

UCH-FC  
MAG-Q  
M 269  
C. 1

# **Distribución y Transporte de la Contaminación por Ozono en la Región Metropolitana a través del Corredor Colina - Los Andes**

Tesis

Entregada a la Universidad de Chile en cumplimiento  
parcial de los requisitos para optar al grado de

**Magíster en Ciencias Químicas**

Por:

**Carlos Alfonso Mancilla García**

Santiago, Octubre de 2012

Director de Tesis: Dr. Raúl Morales Segura

Co-director de Tesis: Dr. Rodrigo Seguel Albornoz

**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**INFORME DE APROBACIÓN**  
**TESIS DE MAGÍSTER**

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile que la Tesis de Magíster presentada por el candidato:

**Carlos Alfonso Mancilla García**

Ha sido aprobada por la comisión de evaluación de la Tesis como requisito para optar al grado de Magister en Ciencias Químicas, en el examen de Defensa Privada de Tesis rendido el día 17 de Octubre de 2012.

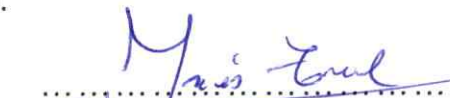
Director de Tesis:  
Dr. Raúl Morales Segura



Co-Director de Tesis:  
Dr. Rodrigo Seguel

Comisión de Evaluación de la Tesis:

Prof. María Inés Toral:



Mg. Cs. Víctor Vargas:



Dr. Edward Fuentes:



## O DEDICATORIA



h omia de p... A mi tía Sandra, el cielo recuperó un ángel. ...  
B ...  
...  
...  
...  
...  
...

## AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a mi hija Aline, a su madre Mitzi, a mis padres y hermana por el apoyo y cariño incondicionales que siempre me han brindado.

En forma especial agradezco al Dr. Rodrigo Seguel A., actual Jefe de la Unidad de Investigación y Desarrollo del Centro Nacional del Medio Ambiente, CENMA, sin cuya calidez humana, apoyo y confianza no hubiese sido posible el desarrollo de este trabajo.

Al Profesor y Director de Tesis Dr. Raúl Morales S., por su vasta experiencia transmitida y por el especial interés y disposición mostrados durante el desarrollo de mi Tesis.

Al Doctor Manuel Leiva G. de la Universidad de Chile, por las oportunidades de desarrollo de capacidades profesionales que me dio.

Al grupo de trabajo del Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Chile, a los Doctores Richard Toro y Mauricio Canales, a los Químicos Ambientales Camila Pacheco, Camila Donoso y Ricardo Cárdenas y a la señora Luzmira Carreño. A todos ustedes gracias por su aporte durante nuestras jornadas de seminarios.

Agradecimientos especiales a Wilson Novoa, Javier Vargas y a Luis Salinas de CENMA, por su entrega y buen humor durante las interminables jornadas en las campañas de lanzamientos de ozonosondas.

A los meteorólogos Sr. Eugenio Campos y Sra. Maureen Amin de CENMA por los conceptos meteorológicos entregados y por el apoyo en la solicitud de permisos para los lanzamientos de ozonosondas realizados.

Finalmente, agradecer al Director Ejecutivo del Centro Nacional del Medio Ambiente Dr. Italo Serey por el apoyo económico, la infraestructura y equipamientos facilitados para poder desarrollar este trabajo.

