noviembre.

Los valores mensuales del nitrato en la lluvia oscilaron entre 0,06 mg/l y 4,75 mg/l, con un valor medio de 0,73 mg/l. Algunos valores reportados recientemente por López R. *et al.* (2008) muestran cifras similares para el nitrato en el período 2006–2007.

La presencia del amonio en la lluvia se debe a la actividad bacteriana de los suelos, y pasa a la atmósfera en forma gaseosa (NH₃) y en aerosoles, donde,

para formar el sulfato de amonio, reacciona, principalmente, con el azufre de origen antrópico, uno de los elementos que provocan la acidez de la lluvia. En correspondencia con el aumento de la actividad bacteriana, el máximo ocurre en mayo a agosto. El valor medio del amonio en las precipitaciones en el período estudiado fue de 0,67 mg/l y los valores medios mensuales oscilan de 0,07 a 7,94 mg/l. Asimismo, en reportes recientes, para el caso del amonio, en el período 2006–2007, según López, R., *et al.*, (2008), los valores reportados en La Palma fueron muy superiores, y se destacaron valores altos en el período lluvioso.

Caracterización de las deposiciones

La figura 5 presenta, para el período 1985–2008, los valores anuales (expresados en kg–N.ha⁻¹.año⁻¹) de la deposición total (gases, aerosoles y lluvia) de los principales compuestos del nitrógeno [NO_x (NO₂+NO), NH₃, NO₃⁻(a)] como aerosol de nitrato, NH₄⁺ (a), como aerosol de amonio, NO₃⁻(p), como nitrato en la precipitación y, por último, el NH₄⁺ (p) como amonio en la precipitación. Se observa un valor medio anual de 24,1 kg–N.ha⁻¹.año⁻¹. El valor mínimo (13,3 kg–N.ha⁻¹.año⁻¹) ocurrió en 1996, fundamentalmente, a causa de la presencia de amoníaco baja, lo cual pudo estar asociado a condiciones climáticas y de una explotación agroforestal baja, dado que ese año la economía nacional sufrió una crisis económica profunda. El valor máximo (44,8 kg–N.ha⁻¹.año⁻¹) durante 2001 estuvo asociado a la alta presencia de amoníaco y aerosoles de amonio en la atmósfera, dadas las condiciones de humedad alta en los suelos y la utilización de fertilizantes nitrogenados en los cultivos cercanos a la estación.

La potencia de las fuentes naturales emisoras de estos compuestos, la gran cantidad de precipitación causada por la ubicación geográfica de esta estación y el hecho de estar enclavada en una zona agrofore-

