

Variabilidad del contenido total de ozono en el Caribe

Ismael Pomares Ponce

Roberto Aroche Ramírez

Mayda Castellanos Bravet

Belkys Figueroa Martín

Mirtha Martínez Mugarra

Centro Meteorológico de Camagüey

Carretera a Nuevitas Km 71/2

E-mail ismael@met.cmw.inf.cu

Resumen

Las fluctuaciones naturales del ozono incluyen las escalas sinópticas y subsinópticas, las variaciones anuales y semianuales y también aquellas variaciones relacionadas con la Oscilación Cuasibienal (OCB), los efectos regionales del ENOS, la influencia de las erupciones volcánicas y el ciclo de la actividad solar. Pero el contenido total de ozono está determinado fundamentalmente por los procesos de transporte y no por los procesos fotoquímicos. Con el fin de estudiar la variabilidad en el Caribe se emplearon los datos de ozono medidos por el TOMS a su paso sobre varias localidades situadas en el área de estudio comprendidas entre los 5° y los 30°N. Además, se utilizan datos con un paso de rejilla de 1 x 1.25° con los valores medios mensuales de ozono obtenidos como promedio de las mediciones de ozono diarios, a escala global, del satélite TOMS para la zona de estudio. También se analiza la relación entre la oscilación cuasibienal y la actividad solar.

Introducción

El conocimiento de la distribución y de la cantidad de ozono (y la variabilidad en el ozono total) en la troposfera y la estratosfera es importante debido al rol fundamental que juega el ozono en varios problemas medioambientales. Primeramente, el ozono, mediante la absorción y emisión de la radiación solar y terrestre, contribuye significativamente a la distribución de la temperatura en la atmósfera y al

forzamiento radiativo del sistema troposfera-estratosfera. En segundo lugar, la cantidad total de ozono en la atmósfera es el principal factor que determina la cantidad de radiación ultravioleta biológicamente dañina sobre la superficie terrestre y los procesos fotoquímicos en la troposfera. Por último, cerca de la superficie terrestre el ozono es un oxidante dañino para el hombre, los animales y la vegetación, también, contribuye a la degradación de los materiales fabricados por el hombre e influye en los procesos fotoquímicos que tiene lugar en la troposfera.

La destrucción del ozono como producto de la actividad antropogénica ocasiona daños a la salud y a la biosfera, debido al incremento de los rayos ultravioleta sobre la superficie terrestre. Por tal motivo el control de las emisiones de sustancias agotadoras de la capa de ozono constituye el objetivo del Protocolo de Montreal y sus enmiendas y tiene como meta alcanzar para mediados del presente siglo los niveles de ozono existente en los años 80. Sin embargo, surgen nuevas condiciones en la atmósfera que pondrían en peligro semejantes anhelos, como son el incremento del vapor de agua en la estratosfera que condiciona el enfriamiento de la misma y favorecen los procesos de destrucción del ozono (Rosenlof et. al., 2001, SPARC, 2000), también están las sustancias emitidas por los aviones de alto techo de vuelo que interaccionan con el ozono (IPCC, 2001), a esto se une la política del gobierno estadounidense de no firmar el protocolo de Kyoto que regula la emisión de gases de efecto invernadero, muchos de los cuales son sustancias agotadoras de la capa de ozono.

El ozono es un constituyente traza particularmente importante, a pesar de su poca abundancia en la atmósfera. Se origina como producto de los procesos fotoquímicos que tienen lugar por encima de los 25 Km y alcanzan la estratosfera baja y la troposfera mediante procesos de mezclamiento. Debido a que absorbe la radiación fuertemente en la zona ultravioleta (UV) del espectro es responsable del debilitamiento de la radiación solar entre los 200 y 300 nm, he impide de esta forma que los dañinos rayos UV alcancen la superficie terrestre. La energía absorbida es la fuente principal de la energía térmica es la estratosfera superior dando origen a la configuración característica de esta capa. El ozono también juega un papel importante en la transferencia de energía en el infrarrojo especialmente en la estratosfera alta. En la estratosfera baja, donde forma la llamada capa de ozono, es

Tabla 1. Locaciones seleccionadas para el presente estudio.

Locación	Latitud	Longitud
Paramaribo	5.9°N	55.0°W
Balboa	8°55'N	79°33'W
Caracas	10°30'N	66°55'W
Kingston	17°55'N	76°46'W
México	19°19'N	99°10'W
Guadalajara	20°40'N	103°19'W
Camagüey	21°4'N	77°85'W
Habana	23°07'N	82°22'W
Islas Viequez	18°00'N	67°00'W
Everglades	25°23'N	80°40'W
Miami	25°46'N	80°11'W
Gainesville	29°23'N	82°11'W
Miami	25°46'N	80°11'W

transportado de los trópicos a latitudes medias y altas por medio de la circulación Brewer-Dobson.