## ÍNDICE DE MATERIAS

GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xii
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Formación de ozono estratosférico .....	2
1.2 Ozono troposférico.....	3
1.3 Destrucción química y sumideros de ozono troposférico .....	7
1.4 Meteorología asociada a contaminación por ozono .....	9
1.5 Mediciones de ozono .....	11
1.6 Antecedentes .....	12
1.7 Hipótesis: .....	15
1.8 Objetivos .....	16
1.8.1 Objetivos generales.....	16
1.8.2 Objetivos específicos .....	16
<b>II MATERIALES Y MÉTODO.....</b>	<b>17</b>
2.1 Materiales.....	17
2.1.1 Sistema de radiosondeo DigiCORA MW31 .....	17
2.1.2 Principio de medición de la sonda de ozono.....	19
2.1.3 Cálculo de la concentración de ozono.....	22
2.2 Sistema de globo cautivo TTB 329 Vaisala.....	24
2.3 Monitor de ozono 49i Thermo Scientific.....	25
2.4 Monitor de óxidos de nitrógeno (NOx) 42i Thermo Scientific .....	26
2.5 Sensor de dirección y velocidad del viento R. M. Young modelo 05305 .....	28
2.6 Método .....	29
2.6.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana (Programa 1).....	30
2.6.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile (programa 2).....	31
2.6.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes (programa 3).....	32
2.6.4 Puntos de monitoreo .....	33
2.6.5 Identificación de la altitud de la capa de mezcla .....	35

III RESULTADOS.....	36
3.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana (resultados programa 1) .....	36
3.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile (resultados programa 2) .....	51
3.2.1 San Antonio .....	52
3.2.2 Los Andes .....	53
3.2.3 Peñaflor .....	55
3.2.4 Las Condes.....	56
3.2.5 Colina.....	58
3.2.6 Rancagua.....	59
3.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes (resultados programa 3) .....	61
3.4 Identificación de la altitud de la capa de mezcla e inversiones térmicas .....	72
IV DISCUSIÓN .....	76
4.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana..	76
4.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile .....	83
4.2.1 San Antonio .....	83
4.2.2 Los Andes .....	84
4.2.3 Peñaflor .....	84
4.2.4 Las Condes.....	85
4.2.5 Colina.....	85
4.2.6 Rancagua.....	85
4.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes.....	89
V CONCLUSIONES .....	96
4.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana..	96
4.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile .....	97
4.3 Distribución de ozono en el corredor Colina - Los Andes.....	98
4.4 Recomendaciones .....	100
VI BIBLIOGRAFÍA .....	102

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipamiento utilizado en el estudio.....	17
Tabla 2. Variación anual de los perfiles de ozono en la Región Metropolitana. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas. ....	31
Tabla 3. Distribución de ozono en la zona central de Chile. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas. ....	32
Tabla 4. Distribución del ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas. ....	33
Tabla 5. Tabla resumen. Ubicación puntos de lanzamientos.....	33
Tabla 6. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa 1. ....	73
Tabla 7. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa 2. ....	74
Tabla 8. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa 3. ....	75
Tabla 9. Requisitos para la formación del corredor atmosférico Colina - Los Andes....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ozono en la atmósfera. (Earth Observing System (EOS) Science Plan, 1999)..	2
Figura 2. Evolución diaria de los precursores del smog fotoquímico. (Goody, 1995). ....	5
Figura 3. Evolución diaria de la capa de mezcla. (adaptado de Stull, 1989). ....	10
Figura 4. Variación diaria del ozono para la Región de Valparaíso (16 de marzo al 6 de abril de 2010), Región Metropolitana (15 de diciembre de 2009 al 4 de enero de 2010) y Región del Libertador Bernardo O'Higgins (1 de febrero al 11 de marzo de 2010). (Seguel, 2011). ....	14
Figura 5. Sistema de radiosondeo DigiCORA MW31.....	18
Figura 6. Sonda de ozono ECC-6A. (a) (1) Bomba de muestreo, (2) Cátodo, (3) Ánodo, (4) Cables para interfase, (5) Motor, (6) Manguera de aspiración de aire, (7) Conector para batería. (b) Esquema interno. ....	19
Figura 7. Sistema de globo cautivo TTB 329 Vaisala con incorporación del monitor de ozono 2B Technologies modelo 205.....	24
Figura 8. Esquema interno monitor de ozono Thermo 49i. ....	26
Figura 9. Esquema interno monitor de NOx Thermo 42i. ....	28
Figura 10. Sensor de dirección y velocidad del viento R.M. Young modelo 05305. ....	29
Figura 11. Puntos de lanzamientos de ozonosondas. ....	34
Figura 12. Perfiles verticales de ozono. Colina, 29 y30 de septiembre de 2010. ....	37
Figura 13. Perfil vertical de ozono. Colina, 19 de octubre de 2010.....	38
Figura 14. Perfiles verticales de ozono. Colina, 25 y 26 de noviembre de 2010.....	40
Figura 15. Perfiles verticales de ozono. Colina, 21 y 22 de diciembre de 2010.....	42



