

## Implementación de un sistema de medición de ozono hasta capa límite planetaria para globo cautivo instrumentado

Wilfrido Gutiérrez López; García Espinosa, M.; Robles Roldan M.A., García J., Torres Jardón R.  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México D. F. MÉXICO  
[wili@atmosfera.unam.mx](mailto:wili@atmosfera.unam.mx), [mgare@atmosfera.unam.mx](mailto:mgare@atmosfera.unam.mx)

### Objetivo

Dentro del proyecto de diseño e implementación de un Globo Cautivo Meteorológico instrumentado para la medición de la capa límite planetaria del Área de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la U.N.A.M., se implementó la medición de ozono ( $O_3$ ) ya que es de vital importancia para entender su proceso de formación y en consecuencia, el diseño de estrategias para su control porque a nivel de superficie este gas en concentraciones altas es un contaminante del aire que provoca efectos nocivos en la salud humana, las plantas y los animales.

El ozono se encuentra de manera natural en la troposfera a niveles relativamente bajos y a niveles altos en la estratósfera. Sin embargo, en zonas urbanas y cerca de ellas, el  $O_3$  se forma y se acumula a través de complicadas reacciones fotoquímicas a partir de sus precursores y los compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz.

La concentración natural del ozono ( $O_3$ ) varía con la altitud, y en general, a mayor altitud se registra una concentración mayor. La concentración típica en ambientes naturales sin la influencia de las emisiones antropogénicas se encuentra en alrededor de 40 partes por billón (ppb). La Figura 1 muestra un perfil típico de ozono.

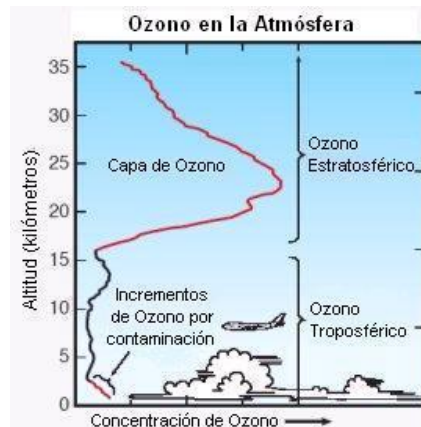


Figura 1. Distribución vertical del Ozono en la atmósfera.

Dada la necesidad de contar con instrumentos de medición capaces de registrar el perfil de la concentración de este contaminante hasta la capa límite, el objetivo de este proyecto fue la implementación de un sistema de bajo costo que permitiese medir el perfil vertical de ozono y la meteorología asociada en tiempo real, a una resolución tal que las mediciones de todos estos parámetros fueran comparables y confiables con datos similares registrados a nivel de superficie.

Esto motivó al diseño de un sistema de acoplamiento entre una sonda de medición comercial de ozono y la sonda cautiva. Con este sistema, es ahora posible llevar a cabo estudios de transporte y formación de contaminantes reactivos por parte de diversos grupos de investigación del CCA a una escala tal que permite un mejor entendimiento de los mecanismos involucrados por proveer datos dentro de la capa límite, siendo éste sistema único en su clase en México.

**Método de diseño y análisis:** Para la implementación del sistema de medición de ozono se hizo el planteamiento del problema y de la necesidad de estas mediciones en conjunto con investigadores del CCA en el tema de la fisicoquímica atmosférica, la búsqueda de alternativas de solución considerando instrumentos comerciales y posibles prototipos, en la toma de decisiones entre el grupo de Instrumentación meteorológica y los diferentes grupos interesados, y en la realización de pruebas de funcionamiento, calibración de las respuestas y resultados tanto en laboratorio como en campo.

**Requerimientos y Solución Planteada.** Para dar solución al planteamiento inicial, se estableció acoplar un instrumento capaz de monitorear ozono dentro de la capa límite planetaria con transmisión de datos en tiempo real al globo meteorológico cautivo instrumentado con que cuenta el área de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y que la información generada fuese almacenada automáticamente para su posterior análisis (Figura 2).