Numerosos trabajos se han realizado para analizar la variabilidad del ozono. Como es conocido, las fluctuaciones naturales del ozono incluyen las escalas sinópticas y subsinópticas, las variaciones anuales y semianuales y también

aquellas variaciones relacionadas con la Oscilación Cuasibienal (OCB), los efectos regionales del ENOS, la influencia de las erupciones volcánicas y el ciclo de la actividad solar.

Bojkov y otros, 1990, emplea datos del Hemisferio Norte de estaciones Dobson reevaluadas para analizar la tendencia estacional multianual del ozono empleando modelos de regresión múltiple. De esta manera determinan la influencia de la QBO, la actividad solar, además del efecto de las pruebas nucleares sobre el ozono.

Angel y Korshover, 1973, hacen énfasis en las variaciones multianuales del ozono y la influencia de la QBO empleando datos de numerosas estaciones situadas en las latitudes altas, medias y bajas.

Bojkov, 1987, Bronnimann et al, 2000, Hoseinian, 2000, Shiotani y Hasebe, 1994 emplean diversas técnicas para analizar las variaciones del ozono, empleando ya bien datos de estaciones o del satélite, también relacionan el ozono con factores dinámicos como los índices de circulación (Bronnimann et al, 2000).

Materiales y métodos

Los datos del contenido total de ozono empleados en este estudio consiste en las series temporales de las medias mensuales de ozono total en una rejilla de 1° x 1.25° derivados de los valores diarios de la columna total de ozono obtenidos de las

mediciones de los instrumentos TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) sobre 3 plataformas satelitales (Nimbus7, Meteor3 y Earth Probe). Las mediciones del TOMS comenzaron en noviembre de 1978 y se dispone de datos enrejillados de ozono hasta diciembre de 1999. Existe un período de varios meses con faltantes provocado por la inexistencia de satélites de la serie TOMS entre 1994 y 1996. También se emplearon las series cronológicas de las medias mensuales del ozono total obtenidos de los valores diarios del TOMS a su paso sobre varias locaciones seleccionadas para el presente estudio, los datos se extienden hasta diciembre del 2000 y las localidades seleccionadas aparecen en la Tabla 1. Estas localidades fueron seleccionadas de manera tal que se encontraran situadas dentro de un cinturón latitudinal de cada 5°

La región seleccionada para el presente estudio es el Gran Caribe, definida como la región que incluye los estados de los litorales del Golfo de México, el Mar Caribe y las áreas del océano Atlántico que se extienden al sur de los 30°N y hasta las 200 millas náuticas de aquellos estados. (UNEP, 1999).

Debido a que las variaciones del ozono están íntimamente relacionadas con la circulación atmosférica, se tuvo en consideración la definición anterior pero se escogió un área mucho más extensa y se limita a la región comprendida entre los 5 y 55°N y los 40 y 120°W.

Las variaciones anuales cuasi periódicas en el ozono atmosférico son provocadas parcialmente por el ciclo solar de 11 años, la oscilación cuasibienal (OCB) en la estratosfera ecuatorial y las oscilaciones de la temperatura del mar en el Pacífico ecuatorial. Existen otras fuentes de variaciones en el ozono, que aún no están totalmente reconocidas, algunas de ellas se relacionan con variaciones de la temperatura y la composición química de la estratosfera baja.

Los datos de las oscilaciones bienales del viento zonal en los 30 hPa que son utilizados en el presente estudio fueron aportados por la Universidad Libre de Berlín y fue construida en base a los reportes del viento zonal de varias estaciones situadas en la zona ecuatorial (Isla Guan, Singapur y Canton Island). En dicho estudio, realizado por Naukjkot, 1986, se demostró que no habían diferencias

significativas entre los valores medidos en una u otra estación, hecho que permitió rellenar los faltantes de la serie del viento zonal en varios niveles.

Para determinar la influencia del ciclo solar de 11 años se emplea la serie de las medias mensuales del flujo solar en los 10.7cm.