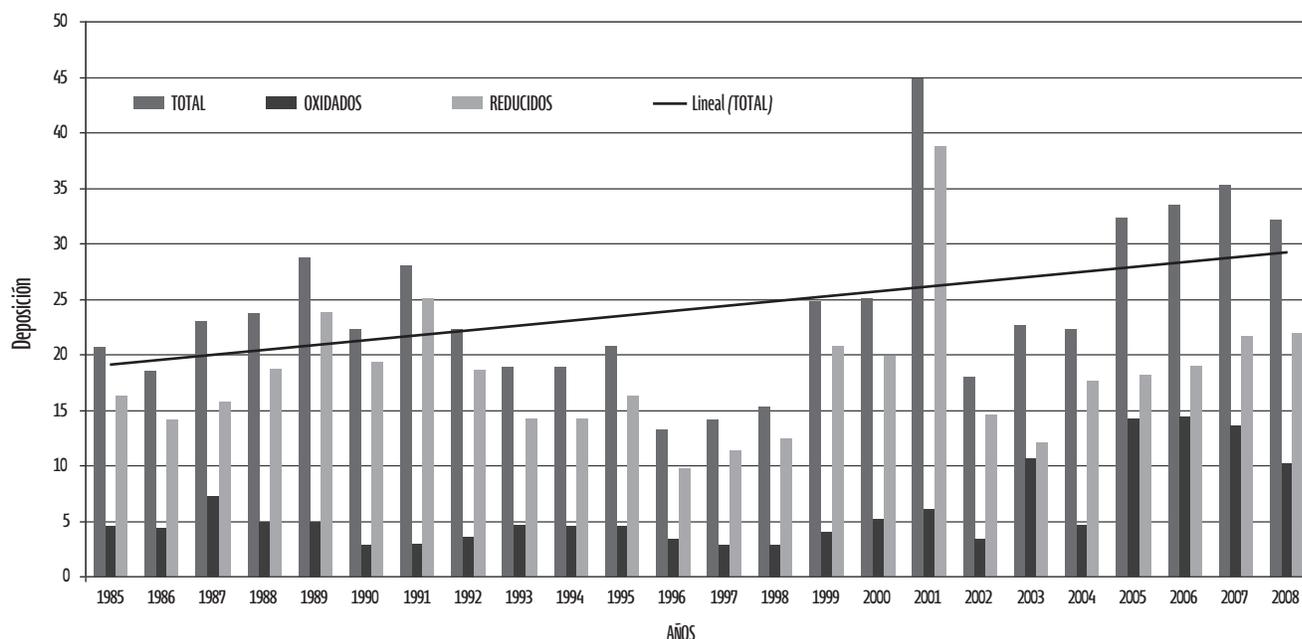


Fig. 5 Deposiciones anuales totales de los principales compuestos de nitrógeno atmosférico (oxidados y reducidos), expresadas en $\text{kg-N.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$.

tal, justifican las concentraciones elevadas para estos compuestos. La producción agropecuaria se reconoce como la mayor fuente de amoníaco atmosférico en Europa (Fischer R., *et al.*, 2007) y contribuye con la mitad de las emisiones de NH_3 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; EEA, 2008), con excepción de los centros urbanos e industriales, donde la deposición es significativamente mayor en Europa.

Al analizar la razón entre los compuestos reducidos y oxidados de nitrógeno en el período estudiado, se observa que, en los años iniciales de este siglo, los compuestos oxidados han cobrado mayor peso y, en general, estos representan 25 % de la deposición total (Fig. 6). La Estación de La Palma, por su ubicación geográfica, puede considerarse representativa de los ecosistemas boscosos del occidente de Cuba (Cuesta *et al.*, 1998) y esta región, por su tipo de suelo, clasificado como de una acidez muy fuerte (pH 4,1-4,5), es muy sensible a la deposición ácida, lo cual puede causar riesgos ecológicos nocivos sobre la productividad de los suelos y, por ende, afectar el crecimiento de los

árboles en las zonas boscosas y la productividad de otros cultivos.

Estos valores, asimismo, reflejan el gran peso que tiene el amoníaco en la deposición del nitrógeno total en nuestras condiciones tropicales. Además, se conoce que, a corto plazo, el amoníaco neutraliza la acidez de la atmósfera, pero, en los últimos tiempos, se ha demostrado que a mediano y largo plazos puede producir la acidificación de los suelos y aguas (Galoway, 1995).

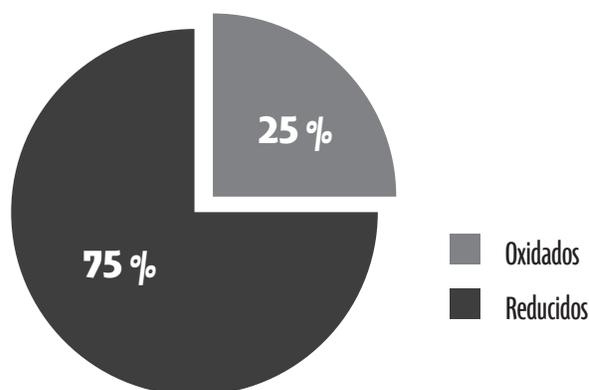


Fig. 6 Relación entre los compuestos oxidados y reducidos de nitrógeno.

La determinación de tendencias actuales al incremento de la deposición (Sánchez, 2001; Cuesta *et al.*, 2006) de compuestos de azufre y nitrógeno en el país, así como la identificación de áreas vulnerables a la deposición ácida (López *et al.*, 1998), identifican a este proceso como un factor de potenciación para la ocurrencia de impactos negativos en ecosistemas forestales, en particular, para algunas zonas de Camagüey a Matanzas y en Pinar del Río, donde existen áreas cuya vulnerabilidad a la deposición ácida ha sido probada. Este resultado indica, además, la necesidad de realizar estudios detallados que permitan conocer el comportamiento actual de la deposición y sus consecuencias para ciertas especies en esos ecosistemas.