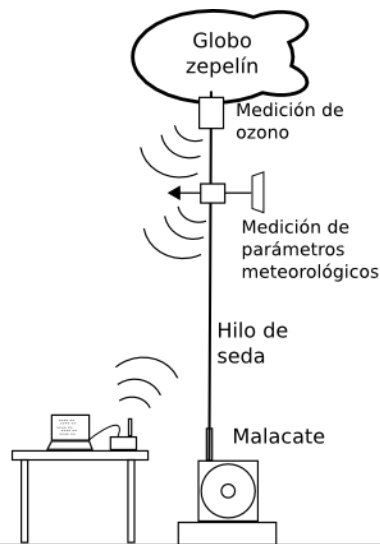


Figura 2. Sistema de globo cautivo con ozonosonda integrada

El Planteamiento del desarrollo por etapas se muestra en la figura 3.

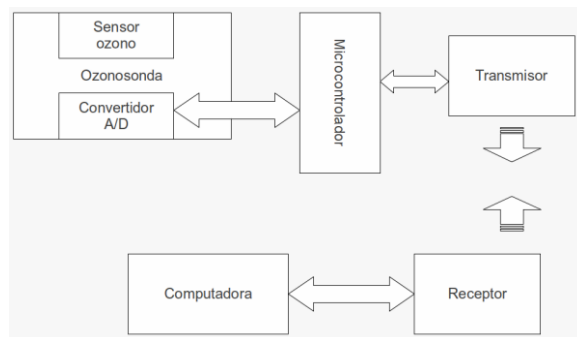


Figura 3. Etapas del diseño

Este planteamiento consideró la utilización de una sonda de medición de ozono comercial modelo 6A ECC de la compañía Science Pump Corporation con las siguientes especificaciones:

| Característica                 | Especificaciones   |
|--------------------------------|--|
| Tamaño                         | 19.1 cm x 19.1 cm x 25.4 cm, incluyendo la caja de protección de poliestireno  |
| Peso                           | Aproximadamente 600 gramos   |
| Bomba                          | Material de construcción: teflón no reactivo<br>Presión de vacío mínima: 670 hPa.<br>Consumo de corriente: menor de 115 mA.<br>Flujo de aire: 194-223 ml/min |
| Temperatura de operación       | 0° a 40°C  |
| Presión de operación           | Nivel del mar hasta 3hPa.  |
| Principio de medición de ozono | Coloumétrico utilizando una celda de concentración electroquímica  |
| Sensibilidad                   | 2 a 3 partes por billón por volumen de ozono (ppb <sub>v</sub> )   |
| Incertidumbre esperada         | Menor de ±10%  |

El sensor de ozono usado en la ozonsonda consiste de una celda electroquímica tipo “redox” iodo-iodo formada por 2 electrodos de platino conectados entre sí, los cuáles van inmersos en soluciones de diferente concentración de iodo contenidas en cámaras separadas (cátodo y ánodo). La reacción química empieza tan rápido como el O<sub>3</sub> (en el aire) es burbujeado en la solución del cátodo.

En la figura 4 se muestra un esquema en donde se representa como se logra establecer un diferencial de corriente tan pronto el interruptor S es cerrado y ésta fluye a través del puente de iones. R es la resistencia del circuito.

La reacción que se lleva a cabo es:

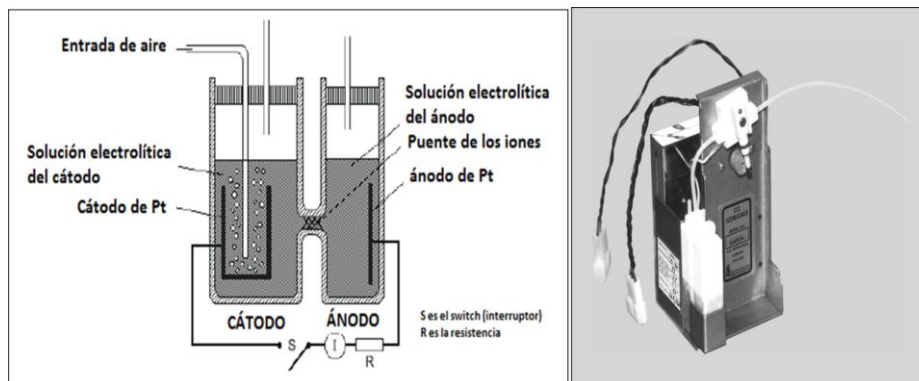
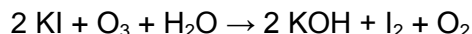