Analisis de los resultados

Variación diaria

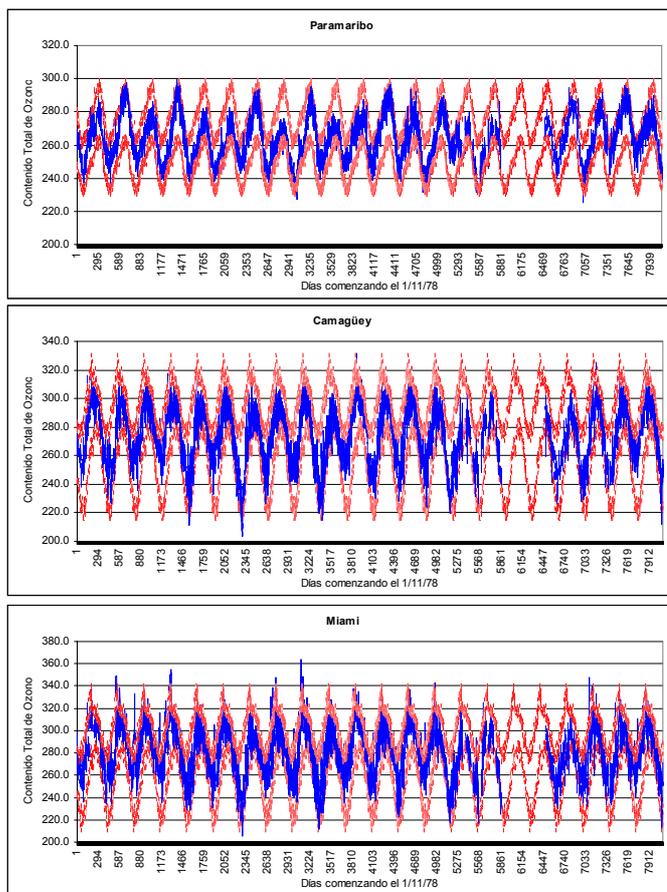


Figura 1. Serie temporal diaria de la cantidad de ozono total para tres de las localidades seleccionadas en el presente estudio. Las líneas rojas indican la desviación estándar de 2σ .

En la estratosfera alta solo existe una pequeña porción de ozono, por lo que las variaciones del ozono total están determinadas por las variaciones que tienen lugar en la estratosfera baja. En esta región el ozono posee un tiempo de vida de cerca de un año, tiempo mucho mayor que el necesitado por el aire para transportarse de un lugar a otro. Dicho tiempo se incrementa gracias a la protección del ozono de las capas superiores que no permiten el paso de la totalidad de la radiación ultravioleta. Por tal motivo, la cantidad de ozono en

cualquier sitio esta determinada por los procesos de transporte y no por los procesos fotoquímicos. La variabilidad del ozono a escala diaria o semanal es debida, directa o indirectamente al paso de los sistemas sinópticos que tienen lugar en la troposfera e influyen en la estratosfera baja. Estos sistemas actúan sobre la columna de ozono transportando los flujos de aire estratosféricos vertical y latitudinalmente, cuyo curso habitual es zonalmente simétrico (Atkinson,

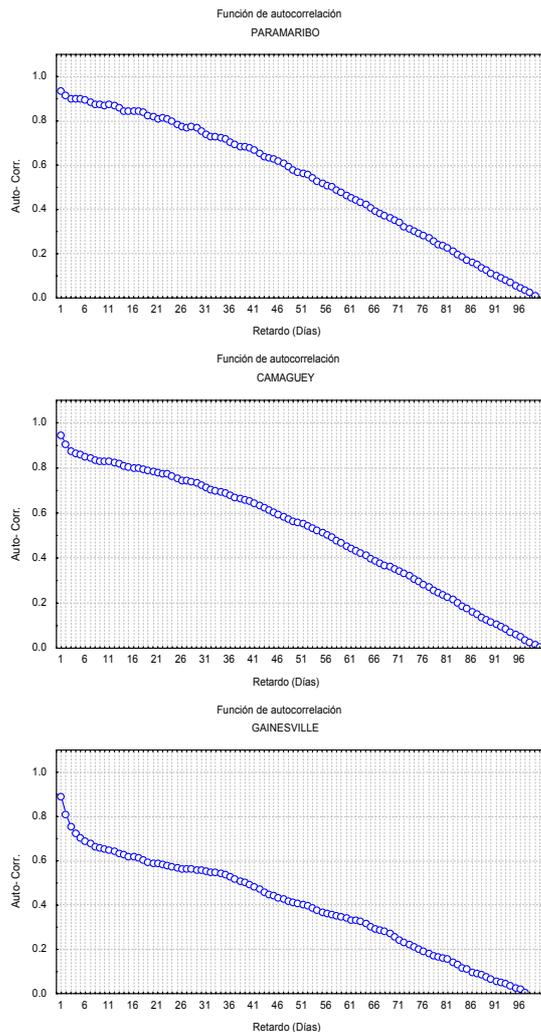


Figura 2. Función de autocorrelación como una muestra de la persistencia de las variaciones diarias para las localidades seleccionadas

1996). En las regiones cercanas al ecuador, el impacto de semejantes sistemas es menor que en las regiones cercanas a la zona extratropical, donde irrumpen con mayor frecuencia los sistemas sinópticos provenientes de la zona extratropical y tienen su mayor influencia durante el período invernal.