Las serias secuelas que tienen las deposiciones de nitrógeno sobre la estabilidad y la biodiversidad en ecosistemas europeos, han motivado diversos estudios con miras a conocer las “cargas críticas” para el nitrógeno. La carga crítica depende de los manejos pasado y presente, el tipo de ecosistema y las condiciones de los suelos. En varios talleres internacionales

en Europa, se ha sugerido valores de carga crítica para ecosistemas diversos, los cuales podrían ayudar a evitar cambios en la composición de especies, el desbalance nutricional y los excesos de lixiviación de nitrato (Tabla 2). Puede observarse que la carga crítica para los ecosistemas más sensibles está entre 5 kg N ha⁻¹año⁻¹ y 20 kg N ha⁻¹año⁻¹. Aún no se sabe en qué medida estos valores puedan aplicarse en otras regiones, como las tropicales (Kulynsterna *et al.*, 1995 y Nordin *et al.*, 2005). Sería interesante señalar en otras regiones las áreas sujetas a deposiciones de nitrógeno mayores que 5 kg N ha⁻¹ año⁻¹, 10 kg N ha⁻¹ año⁻¹ o 20 kg N ha⁻¹ año⁻¹, con la finalidad de estimar de alguna manera los riesgos a los ecosistemas (SEI, 1998; McDowell, 1988). Asimismo, los valores de deposición de los compuestos del nitrógeno encontrados en la Estación de La Palma son similares o superiores a los reportados en Europa, donde, al superarse la carga crítica para el nitrógeno, se advierten efectos nocivos en diversos ecosistemas.

Los suelos y aguas superficiales se están acidificando sobre extensas áreas de Europa y Norteamé-

TABLA 2

Estimados de cargas críticas para diferentes tipos de vegetación en Europa a partir de observaciones empíricas e investigaciones experimentales

Tipos de vegetación	Carga crítica (kg n ha ⁻¹ año ⁻¹)	Criterio
Bosques de coníferas ácido, manejado	10-25	Lixiviación de nitrato/cambio en la flora
Bosque caducifolio ácido, manejado	15-20	Cambios en la flora
Bosque caducifolio calcáreo	15-20	Cambios en la flora
Brezal en sitio bajo	15-22	Transición de brezal a gramíneas
Pastizal rico en especies, ácido, bajo	7-20	Descenso en la abundancia de especies sensibles
Brezal ártico/alpino	5-15	Descenso en líquenes y musgos y aumento de gramíneas
Pastizales ricos en especies, calcáreos	14-25	Descenso en diversidad y aumento de gramíneas altas
Pastizales ricos en especies, neutros	20-30	Descenso en diversidad y aumento de gramíneas altas
Pastizales montanos/subalpinos	10-15	Descenso en diversidad y aumento en gramíneas altas
Lagos poco profundos, agua suave	5-15	Descenso en la abundancia de especies sensibles
Pantanos ombrotroficó	15-20	Descenso en musgos típicos y aumento de gramíneas
Paramos en alturas	15-20	Descenso en vegetación de ericáceas

Fuente: Stockholm Environment Institute (1998).

Nota: El intervalo de carga crítica representa, tanto la variación entre ecosistemas, como la incertidumbre en los valores de carga crítica.

rica. Estos cambios en el suelo y la química del agua superficial conducen a impactos sobre el crecimiento de las plantas y han dañado la abundancia de peces. La acidificación está implicada como uno de los factores más importantes en el deterioro forestal extenso experimentado en Europa y Norteamérica, el cual comienza a observarse, solamente ahora, con más frecuencia en Asia. Aunque los mecanismos son relativamente complejos, las investigaciones han logrado grandes avances en el conocimiento acerca de que las emisiones de azufre y nitrógeno pueden conducir a la acidificación de ecosistemas en países en desarrollo. Se han encontrado algunas evidencias de estos fenómenos en China. Las implicaciones de la acidificación para el desarrollo forestal, la producción de cultivos sobre suelos ácidos, la biodiversidad y la abundancia de peces son importantes y requieren una atención mayor en los países en desarrollo.