Figura 4. Esquema de la ozonsonda y de celdas iónicas

### Funcionamiento, calibración y obtención de los parámetros de diseño

La calibración entre el voltaje de salida de las ozonsondas y la concentración medida de ozono se realizó en el laboratorio móvil de monitoreo del Grupo Físicoquímica Atmosférica del CCA utilizando un calibrador de gases con generador de O<sub>3</sub> (Thermo Environmental

Instruments Model 146C Multigas Calibration System), un analizador de O<sub>3</sub> (Air Pollution Instruments Model 400) y un sistema de generación de aire cero (Thermo Environmental Instruments Model 111/111S) bajo el siguiente procedimiento:

Se generó una corriente de aire conteniendo diferentes concentraciones de ozono conocidas artificialmente generadas dentro del rango típico de los niveles este contaminante en aire ambiente. Esta corriente fue alimentada en forma simultánea tanto a la ozonosonda como al analizador de O<sub>3</sub> siguiendo los protocolos recomendados para este objeto. Dado que el analizador entrega la medición en términos de concentración en ppb<sub>v</sub> y la ozonosonda en voltios equivalentes a esa concentración, se planteó la obtención de una curva de correlación (o calibración) entre ambos resultados para identificar tanto la ocurrencia de linealidad entre el voltaje generado por la ozonosonda y el analizador de O<sub>3</sub>, como para establecer un rango de voltaje esperado de operación. La figura 5 muestra un ejemplo de una de estas pruebas en el que claramente se observa que el voltaje generado por la ozonosonda respondió linealmente a la concentración detectada por el analizador. Estos resultados fueron la base para el diseño del sistema de procesamiento de la señal y su transmisión.

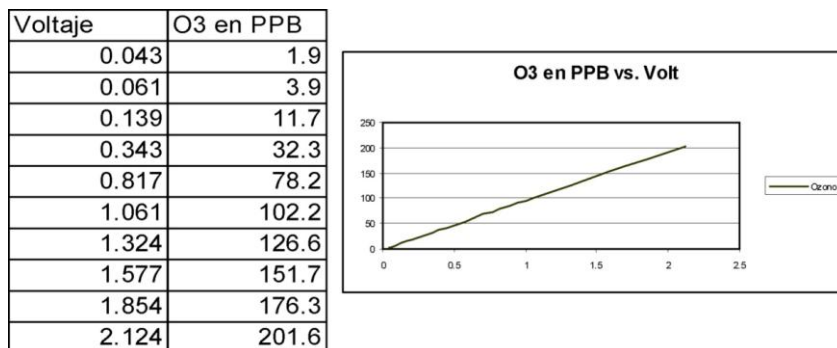


Figura 5: Resultados de prueba de correlación entre el voltaje generado por la ozonosonda y la concentración detectada por el analizador de ozono a la medición de la misma concentración O<sub>3</sub>. La correlación en esta caso fue de  $R^2 = 0.999$ .

### Diseño del prototipo

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de calibración y los requerimientos del planteamiento del diseño, se procedió al desarrollo del prototipo de proceso de señal y transmisión. Éste último se basó en la utilización de un microcontrolador el cual tendría la función de la captura, manejo, manipulación, y comunicación de la información de la medición realizada por la ozonosonda. Adicionalmente se integró un reloj de tiempo real electrónico programable para obtener un registro de la hora y fecha en que se toma las mediciones.