Para ilustrar las variaciones a corto plazo del ozono total en diferentes localidades, la Figura 1 muestra la serie temporal diaria del ozono total desde el 1 de noviembre de 1978 hasta el 31 de diciembre del 2000 para tres de los sitios seleccionados en el presente estudio. Las locaciones se encuentran entre los 5.9°N (Paramaribo) y los 29.39°N (Gainesville). Las líneas rojas en la figura representan $\pm 2\sigma$ de los valores medios de ozono para cada uno de los 365 días del año. Como puede

apreciarse en las latitudes más bajas el ozono medido, raramente presenta anomalías que sobrepasen los 2σ en una u otra dirección, no ocurre así a medida que vamos ganando en latitud y ya para el caso de Gainesville son frecuentes la aparición de este tipo de anomalías. Semejante comportamiento no es más que un reflejo de la influencia de los sistemas sinópticos y de la circulación atmosférica en las regiones cercanas a la extratropical como se ha indicado anteriormente.

Las variaciones día a día raramente exceden el 10% en los trópicos (Atkinson, 1996, Chapman y Pomares, 2000) y alcanzan su mayor valor en las regiones situadas más al norte. Estas variaciones, aunque pequeñas con relación a las que ocurren en latitudes más altas, deben tenerse en cuenta cuando se estudia el impacto de la radiación UV, tomando en consideración que los niveles en los trópicos son mucho

mayores que los que se alcanzan en las latitudes medias y altas, en el ecuador cerca del 30% de los rayos UVB entran en la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre, mientras que en las latitudes altas, la cantidad puede variar de cerca de un 30% en días muy claros de verano hasta un 10% en los días nublados invernales (Hengeveld, 1991).

Como característica principal se observa un incremento del contenido total de ozono a medida que nos alejamos al ecuador, hecho ya destacado por Dobson luego de realizadas las primeras mediciones de ozono en los años 20 (Ozone Science, 1997). A diferencia de las latitudes altas y medias donde el máximo de ozono ocurre en la primavera y el mínimo en otoño, en la zona de estudio como parte de la zona tropical los máximos ocurren en verano, desplazándose, en latitudes cercanas a los 30°N, a la primavera. El mínimo siempre ocurre en los meses invernales.

El ciclo diario se superpone al ciclo estacional, las fluctuaciones en períodos cortos pueden ser altas, así las diferencias entre el máximo y el mínimo dentro de un mes pueden ser superiores a las variaciones estacionales, en resumen, la magnitud de los cambios día a día pueden ser elevados y en ocasiones exceden el rango anual de los valores medios mensuales.

Las variaciones pequeñas que predominan en el ozono señalan a una memoria corta del sistema controlador. La memoria del sistema no es más que la persistencia, la cual es un parámetro importante empleado en la predicción (Chen y Núñez, 1998). Para obtener una visión de la persistencia, la función de autocorrelación es calculada con un desfase de hasta 100 días. La Figura 2 muestra dicha función vs. el tiempo de retardo. Se observa un decrecimiento paulatino de la correlación, con los valores más altos a los pocos días de retardo. Como promedio la correlación se mantiene elevada por un período superior a los 40 días donde alcanza un valor situado entre 0.6 y 0.68 para las localidades situadas entre los 5 y aproximadamente los 25°N, más al norte, para el caso de Gainesville la correlación de hasta 0.6 se alcanza a los 18 días. Esto nos indica que la persistencia en los trópicos puede ser empleada con gran éxito en el pronóstico del campo de ozono, además subraya la importancia de la escala mensual en términos de la persistencia.

Variación estacional del ozono

Analizando el comportamiento mensual multianual, como características fundamentales se observan gradientes cerrados de ozono desde los meses de diciembre a abril. Indicativo que durante estos meses el transporte de ozono del ecuador a las latitudes altas es mayor, lo que en parte explica los valores mínimos que se observan en los meses de enero, febrero y en ocasiones diciembre. Hasta aproximadamente los 15°N el campo de ozono presenta gran homogeneidad, prácticamente durante todos los meses, en esta zona se alcanza un máximo de ozono en agosto y mínimos en enero, en la zona restante los máximos de ozono van desplazándose para los meses precedentes, así por ejemplo a los 30°N el máximo se alcanza en mayo. Otra característica importante es que sobre el territorio de la América Central se observan centros de bajo contenido de ozono relativo que se acentúan en los meses de septiembre y octubre luego prácticamente desaparecen en abril para aparecer en agosto. Sobre esta región, en México y parte de los EE.UU. se observa una depresión en el campo de ozono similar a la reportada por Da Silva en América del Sur (Da Silva, 2001) y que debe estar originada por las mismas causas explicadas en ese trabajo. En los meses de julio a octubre el campo de ozono se hace irregular, hecho que debe estar relacionado con particularidades de la circulación atmosféricas que tienen lugar en estos meses. Particularmente, en el mes de julio el campo del ozono total sufre variaciones significativas con respecto a los meses anteriores, las variaciones se mantienen hasta el mes de noviembre, donde comienza a aparecer cierta regularidad. Durante estos meses el gradiente de presión se desordena notablemente, aunque el ozono alcanza valores elevados y máximos con respecto a los meses restantes. Semejante situación puede explicarse por los cambios en la circulación de la atmósfera que ocurren en el mes de julio donde la circulación zonal sufre una reestructuración colosal, la cual se expresa en un continuo debilitamiento, exceptuando al máximo de los estes en el Caribe Central que alcanza su mayor magnitud de aproximadamente 13 m/s. Los estes ocupan la mayor parte de la región en análisis, extendiéndose hasta los 35°N. Sin embargo, tal ocupación no es regular como sucede con los oestes, pues los flujos del este se discretizan en celdas mesoescales de diferente intensidad e incluso alternando con celdas de circulación del oeste (Aroche et. al., 2002).