Por tanto, los valores de deposición de los principales compuestos del nitrógeno encontrados en la Estación de La Palma pueden estar provocando, potencialmente, efectos en la acidificación de las aguas superficiales (embalses y lagos), los suelos y bosques. Los estudios acerca de los efectos producidos por la deposición ácida deberán realizarse integrada y armónicamente entre los diversos especialistas relacionados con la protección del medio ambiente y los recursos naturales, puesto que es el único modo de preservar el equilibrio ecológico y la biodiversidad requerida por el planeta Tierra.

Conclusiones y recomendaciones

Los valores para el NO_2 oscilan entre $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor medio de $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, similares a los encontrados para localidades alejadas de fuentes potentes. Asimismo, los valores encontrados muestran que el NO fluctúa entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

mientras que las concentraciones mensuales medias para el amoniaco se encuentran entre $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El comportamiento de los compuestos gaseosos del nitrógeno atmosférico en la Estación de La Palma no presenta contrastes grandes. Se manifiestan dos máximos de concentraciones para los óxidos de nitrógeno: uno al final del período poco lluvioso (posiblemente, asociado con el incremento de incendios forestales y la quema de biomasa, de forma natural o provocada) y otro máximo asociado al período lluvioso, en junio y julio, donde la lluvia y las temperaturas altas deben incentivar las fuentes biológicas de los suelos. El comportamiento del amoniaco muestra que las mayores concentraciones ocurren en el período lluvioso, cuando la temperatura y la humedad relativa son máximas.

Las concentraciones para los aerosoles de nitrato y amonio encontrados presentan un comportamiento similar al de sus precursores (NO_x y NH_3), y los valores del nitrato se asemejan a los reportados por Prospero y Jennings para el Atlántico Norte, mientras que para el aerosol de amonio, los valores encontrados en La Palma son ligeramente superiores.

Los valores mensuales del nitrato en la lluvia oscilaron entre $0,06 \text{ mg}/\text{l}$ y $4,75 \text{ mg}/\text{l}$, con un valor medio de $0,73 \text{ mg}/\text{l}$, mientras que el valor medio del amonio en las precipitaciones en el período estudiado fue de $0,67 \text{ mg}/\text{l}$ y los valores medios mensuales estuvieron entre $0,07 \text{ mg}/\text{l}$ y $7,94 \text{ mg}/\text{l}$.

La deposición total de los compuestos principales del nitrógeno mostró un valor medio anual de $24,1 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, y oscilan entre un mínimo de $13,3 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, ocurrido en 1996, y un máximo de $44,8 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, en 2001. Además, las formas de nitrógeno oxidado representan, aproximadamente, 25 %, mientras que las formas reducidas del nitrógeno aportan alrededor de 75 % del total, lo cual refleja la potencia de las fuentes naturales de acuerdo con las características tropicales de nuestro clima.

Los valores de deposición de los compuestos principales del nitrógeno hallados en la Estación de La Palma pueden estar provocando efectos nocivos potenciales en la acidificación de las aguas superficiales (embalses y lagos), los suelos y bosques.

Por tanto, se recomienda mantener un monitoreo sistemático e integrado para conocer los daños posibles a la agricultura y los bosques de esta región.

Agradecimientos

Un agradecimiento a los trabajadores de la Estación de La Palma: Felipe Sánchez Rodríguez, Luís Felipe Sánchez Oquendo, Leonila Oquendo Sánchez, Adelys Mirabal Ramos, Carlos Reyes Díaz, Anabel Pérez Cruz y Liudmila Torres Ávila, por su trabajo en el monitoreo sistemático relacionado con la contaminación atmosférica a nivel regional.

Referencias bibliográfica

Álvarez L; R. Manso; R. Álvarez; I. Borrajero, 2008: Distribución espacial de las tormentas eléctricas en la provincia de Pinar del Río y su relación con los incendios forestales. Estudio de caso. *Memorias del V Simposium Internacional sobre Manejo Sostenible de los Recursos Forestales SIMFOR 2008*, Universidad de Pinar del Río, Cuba, abr. 2008, ISBN 978-959-16-0655-6, E:\fsccommand\Ponencias\T03_Fuego\t3_20.pdf.