Debido a las grandes capacidades que tienen los microcontroladores en su funcionamiento es posible implementar rutinas de comunicación para distintos protocolos (serial, I<sup>2</sup>C, SPI), el manejo de señales analógicas y digitales. Existe una amplia variedad con diferentes características y precios. El microcontrolador utilizado fue un tipo PIC de la compañía Microchip debido a su bajo costo y potencialidad (modelo PIC16F88), ya que cuenta con 16 terminales de entrada/salida; posibilidad de 7 canales con convertidor A/D de 10 bits para señales analógicas; módulo de comunicación I<sup>2</sup>C, SPI y RS232; 256 bytes de memoria EEPROM, una memoria de programa de 4096 Bytes, diversas interrupciones y alimentación de 2.0 a 5.5 V (Figura 6).

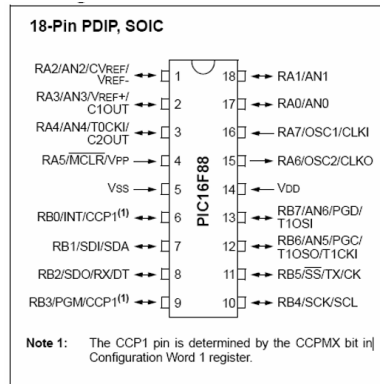


Figura 6 Diagrama de conexiones del PIC 16F88.

El reloj de tiempo real/calendario utilizado es de la compañía Dallas Semiconductor (modelo DS1307), con bajo consumo de energía, y protocolo de comunicación  $I^2C$  el cual se configura y lee fácilmente por medio del microcontrolador.

Este reloj es capaz de proveer la fecha y hora entregando información de segundos, minutos, horas, día, día de la semana, mes y año. Además incluye una salida de onda cuadrada programable que puede ser utilizada para sincronizar datos y una pequeña memoria RAM de propósito general (56 bytes). Su circuito de operación es sencillo; requiere un cristal de 32,768 kHz y resistencias de polarización en sus salidas de colector abierto. (Figura 7).

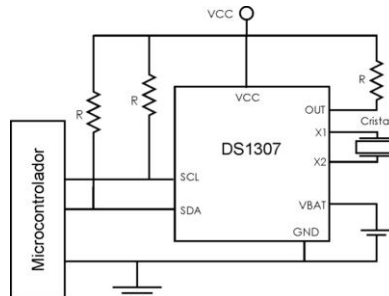


Figura 7 Diagrama de conexiones del reloj de tiempo real.

### Adquisición de datos

A partir de los datos de correlación entre la señal de la ozonosonda y el analizador se procedió a la programación del microcontrolador siguiendo un protocolo de comunicación  $I^2C$  y SPI utilizando el compilador de C para micros CCs de la compañía Custom Computer Services, Inc. El microcontrolador se encarga además de capturar la información, de la realización de todos los cálculos matemáticos requeridos como sacar las tendencias y la estadística (media, promedio, etc..). También maneja el respaldo de la información obtenida de la medición en una memoria externa de la familia Microchip modelo 24LC512 de 512 kB de capacidad. Ésta se utiliza en caso de que el sistema de transmisión RF (Radio Frecuencia) llegue a tener problemas en su envío de datos en tiempo real al receptor en tierra.

### Transmisión de datos vía radio-frecuencia

Para la transmisión de la información de la ozonosonda se utiliza el mismo sistema de transmisión de datos del sistema de globo cautivo meteorológico debido a que el sistema de recepción es el mismo. Por este motivo, se reprogramó y adecuó, el software de aplicación para el despliegue de la información original. Para el sistema de transmisión se

utilizó el módulo XBee-PRO bidireccional (transmite y recibe) en una banda libre de 2.4 GHz. Su alimentación es de 2.8 V a 3.4 V y tiene un tamaño de 24.38 mm x 32.94 mm (ver Figura 8). El módulo tiene una potencia de 63 mWatts y puede transmitir en línea de vista a una distancia mayor de 1.6 km. El módulo se conecta al sistema de transmisión mediante un bus serial con protocolo RS232. Un comando de control integrado en el microcontrolador inicia automáticamente el envío de los datos. Además, el módulo cuenta con opciones de configuración avanzadas que le permiten realizar conexiones con otros módulos (comunicación punto a multipunto). Esta característica es la que se utiliza para poder enviar información a un solo receptor.