Figura 16. Perfiles verticales de ozono. Colina, 28 de febrero de 2011. ....	44
Figura 17. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de marzo de 2011.....	45
Figura 18. Perfil vertical de ozono. Colina, 28 de abril de 2011. ....	46
Figura 19. Perfil vertical de ozono. Colina, 26 de mayo de 2011.....	47
Figura 20. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de junio de 2011. ....	48
Figura 21. Perfil vertical de ozono. Colina, 28 de julio de 2011. ....	49
Figura 22. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de agosto de 2011. ....	50
Figura 23. Perfil vertical de ozono. Colina, 26 de septiembre de 2011. ....	51
Figura 24. Perfiles verticales de ozono. San Antonio, 18 de enero de 2011.....	53
Figura 25. Perfiles verticales de ozono. Los Andes, 6 de enero de 2011. ....	55
Figura 26. Perfiles verticales de ozono. Peñaflores, 22 de febrero de 2011. ....	56
Figura 27. Perfiles verticales de ozono. Las Condes, 23 de febrero de 2011. ....	57
Figura 28. Perfiles verticales de ozono. Colina, 28 de febrero de 2011. ....	59
Figura 29. Perfiles verticales de ozono. Rancagua, 13 de enero de 2011.....	60
Figura 30. Perfiles verticales de ozono. Colina y Los Andes, 19 de enero de 2011.....	62
Figura 31. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Colina y Los Andes, 19 de enero de 2011. ....	63
Figura 32. Perfiles verticales de ozono para Colina y Los Andes, 20 de enero de 2011.	64
Figura 33. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Colina y Los Andes, 20 de enero de 2011. ....	65
Figura 34. Perfiles verticales de ozono para Las Condes y Los Andes, 21 de enero de 2011.....	66
Figura 35. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Las Condes y Los Andes, 21 de enero de 2011. ....	67

Figura 36. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones de ozono en superficie (promedios de 5 min.) medidos en Colina (19 y 20 de enero de 2011), Las Condes (21 de enero de 2011), Los Andes (19, 20 y 21 de enero de 2011) y cordón de Chacabuco (19, 20 y 21 de enero de 2011).....	68
Figura 37. Corredor Atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones en superficie de óxidos de nitrógeno (promedios de 5 min.) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011.....	69
Figura 38. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones en superficie de óxidos de nitrógeno (promedios de 5 min.) para Los Andes los días 19, 20 y 21 de enero de 2011.....	70
Figura 39. Corredor Atmosférico Colina - Los Andes. Monitoreo en superficie de dirección del viento (WD, promedios de 1 hora) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011.....	71
Figura 40. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Monitoreo en superficie de velocidad del viento (WS, promedios de 1 hora) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011.....	72
Figura 41. Comportamiento de ozono y variables atmosféricas dentro de la capa de mezcla y capa residual. Perfiles verticales de ozono ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr) y temperatura potencial ( $\theta$ ) para Colina, 25 y 26 de noviembre de 2010. ....	79
Figura 42. Estratificación de ozono en la capa residual producida por presencia de dorsal. Perfil vertical de ozono troposférico ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), perfil adiabático seco (Ad. seco) y temperatura potencial ( $\theta$ ) para Colina, 21 de diciembre de 2010, 14:19 horas. ....	81
Figura 43. Estratificaciones de ozono en la capa residual producidas por presencia de dorsal. Perfil vertical de ozono troposférico ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), perfil adiabático seco (Ad. seco) y temperatura potencial ( $\theta$ ) para Colina, 22 de diciembre de 2010, 14:04 horas. ....	82
Figura 44. Evolución del perfil de ozono en la capa de mezcla y aumento en la altitud de la inversión de subsidencia en torno a las 14 horas en la dirección oeste-este. Perfiles verticales de ozono obtenidos en San Antonio (18 de enero de 2011), Peñaflor (22 de febrero de 2011) y Colina (28 de febrero de 2011). ....	88