AYERS, G. P. *et al*, 1995: «Deposition of acidic species at rural location in New South Wales, Australia», *Water, Air and Soil Pollution*, 85: 2089-2094.

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, 104 pp.

CUESTA, O, ORTIZ, P. AND M. GONZALEZ, 1998: 'Deposition and atmospheric nitrogen concentrations trend in Cuba', *Water, Air and Soil Pollution*, 114, 163-167.

CUESTA, O, M. GONZÁLEZ, P. ORTIZ Y A. COLLAZO, 2000: 'Repercusiones ecológicas de los compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba', *Rev. Cub. Met*, vol. 7, no. 1, pp. 55-54.

CUESTA-SANTOS, O, A. COLLAZO, A. WALLO, R. LABRADOR, M. GONZALEZ AND P. ORTIZ, 2001: Atmospheric nitrogen compones deposition in su mid tropic-Cuba. *TheScientificWorld e-journal*, ISSN1532-2246, www.thescientificworld.com. 2001.

CUESTA SANTOS, O.; A. COLLAZO, M. GONZÁLEZ AND A. WALLO, 2006: Humid and dry nitrogen deposition via atmosphere in three hydrographic basins in Cuba. *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts*, Proceedings of the Fifth Friend World Conference held at Havana, Cuba, nov, 2006, IAHS Publication, 308, pp. 591-595.

EEA, 2008: European forests-ecosystem conditions and sustainable use. EEA Report no. 3/2008, pp. 110, European Environment Agency, Kongens Nytorv 6, 1050, Copenhagen K, Denmark, ISSN 1725-9177.

FISCHER, R, MUES, V, ULRICH, E, BECHER, G. AND LORENZ, M, 2007: 'Monitoring of atmospheric deposition in European forests and an overview on its implication on forest condition', *Applied Geochemistry* 22: 1129-1139.

FUKINO, H, MIMURA, S, INOVE, K. AND YAMANE, Y, 1984: 'Correlations among atmospheric elements airborne particulate matter, benzene extracts, benzo(a)pyrene, NO, NO₂ and SO₂ concentrations in Japan', *Atmospheric Environmet*, vol. 18, no. 11.

GALOWAY, J, 1995: 'Acid deposition: Perspectives in time and space', *Water, Air and Soil Pollution*, 1, 15-24.

HOLLAND, E. A. *et al*, 1996: «The spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and its impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems», *Jour-*