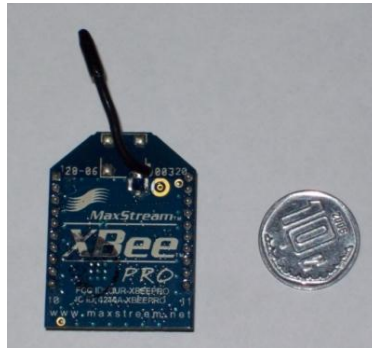


Figura 8. Módulo de transmisión Xbee PRO.

### Recepción, despliegue y respaldo de datos

Para la recepción de los datos transmitidos por la sonda y ozonosonda se utilizó otro módulo XBee-PRO en configuración de recepción ubicado a nivel del suelo. Éste segundo módulo envía la información por medio de un bus de puerto serial RS232 a una computadora Lap-Top donde el programa desarrollado en Visual Basic realiza el despliegue de la información en tiempo real como se muestra en la Figura 9. Al mismo tiempo que se visualizan los datos, se guardan estos en un archivo “.dat” por el mismo programa para ser analizados posteriormente. El programa se utiliza también para fijar el periodo de captura del dato de medición, y para programar la hora y fecha en el reloj de tiempo real que se encuentra en la ozonosonda.

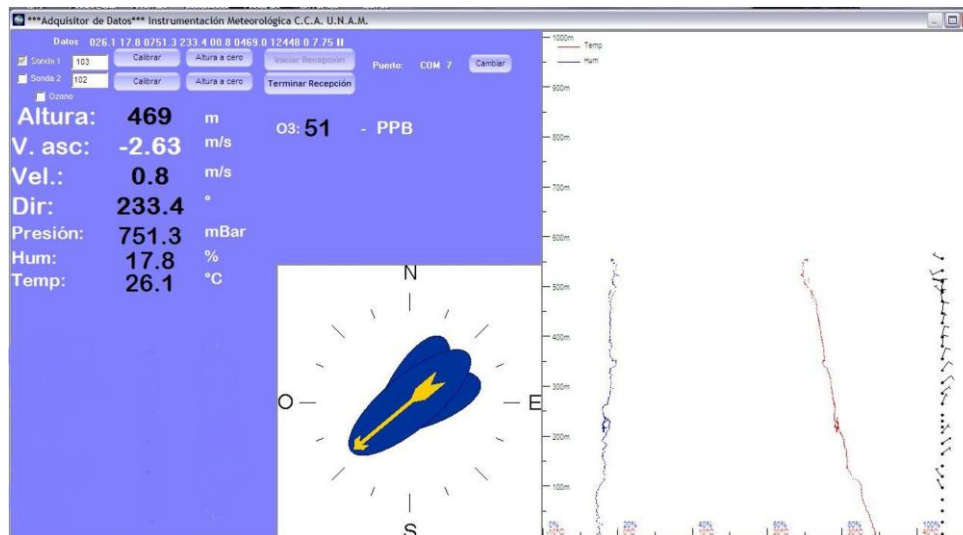


Figura 9. Pantalla del software de visualización y programación.

## Alimentación del sistema

El suministro de energía a la ozonosonda es muy importante debido al requerimiento de corriente por la bomba de vacío para la introducción de aire ambiente conteniendo ozono a las celdas electroquímicas, por lo que era necesario asegurar un suministro de corriente suficiente para que el tiempo de muestreo y análisis por la ozonosonda alcanzara un tiempo de al menos 40 minutos. Para esto, se utilizó una batería tipo cuadrada modelo U9VL de 9v @ 1200 mili-amperes la cual asegura un muestreo de aproximadamente 1.5 horas continuas (prueba realizada en el laboratorio).