Figura 45. Estudio del corredor atmosférico Colina - Los Andes. Comportamiento del ozono y variables meteorológicas en la capa de mezcla y capa residual para los sondeos realizados entre los días 19 y 21 de enero de 2011 desde Colina y Las Condes (izquierda) y Los Andes (derecha). Perfiles verticales de ozono ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), temperatura potencial ( $\theta$ ), dirección y velocidad del viento. ....92

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### **Capa de mezcla:**

La capa de mezcla atmosférica resulta de movimientos convectivos del aire, típicamente hacia la mitad del día, cuando el aire en la superficie se calienta y sube, aumentando su inestabilidad y turbulencia. Para determinar su profundidad se utilizan en conjunto las inversiones térmicas, temperatura punto de rocío, humedad relativa, temperatura potencial y perfil adiabático seco.

### **Capa residual:**

Corresponde a aquella capa que se ubica por sobre una inversión térmica, por ejemplo una inversión térmica por radiación, hasta la base de la subsidencia.

### **Gradiente vertical de temperatura:**

Se define como el gradiente en el que la temperatura cambia con la altura. Una disminución de temperatura con la altura se define como un gradiente vertical negativo y un aumento de temperatura con la altura como uno positivo.

**Humedad relativa:**

La humedad relativa (HR) Es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura, por ejemplo, una humedad relativa del 70% se refiere que de la totalidad de vapor de agua (100%) que podría contener el aire a una cierta temperatura, solo tiene el 70%.

**Inversión térmica:**

Corresponde a la porción donde se observa un gradiente vertical de temperatura positivo, o sea, donde la temperatura aumenta con la altura, provocando diferencias de densidad entre masas de aire, lo que impide su mezcla.

**Inversión térmica de subsidencia:**

Esta inversión está generalmente asociada con los anticiclones (sistemas de alta presión). El aire de un anticiclón desciende y fluye hacia fuera con una rotación que sigue la dirección contraria de las agujas del reloj. A medida que el aire desciende, la mayor presión existente en altitudes menores lo comprime y calienta. Por lo general, este calentamiento se produce en un gradiente más acelerado que el gradiente vertical de temperatura. Durante el día, la capa de inversión resultante de este proceso con frecuencia se eleva a cientos de metros sobre la superficie. La inversión de subsidencia se identifica por un brusco descenso en el punto de rocío y la humedad relativa, acompañado de una inversión térmica.

### **Inversión térmica por radiación, radiativa o superficial:**

Se produce por el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre, a medida que la Tierra se enfría, la capa de aire cercana a la superficie también lo hace. Si este aire se enfría a una temperatura menor que la del aire de la capa superior, se vuelve muy estable y la capa de aire cálido impide cualquier movimiento vertical. Generalmente se producen desde las horas finales de la tarde hasta las primeras de la mañana, con cielos despejados y vientos calmados, cuando el efecto de enfriamiento es mayor. Las mismas condiciones que conducen a inversiones por radiación determinan la inestabilidad durante el día. Por consiguiente, los efectos de estas inversiones son de corta duración, los contaminantes que quedan aquí atrapados son dispersados por el aumento de la turbulencia producida por la ruptura de la inversión después del amanecer.

### **Perfil adiabático seco:**

Termodinámicamente hablando, un proceso adiabático es aquel en el que no se produce transferencia de calor ni de masa a través de las fronteras de una porción de aire, en este proceso, la compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento. Una porción de aire seco que se eleva en la atmósfera se enfría en el gradiente adiabático seco unos  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada 1000 metros, análogamente, una porción de aire seco que se hunde en la atmósfera se calienta en el gradiente adiabático seco  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada 1000 metros (se considera que el aire es seco ya que el agua que contiene permanece en estado gaseoso). El perfil adiabático seco determina las condiciones atmosféricas, se tendrán condiciones de inestabilidad cuando el perfil adiabático se encuentre por sobre el gradiente de temperatura ambiental, la porción de aire seco estará

más cálida que el aire que lo circunda y se elevará desplazando masas de aire frío que se encuentren sobre él. Es en estas condiciones que el perfil adiabático determinará la altitud de la capa de mezcla, y estará dado por el punto de intersección entre el gradiente de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco, que es hasta donde se elevará la porción de aire.