Ya en el mes de noviembre aparecen atisbos de regularidad que se incrementan en los meses subsiguientes. Las isolneas fuertemente latitudinales que aparecen en los meses de enero a abril, en los 30-35°N esta condicionada por la aparición e intensificación de las corrientes en chorro durante estos meses.

Con el fin de estudiar la variabilidad del ozono se calculó el coeficiente de variación (CV) multianual (Isaev, 1977) para cada mes (Figuras 4 y 5), se deduce que entre los 5 y 30°N el CV raramente sobrepasa el 10%, en los mapas las isolneas aparecen cada 1%, pero cada mes tiene sus particularidades específicas. En enero aparece un centro de alta variabilidad al NE de Cuba incluyendo su región central y oriental que esta asociado a la presencia de una vaguada situada en esa zona y que se extiende al NE, limitada por el Anticiclón extendido del Atlántico y el Anticiclón Migratorio sobre América del Norte. Un centro con poca variabilidad se encuentra asociado al anticiclón extendido del Atlántico, mientras que otro un poco menos fuerte se encuentra asociado al Anticiclón situado sobre el continente. En el mes de febrero persiste y se acentúa ligeramente el centro de variabilidad mínima sobre Arizona y Nuevo México, al igual que el centro que aparece al E del Mar Caribe. Mientras que el centro de variabilidad máxima se desplaza hacia América Central (desde el sur de México hasta Panamá) y dicha variabilidad representa un 10%. En esta zona esta presente una vaguada que atraviesa Honduras y Nicaragua, mientras al oeste se encuentra desarrollada una vaguada más profunda. Sobre el continente y al E del Mar Caribe predominan centro de altas presiones. En los meses subsiguientes el centro de mínima variabilidad situado al E del Mar Caribe persiste con una intensidad más o menos débil y siempre asociado a la presencia del Anticiclón del Atlántico, con la única excepción del mes de noviembre en que dicho centro desaparece y en su lugar se muestra por debajo de los 30°N un débil gradiente del CV. Un centro de alta variabilidad aparece al W centrada en los 40°N y que parece estar asociado a la fuerte vaguada que se extiende paralela a las costas de México desde los 110°W. Como se puede apreciar existe una relación inversa entre la variabilidad y los sistemas sinópticos predominantes, así asociado a las altas presiones se encuentra poca variabilidad en el ozono, una mayor estabilidad en el comportamiento del contenido total de ozono, mientras que con la presencia de bajas presiones hay una mayor inestabilidad en el campo del ozono.

Efectos de la OCB en el total de ozono.

La OCB es el rasgo más prominente de la variabilidad de la circulación ecuatorial estratosférica caracterizada por la alternancia de la fase este y oeste del viento zonal medio con un período medio entre los 27 y 28 meses y una amplitud máxima entre los 70 y 10 hPa. Esta oscilación afecta no solo al viento y la estructura térmica en el ecuador sino también al calentamiento de la estratosfera y al transporte de los gases traza, como el ozono, hasta las regiones polares (Bojkov, 1987, Labitzke y Van Loon, 1988).