Las características de este tipo de batería son:

Tipo: Litio

Voltaje: 9V (voltaje medio de 5.4 a 9.9 V)

Capacidad nominal: 1.2 Ah en 9 mA a 5.4 V en la descarga máxima de 23° C:

Peso: 36.4 gramos

Temperatura de almacenaje: -20° C a 60° C

Autodescarga: -40° C a 60° C

Terminales/conector de la etiqueta de aluminio de Mylar: seguridad Ni-plataada del broche de presión

El diagrama eléctrico final del diseño y el sistema terminado se muestran en las Figuras 10 y 11 respectivamente.

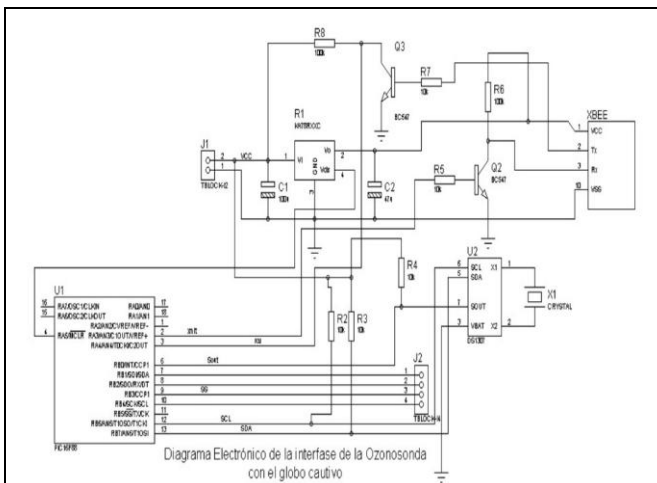


Figura 10. Diagrama eléctrico de la interfase de la ozonosonda.



Figura 11. Sistema ozonosonda-interfase terminado

## Pruebas de funcionamiento

Con objeto de probar el prototipo de “ozonosonda-interfase de transmisión” en campo, se hicieron mediciones del perfil de ozono en la campaña de monitoreo “Cal-Mex” realizada en Tijuana, Baja California entre mayo y junio de 2010 (Figura 12). El prototipo fue atado al globo cautivo meteorológico del Laboratorio de Instrumentación Meteorológica del CCA y las mediciones se realizaron bajo un programa de 3 lanzamientos por día (Figura 13).



Figura 12. Sitio de monitoreo “Parque Morelos ” en Tijuana B.C.

La Figura 13 muestra como ejemplo el resultado de la medición del perfil de ozono y meteorológico del lanzamiento del globo cautivo efectuado el 6 de junio de 2010. De acuerdo a los perfiles de las 08:00 a.m. (hora local), de 0 a 300 m el viento provino del sector nornoroeste con velocidades ligeras y una máxima de 3 m/s; la temperatura disminuyó con la altura, en tanto que la humedad relativa aumentó y el  $O_3$  mostró un perfil relativamente constante con concentraciones relativamente bajas alrededor de 25 ppb típicos de las mañanas en zonas urbanas. Estos perfiles en conjunto indicaron la presencia de una capa ligeramente inestable con mezclado relativamente uniforme del aire cercano a la superficie. De los 300 a 600 m, se detectó una zona de vientos en calma, con un fuerte incremento en el perfil de la temperatura y en el de la concentración de  $O_3$ , así como una disminución drástica de la humedad relativa. La interpretación de estos perfiles indicó la presencia de una capa muy estable conteniendo niveles de ozono remanentes acumulados de hasta 65 ppb posiblemente del día anterior que no lograron mezclarse con capas inferiores. Después de los 600 m y hasta los 800 m, se observó la presencia de otra capa de aire diferente a las anteriores. El viento provino del Este al Sureste con una velocidad máxima de 3 m/s, se estabilizaron la temperatura y humedad relativa, y la concentración de  $O_3$  disminuyó sensiblemente hasta las 15 ppb.