### **Temperatura de rocío:**

La temperatura de rocío ( $T_r$ ) o punto de rocío es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina o, en caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha.

### **Temperatura potencial:**

La temperatura potencial ( $\theta$  ó  $\theta$ ), representa la temperatura que una parcela de aire seco a una cierta presión y temperatura tendría si fuera comprimida o expandida adiabáticamente hasta una presión de referencia (normalmente 1000 hPa).  $\theta$  es relativamente constante en la capa de mezcla, Nielsen-Gammon y col. (2008) sugieren que la altitud de esta capa se encuentra donde  $\theta$  es 1,5 K mayor que su temperatura mínima.

## RESUMEN

Durante los meses de verano, la zona central de Chile, y en particular la Región Metropolitana, presenta altos índices de concentración de ozono cuya formación se ve favorecida debido al aumento de la radiación solar y a las altas emisiones de sus precursores (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles). Estudios previos de ozono y meteorología en superficie proyectan una zona preferencial de distribución de este contaminante hacia el norte y nororiente de Santiago, que debería sobrepasar el Cordón de Chacabuco y llegar a Los Andes en la V Región.

Bajo esta perspectiva se realizaron lanzamientos de ozonosondas y monitoreo en superficie de meteorología y óxidos de nitrógeno entre septiembre de 2010 y septiembre de 2011 entre las regiones V, Metropolitana y VI, de modo de analizar y caracterizar el comportamiento del ozono en altura dentro de la capa de mezcla (perfil vertical de  $O_3$ ).

El estudio concluye que las mayores concentraciones de ozono ocurren en el período primavera-verano y que el comportamiento vertical del  $O_3$  dentro de la capa de mezcla está estrechamente relacionado con la termodinámica de la atmósfera y con las emisiones de óxido nítrico. También se observó que las concentraciones de ozono en el perfil vertical aumentan en la dirección oeste-este del área de estudio, determinándose valores de línea base en el borde costero (sin influencia antropogénica) de 33 ppbv en altura y entre 15 y 25 ppbv en superficie; en cambio, la línea base para la Región



Metropolitana (con influencia antropogénica) es de 45 ppbv, dejando un estrecho margen para la superación de la norma.

Finalmente, se demuestra experimentalmente que existen masas de aire enriquecidas en ozono que llegan a Los Andes desde la Región Metropolitana, dicho aporte estaría influenciando a la V Región a partir de las 15 horas aproximadamente. Esta incorporación de ozono proveniente desde Santiago explicaría el retardo que se observa en el descenso de las concentraciones de  $O_3$  en Los Andes respecto de lo que ocurre en la Región Metropolitana en horas de la tarde.

## ABSTRACT

During summer time, central Chile, and in particular the Metropolitan Region has high levels of ozone concentrations whose formation is favored due to increased solar radiation and high emissions of its precursors (nitrogen oxides and volatile organic compounds). Previous studies of surface ozone and weather conditions cast a preferential distribution area of this pollutant to the north and northeast of Santiago, which should exceed the Chacabuco range and reach to Los Andes in the V Region.

From this perspective, ozonesondes launches were made, and meteorological parameters and nitrogen oxides was monitoring between september 2010 and september 2011 between the regions V, Metropolitan and VI, in order to analyze and characterize the behavior of ozone with the height in the mixed layer (vertical O<sub>3</sub> profile).

The study concludes that the highest ozone concentrations occur in the spring-summer period and the vertical behavior of O<sub>3</sub> in the mixed layer is closely related to the atmospheric thermodynamics process and the nitric oxide emissions. It was also observed that the ozone concentrations in the vertical profile increase in the west-to-east direction in the study area, determining baseline values in the coast (without human influence) of 33 ppbv in height, and between 15 and 25 ppbv in surface; whereas the baseline for the Metropolitan Region (with anthropogenic influence) is 45 ppbv, leaving a narrow margin to overcome the Law.