Bojkov y Fioletov (1996) describen un esquema idealizado del mecanismo que relaciona las variaciones del ozono y la OCB, según el cual, cuando los vientos zonales ecuatoriales se encuentran en la fase este en los 30-50hPa (20-24 Km) el movimiento ascendente se incrementa desde esta capa (y la subsidencia debajo de ella) ocurre sobre las latitudes tropicales y subtropicales del hemisferio norte. Esta divergencia vertical produce deficiencia en el ozono total. Al mismo tiempo, en las cercanías del ecuador hay subsidencia en la región superior (donde el tiempo de relajación del ozono es relativamente corto y la razón de mezcla es alta) a la capa de 30-50 hPa (donde el tiempo de relajación es grande), causando un incremento en el ozono total. Durante la fase oeste el proceso es contrario y provoca un incremento en el ozono sobre los subtropicos y un decrecimiento en la región

Para determinar la relación entre el ozono y la OCB se aplicó un modelo de correlación múltiple.

$$Y_t = \sum_{i=1}^{12} \mu_i I_{it} + \sum_{i=1}^{12} \beta_i I_{it} R_t + \sum_{n=1}^k \xi_n \Theta_{n,t} + N_t$$

t-indica el índice del mes contado desde el inicio de las observaciones, i indica el mes del año (i=1 para enero, i=12 para diciembre), Y_t es la cantidad de ozono medio para el mes t, μ_i es el ozono total medio para el mes i (el promedio de todos los meses i de los años en el período considerado), $I_{it}=1$ si el mes t se corresponde con el mes i del año, en caso contrario es 0, β_i es la tendencia del mes i del año, R_t es una función de rango lineal, $R_t=(t-t_0)/12$ si $t > t_0$ y 0 si $t \leq t_0$, t_0 se corresponde con octubre de 1978, $\Theta_{n,t}$ es una variable explicativa (valores mensuales medios), ξ_n , $n=1\dots k$, son los coeficientes asociados a $\Theta_{n,t}$, N_t es el resto, término autocorrelativo, $N_t=\Phi_1 N_{t-2}+\Phi_2 N_{t-1}+\varepsilon_t$, donde $\varepsilon_t=N(0,1)$.

Las series previamente fueron desestacionalizadas y la tendencia sustraída. La variación del ozono se obtuvo a partir de los coeficientes de la ecuación de regresión múltiple analizada anteriormente (1) para el caso de la OCB. En primer lugar se observa que para las estaciones situadas al sur de los 10°N se encuentran en fase con la OCB lo contrario ocurre para el resto de las estaciones. La variación de la oscilación cuasibienal para dichas localidades no supera las 3 UD y se va incrementando a medida que nos acercamos a las latitudes bajas y no superan las 5 UD para el caso de Camagüey, mientras que para Gainesville puede llegar a los 14 UD. Como se puede apreciar se manifiesta una fuerte dependencia latitudinal ya apreciada anteriormente.

Del análisis de las series temporales del ozono total se puede determinar que para ciertos períodos se presentan una serie valores significativamente diferentes de ozono. Estas diferencias se hacen más notables durante el período invernal. Por ejemplo para el caso de Camagüey esta particularidad aparece durante el invierno y la primavera de 1982/83, 1984/85, 1987/88, 1992/93 y 1993/94, donde se reportaron anomalías negativas con valores superiores a 16 UD para una media de -0.1 UD y la desviación estándar de 7.9 UD. Si observamos el comportamiento de las anomalías del ozono y de la OCB se distingue que las mayores anomalías negativas del ozono ocurren por lo general, con un cierto retardo, posterior al cambio de fase de la OCB de los este a los oeste y mientras que las mayores anomalías positivas se corresponden con fase oeste de la OCB.

Para explicar la relación entre el contenido total de ozono y la OCB manifestada en el presente trabajo nos referiremos al campo bórico estratosférico. La oscilación cuasibienal del viento zonal está determinada por los cambios temporales de la posición de los centros de altas presiones localizados en la estratosfera de la zona subtropical. La fase este del viento zonal se observa en los años en que se manifiestan fuertemente en la estratosfera las anticiclones subtropicales, mientras que durante la fase oeste los anticiclones subtropicales se desarrollan débilmente y aparece desarrollado el ciclón a escala latitudinal. Cuando las fases este y oeste están bien desarrolladas se manifiestan períodos con flujos zonales estables en la estratosfera ecuatorial, casi con ausencia total de transporte meridional. Al parecer, por esta causa se puede explicar que en las locaciones situadas por debajo de los 10°N el ciclo cuasibienal en el contenido total de ozono se manifiesta más

débilmente que en las locaciones situadas mas al norte. Estas ultimas locaciones se encuentran bajo la influencia de los anticiclones en la periferia de los cuales se lleva a cabo el intercambio de masas de aire entre las zonas tropicales y las extratropicales.

En los periodos de cambio de fase de la OCB en la estratosfera tropical la zonalidad de los vientos disminuye lo que provoca el aumento del intercambio de ozono entre los trópicos y la zona extratropical. Al cambiar la fase de la OCB de la oeste a la este el intercambio de ozono entre ambas zonas disminuye debido al fortalecimiento de la influencia anticiclónica. Esto se confirma por el aumento del contenido total de ozono en los trópicos durante este período. Al cambiar de la fase este a la oeste la circulación del viento zonal el transporte de ozono a la zona extratropical se incrementa y al siguiente año, durante la fase oeste el ciclo cuasibienal, el contenido total de ozono en los trópicos resulta menor que en el año anterior. El transporte de ozono hacia las latitudes medias ocurre fundamentalmente durante el invierno, etapa en la que predominan los oestes.