- nal of Geophysical Research*, vol. 102, no. D13, pp. 15849–15866.
- HINRICHSEN, D, 1988: 'Multiple pollutants and forest decline', *Ambio*, 15: 258–265.
- ICP FORESTS, 2007: *Forest Condition in Europe: 2007. Technical Report of ICP Forests*, 70 pp, <http://www.icp-forests.org/>, accessed mar, 2008.
- IPCC, 2007: 'Summary for Policymakers', in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S, Qin, D, Manning, M. *et al*, eds, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 18 pp.
- INSTITUTE OF TERRESTRIAL ECOLOGY, ITE, 1995: *Mapping and Modelling of critical loads for nitrogen. A Workshop Report*. 207 pp, United Kingdom.
- JOHANSSON, C, RODHE, H, AND SANHUEZA, E, 1988: 'Emission of NO in tropical savanna and cloud forest during the dry season', *J. Geophys. Res*, 93: 7180–7192.
- KULYNSTERNA, J. C. I, H. CAMBRIDGE, S. CINDERBY AND M. J. CHADWICK, 1995: 'Terrestrial ecosystem sensitivity to acidic deposition in developing countries', *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 85, no. 4, pp. 2319–2324.
- LEVINE, J. S, T. R. AUGUSTSSON, I. C. ANDERSON, J. M. HOELL AND D. A. BREWER, 1984: 'Tropospheric sources of NO_x: Lightning and biology', *Atmospheric Environment*, vol. 18, no. 9, pp. 1797–1804.
- LOGAN, J. A, 1983: 'Nitrogen oxides in Troposphere: Global and regional Budgets', *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, no. C15, pp. 10785–10807.
- LÓPEZ C, GONZÁLEZ M, CUESTA O, SÁNCHEZ P, COLLAZO A, WALLO A, MANSO R, IMBERT C, MOREJÓN L. E. Y MORENO E, 1998: *La deposición acida atmosférica a nivel regional en Cuba y su contribución al riesgo de los ecosistemas terrestres*. Informe técnico, INSMET, La Habana, Cuba.
- LÓPEZ, C., M. GONZÁLEZ, A. COLLAZO, A. WALLO, L. MOREJÓN Y E. MORENO. (1998): *La deposición acida atmosférica a nivel regional en Cuba y su contribución al riesgo de los ecosistemas terrestres*. Informe técnico, INSMET, La Habana, Cuba.
- LÓPEZ, C. (2007): *Introducción a la gestión de la calidad del aire*. Publicación electrónica, 752 pp., La Habana, Cuba.
- LÓPEZ LEE R., M. MARTÍNEZ GÁNDARA, O. CUESTA SANTOS Y M. ÁLVAREZ PRIETO (2008): *Estudio regional de la acidez de la lluvia en Cuba*. Memorias de la Convención Internacional Trópico 2008 (publicación electrónica), ISBN, 978-959-282-079-1, Ciudad de la Habana, 16–20 de junio de 2008.
- LÖVBLAD, G. AND ERISMAN J. (1992): "Deposition of nitrogen in Europe", in P. Grennfelt and E. Thornelof (edits.). Proc. *On Critical loads for nitrogen*, Report no. Nord 1992:41, Lokeberg, Sweden, 6–10 April 1992, Nordic Council of ministers, Copenhagen, Denmark.
- LORENZ, M., FISCHER R., BECHER G., MUES V., SIEDLING W., KRAFT P. AND NAGEL D. H. (2006): *Forest Condition in Europe*. 2006. Technical Report, UNECE, Geneva.
- MARTIN, A. AND BARBER F.R. (1984): "Acid gases and acid in rain monitored for over 5 years in a rural east central England", *Atmos. Environ*, 18 (9), 1715–1724.
- MCDOWELL, W. H. (1988): "Potential Effects of Acid Deposition on Tropical Terrestrial Ecosystems", in: *Acidification in tropical Countries*, H. Rodhe and R. Herrera (eds), SCOPE 36, John Wiley and Sons, Ltd., 405 pp.
- NN.UU. (1991): *Assesment of long range transboundary air pollution*. *Air pollution studies*, no. 7, New York.
- NORDIN, A., STRENGBOM J., WITZELL J., NASHOLM T. AND ERICSON L. (2005): "Nitrogen deposition and the biodiversity of boreal forests: Implications for the nitrogen critical load", *Ambio*, vol. 34, no. 1, pp. 20–24.

PROSPERO, J. M., S. G. JENNINGS (1996): “The Atmospheric/Ocean Chemistry Experiment: AEROCE. IGAC Activities”, *News Letter*, no. 7, dec., 3-7.

_____ (1997): “The Atmospheric/Ocean Chemistry Experiment: AEROCE. Global Change”, *News Letter*, no. 29, mar., 9-12.

SÁNCHEZ, P. (2001): “Deposición seca de SO₂ en diferentes regiones de Cuba. Comportamiento y efectos potenciales”, *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 8, no. 1, ISSN 0-864-151-X.

SEI (1998): *Contaminación atmosférica regional en los países en desarrollo. Documentos de apoyo para los diálogos de acción política, América Latina*, editado por J. Kuylerierna, K. Hichs y R. Herrera, Stockholm Environment Institute, Sweden, 134 pp.

SOMMER, S. G. AND HUTCHING, N. (1995): “Techniques and strategies for the reduction of ammonia emission from agriculture”, *Water, Air and Soil Pollution*, 1, 237-248.

WMO (1986): Environmental pollution monitoring research programme, no. 45. WMO, Technical Document, no. 151, Geneva.

_____ (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).

_____ (2004): Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme-Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures, WMO TD, no. 1251, Geneva.