En el perfil de las 12:00 h solo se logró elevar el globo cautivo hasta una altura máxima de poco más de 400 m, debido a la presencia de vientos fuertes (mayor que 10 m/s) provenientes del oeste-noroeste al sur-suroeste (Costa del sur de California, EE. UU.). El perfil de la temperatura de la superficie a los 300 m mostró una ligera disminución mientras que la humedad relativa un incremento importante indicando la presencia de una capa ligeramente inestable. El ozono presentó un perfil relativamente estable de ~ 60 ppb con ligeras variaciones en diferentes niveles en correspondencia con las condiciones de inestabilidad que aseguraron un mezclado uniforme en esta primera capa entre el ozono en superficie con la altura. Los niveles de ozono en esta capa fueron equivalentes a máximos de ozono registrados en superficie en la zona urbana por varias estaciones de monitoreo. Después de los 300 m, el perfil de la temperatura mostró estabilidad térmica, con una disminución de la humedad relativa y un fuerte aumento de la concentración de  $O_3$  de 60 hasta unas 80 ppb. Los registros en ozono claramente indicaron que la capa en la altura previamente observada en el perfil de las 08:00 hrs. ahora contenía niveles mayores con contribuciones tanto del  $O_3$  formado en superficie como del acarreado por los vientos por arriba de los 300 metros.

Para el perfil de las 17:00 h, el perfil de temperatura y de humedad relativa fue relativamente constante de la superficie hasta poco más de los 450 m, así como la dirección de proveniencia de los vientos del oeste (de la costa), mientras que la intensidad de estos últimos presentó un incremento notable desde la base hasta cerca de los 150 m (hasta 10 m/s) para posteriormente volver a decrecer. El perfil de ozono en esta capa



también mostró un perfil relativamente constante en un rango de entre 45 a 50 ppb. La combinación de estos perfiles reflejó un mezclado uniforme del aire con niveles de ozono típicos de esta hora.

De los 450 a los 600 m, aunque el perfil de temperatura mostró la presencia de una pequeña franja inestable, arriba de ella los vientos quedaron en calma, el perfil de humedad se incrementó y los niveles de ozono tuvieron un gradiente pronunciado en hasta 70 ppb cerca de los 600 m. Nuevamente se observó la misma capa por arriba de la de mezclado con ozono remanente o transportado.

La información proporcionada por los perfiles de la campaña con resultados de la modelación de la circulación atmosférica a varios niveles de altura realizados por el grupo Molina Center for Energy and the Environment (San Diego, Ca.), permitió comprobar la existencia de un mecanismo semi-permanente de acarreo y recirculación de masas de aire contaminado relativamente ricas en ozono de Los Angeles hacia el sur-suroeste mar adentro del Océano Pacífico para que, conforme transcurre el día, estas masas de aire, ingresen tierra adentro por arriba de la capa de mezcla siguiendo la ruta San Diego-Tijuana.

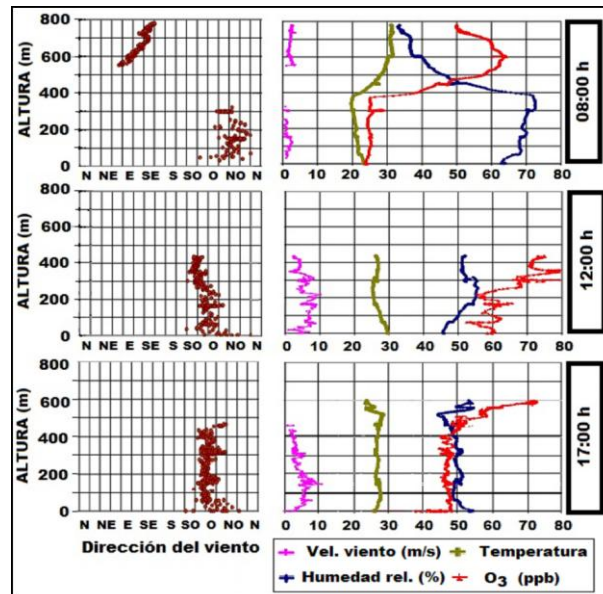


Figura 13. Perfil vertical de  $O_3$  y de parámetros meteorológicos registrados en el sitio “Parque Morelos” en Tijuana, B. C., el 6 de junio de 2010, con el prototipo de “ozonosonda-interfase de transmisión” y el globo cautivo meteorológico desarrollados por el grupo de Instrumentación Meteorológica del CCA.