Relación actividad solar con el contenido total de ozono.

Los cambios en la actividad solar en el transcurso del tiempo se manifiestan en el ozono total global así como en las regiones templadas y tropicales.

La contribución de la actividad solar en el ozono total constituye 4 UD como promedio. La actividad solar en el total de ozono es significativa solo en los trópicos (WMO, 1999), aunque algunos autores han expresado sus dudas al respecto. Para buscar la conexión entre la actividad solar y el total de ozono teniendo en cuenta la OCB emplearemos el análisis de correlación lineal entre el ozono y la actividad solar según las fases de la OCB.

En la actualidad es difícil de explicar físicamente como la transición del máximo al mínimo solar puede cambiar el signo de la influencia de la OCB en el ozono. Sin embargo, esta claro que la influencia de la actividad solar no puede ser directa y probablemente ella ocurra como resultado de los cambios en la circulación.

En las tablas se demuestra que la correlación entre la actividad solar y el ozono depende de la fase de la OCB. Para las estaciones situadas por debajo de los 10°N (Caracas, Balboa y Paramaribo) las mayores correlaciones significativas se alcanzan en la fase oeste, considerando todo el año. En el caso de la fase este las

correlaciones también son significativas aunque menores en valor. Para el resto de las localidades las correlaciones son significativas, aunque pequeñas en magnitud, solo para las estaciones situadas más al norte (Miami, Gainesville y Everglades) y para la fase este de la OCB. Para esta fase existe una correlación inversa para la mayoría de las estaciones situadas por encima de los 10°N.

Las Tablas 3 y 4 muestran que la que la influencia de la actividad solar sobre el ozono depende de las estaciones de año según la fase de la QBO, así la dependencia es mayor en los meses de verano durante la fase oeste, mientras que en el caso de la fase este las mayores dependencias aparecen en el período invierno primavera.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre el ozono y el flujo solar de 10.7 cm para la fase oeste de la OCB

Locaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Paramaribo	.20	-.14	.19	.25	.42	.98	.98	.89	.97	.89	.75	.34	.67
Balboa	-.13	.03	.10	-.11	.17	.96	.98	.91	.87	.70	.65	.49	.56
Caracas	.05	.07	.08	-.26	-.35	.85	.97	.92	.84	.59	.60	.09	.47
Kingston	-.21	.29	-.18	-.40	-.80	.93	.77	.93	.75	.06	.34	-.10	.26
Viequez	-.10	.29	.02	-.37	-.81	.92	.73	.94	.74	.04	.55	-.03	.26
Mexico	-.36	.47	.02	-.48	-.59	.99	.75	.93	.64	-.12	.21	-.24	.15
Camagüey	-.21	.31	-.24	-.20	-.82	.91	.48	.88	.67	-.01	.11	-.24	.14
Habana	-.19	.27	-.11	-.15	-.82	.82	.41	.89	.70	.05	.02	-.27	.12
Everglades	-.14	.22	-.22	-.04	-.72	.53	.25	.82	.69	-.03	-.09	-.23	.08
Miami	-.13	.20	-.22	-.04	-.73	.43	.20	.78	.72	-.01	-.11	-.23	.07
Guadalajar.	-.31	.42	.02	-.32	-.75	.92	.80	.90	.65	-.08	.19	-.24	.15
Gainsville	-.19	-.10	-.14	.13	-.39	-.31	.34	.70	.85	-.06	-.23	-.03	.04

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre el ozono y el flujo solar de 10.7 cm para la fase este de la OCB

Locaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Paramaribo	.76	.69	.89	.94	.46	.03	.47	-.09	-.29	-.16	-.23	.30	.41
Balboa	.77	.63	.85	.77	.52	.30	.14	-.08	.17	-.10	-.12	.45	.44
Caracas	.58	.42	.79	.68	.48	.04	-.02	-.25	.01	-.14	.09	.38	.31
Kingston	.20	-.15	.68	.26	.14	-.05	-.25	-.35	-.13	-.17	.23	.23	.09
Viequez	.22	-.19	.61	.39	.07	.09	-.42	-.54	-.30	-.22	.54	.23	.05
Mexico	.02	-.50	.40	.38	-.17	-.11	-.42	-.25	-.24	-.34	.01	.03	-.10
Camagüey	-.26	-.51	.51	.29	-.08	.10	-.10	-.39	-.06	-.27	.22	-.16	-.11
Habana	-.64	-.54	.25	.13	-.35	.07	.18	-.33	-.07	-.33	.11	-.13	-.21
Everglades	-.64	-.44	-.27	-.57	-.25	-.03	.16	-.46	-.25	-.38	.07	-.21	-.30
Miami	-.71	-.41	-.32	-.53	-.28	-.03	.06	-.49	-.31	-.41	.04	-.23	-.33
Guadalajar.	-.48	-.59	.43	.33	-.27	-.03	-.42	-.37	-.40	-.32	-.01	.15	-.20
Gainsville	-.76	-.43	-.56	-.32	-.29	-.16	.06	-.29	-.10	.29	-.27	-.19	-.39

Conclusiones

La variabilidad del ozono esta determinada por los sistemas sinópticos que influyen sobre una localidad dada, se presenta mayor variabilidad durante la presencia de bajas presiones, las altas presiones son sinónimo de poca variabilidad.

Los transporte de ozono de los trópicos a las latitudes medias ocurren principalmente durante el invierno y parte de la primavera, cuando predominan los oeste que son características de no zonalidad en la circulación del viento.

La OCB induce variaciones en el ozono que van desde unas 3 UD para el caso de las locaciones cercanas al ecuador hasta unas 14 UD para las situadas en la frontera con la zona extratropical.

La influencia de la actividad solar en el ozono esta determinada por la fase de la OCB y la estación del año.

Bibliografía

Angell J. K. y J. Korshover, 1973: Quasi-biennial and long term fluctuations in total ozone. *Month. Weather Review*, Vol. 101, No. 5, pp 426-443.

Aroche, R., N. Masó, N. Fernández, B. Lapinel, L. R. Naranjo, A. Centella, C. Fonseca, N. Varela, I. Pomares y V. Cutié, 2002. Monografía: Variabilidad multianual de los campos de circulación sobre el Gran Caribe y sus repercusiones sobre el régimen pluviométrico en Cuba. Resultado Científico-Técnico, Proy. 49201204, Instituto de Meteorología, pp. 85.

Atkinson, R.J., 1996. Ozone variability over the southern hemisphere. *Cancer Forum*, 20, pp 1-9.

Cuevas, E., M. Gil, J. Rodríguez, J.M. Sancho, 1996. El efecto GHOST ("Global Hidden Ozone Structure from TOMS"): Posibles implicaciones dinámicas. IV Simposio Nacional de Predicción, Memorial "Alfonso Ascazo", Madrid 15-19 de abril de 1996, I.N.M., pp 1-6.

Chan D. y M. Núñez, 1998. Temporal and spatial variability of total ozone in southwest Sweden revealed by two ground-based instruments. *Int. J. Climatol.*, 18, pp. 1237-1246.

- Chapman E. M. Y I. Pomares, 1999: Métodos de estimación de los valores diarios del contenido total de ozono atmosférico. Informe Científico-Técnico, Proyecto 01303021, Instituto de Meteorología, pp 1-25.
- Da Silva, L., 2001. Depletion of the ozone column over the Andes Mountains of South America. *Il Nuovo Cimento*, Vol. 25 C, N. 1, pp 35-44.
- Environment Canada, 1997: Ozone Science: A Canadian perspective on the changing ozone layer, ed by D. I. Wardle, J. B. Kerr, C. T. McElroy and D. R. Francis, The University of Toronto Press, pp 1-119.
- Hengeveld, H., 1991. Understanding atmospheric change. A survey of background science and implications of climate change and ozone depletion. SOE Report No. 91-2, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, pp 68.
- London J., 1985: The observed distribution of atmospheric ozone and its variations. En *Ozone in the free atmosphere*, ed by R. C. Whitten y T. S. Prasad, New York, pp 11-80.
- Naujokat, B., 1986: An Update of the Observed Quasi-Biennial Oscillation of the Stratospheric Winds over the Tropics. *J. Atmos. Sci.*, vol 43 , 1873-1877.
- Rosenlof, K. H., S. J. Oltmans, D. Kley, J. M. Russell III, E-W Chiou, W.P. Chu, D. G. Johnson, K. K. Kelly, H. A. Michelsen, G. E. Nedolisha, E. E. Remsberg, G. C. Toon y M. P. McCormick, 2001. Stratospheric water vapor increases over past half century. *Geophys. Res. Letter*, Vol. 28, No. 7, pp. 195-1198.
- SPARC, 2000. SPARC Assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapor. WCRP-113, WMO/TD No. 1043, SPARC Report No. 2, pp. 312.
- WMO, 2001. WMO/CEOS Report on strategy for integrating satellite and ground-based observations of ozone. No. 140, WMO TD No. 1046, pp. 128.