## Resultados y conclusiones

1. Se logró integrar un prototipo de “ozonosonda-interfase de transmisión” para poder registrar la concentración a diferentes alturas hasta capa límite de manera confiable y económica, siendo además reutilizable con transmisión de datos en tiempo real y su procesamiento gráfico y numérico de las concentraciones en forma instantánea utilizando una computadora con un programa también desarrollado por este grupo como receptor y procesador de información.

2. El uso combinado de la ozonosonda y de la radiosonda meteorológica en un globo cautivo permitió generar información de gran valor en la interpretación de la dinámica físico-química de formación y transporte de especies reactivas como ozono en la tropósfera baja.
3. Se probó la efectividad del prototipo desarrollando en una campaña de investigación realizada en Tijuana B.C., para investigar los mecanismos de ocurrencia de ozono en esta región, encontrándose que en los primeros cientos de metros, existen capas horizontales de aire con diferencias importantes en sus características meteorológicas y en gradientes de concentración de O<sub>3</sub>.
4. Casi siempre, los niveles O<sub>3</sub> en el perfil vertical guardaron una relación directa con el tipo de estabilidad atmosférica reflejado por los perfiles de la temperatura y de la humedad relativa.
5. El desarrollo de este sistema de medición del perfil de ozono y meteorológico con el globo cautivo permitirá llevar a cabo investigaciones de química atmosférica de alto nivel siendo a la fecha único en su tipo en México.

#### **Agradecimientos:**

Los autores agradecen al Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez del Centro de Ciencias de la Atmósfera U.N.A.M. y a la Dra. Luisa Molina del Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente por su apoyo mostrado en el desarrollo del proyecto.

#### **Bibliografía**

- AGUILA: In situ Measurements of Mexico City air pollution by a research aircraft,** Atmos. Environ., 26B, 445–451.
- Ayllón T, Teresa; Gutiérrez R. Jesús, **Introducción a la Observación Meteorológica**, 1a edición, Limusa, México 1983.
- Hidy, George M, **Los vientos: Los Orígenes y el comportamiento del movimiento atmosférico**, 1a edición, Reverte México.
- Holman, J.P., **Métodos Experimentales para Ingenieros.**, 1a. edición, Mc Graw-Hill, México, 1979.
- Oke, T. R. **Boundary Layer Climates**, 2a. edición, Mathuen, London, 1987.
- Pérez-Vidal H, Raga G B (1998) **On vertical distribution of pollutants in Mexico City,** *Atmósfera*, 11, 95–108.
- Schilling, Donald y Belove, Charles, **Circuitos Electrónicos, Discretos e Integrados.**, 1a edición, Publicaciones Marcombo, S.A., México, 1989.
- SCIENCE PUMP CORPORATION (1999) . **OPERATOR'S MANUAL MODEL 6A ECC OZONESONDE.**
- Streit G E, Guzmán F (1996) **Mexico City air quality: Progress of an international collaborative project to define air quality management options,** Atmos. Environ., 30, 723–733.
- Taub, Herbert, **Circuitos Digitales y Microprocesadores.** 1a. edición, Mc Graw-Hill, México, 1988.
- Tocci, Ronald J. **Sistemas Digitales. Principios y aplicaciones.** 1a. edición, Prentice Hall, México, 1981.
- Velasco E, Márquez C, Bueno E, Bernabé RM, Sánchez A, Fentanes O, Wöhrnschimmel H, Cárdenas B, Kamilla A, Wakamatsu S, Molina LT (2008) **Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City.** *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3061–3079.