Finally, there is shown experimentally that air masses rich in ozone arriving to Los Andes from the Metropolitan Region, this contribution would be influencing the V Region near to the 15 hours. This incorporation of ozone from Santiago explain the delay observed in the decrease of the O<sub>3</sub> concentrations in Los Andes respect the Metropolitan Region in the afternoon.

## I INTRODUCCIÓN

El ozono ( $O_3$ ) es un gas formado por tres átomos de oxígeno, se encuentra en forma natural en la atmósfera siendo de gran importancia en la estratosfera donde forma una capa protectora conocida como capa de ozono, que actúa como filtro de la radiación ultravioleta, disminuyendo la incidencia de esta sobre la superficie terrestre (Figura 1). En la troposfera baja, que es donde se desarrolla la vida en la Tierra, el ozono constituye un contaminante de origen secundario que no es emitido directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de precursores primarios, principalmente óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de radiación solar, por lo que su formación es de carácter fotoquímico (smog fotoquímico) (Delgado, 2005).

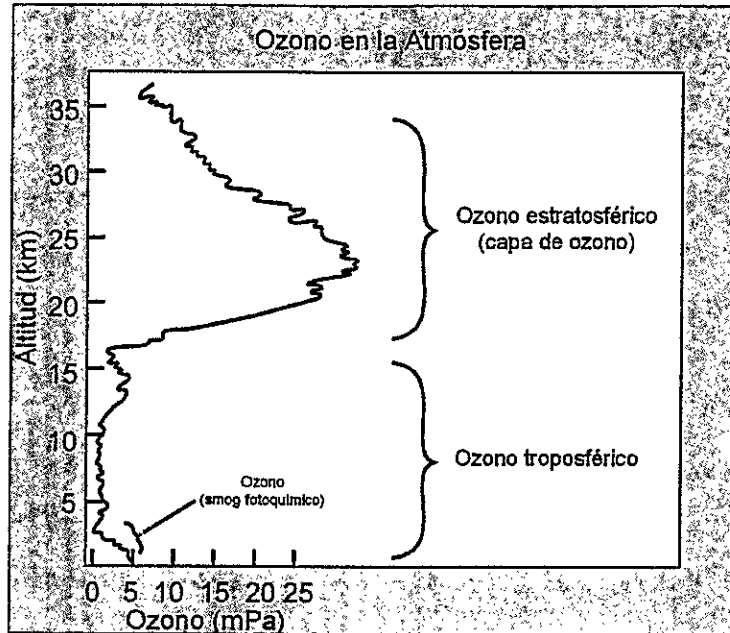
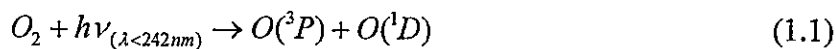


Figura 1. Ozono en la atmósfera. (Earth Observing System (EOS) Science Plan, 1999).

### 1.1 Formación de ozono estratosférico:

Chapman en 1930 postuló que el ozono estratosférico se forma a partir de la fotólisis de una molécula de oxígeno por radiación ultravioleta según las siguientes reacciones:



Donde  $O(^1D)$  representa un átomo de oxígeno electrónicamente excitado, M es un tercer cuerpo, por ejemplo  $O_2$  ó  $N_2$  que actúan eliminando el exceso de energía de la reacción estabilizando a la molécula de ozono.

Sin embargo, el ozono generado queda expuesto a la fotólisis inducida por la radiación ultravioleta entre 240 y 320 nm produciendo su destrucción fotoquímica:



Reacción neta:



Vemos entonces que la formación de ozono estratosférico depende de la abundancia de oxígeno. De hecho, la concentración y distribución de ozono en la atmósfera es un balance entre procesos de formación y eliminación. Esta última está regulada por la química en la que intervienen otros gases traza:



Reacción neta:



Donde X es un catalizador que puede ser  $\cdot OH$ , NO o especies que contienen bromo y cloro.

## 1.2 Ozono troposférico:

A mediados del siglo pasado se pensaba que el ozono troposférico era aquel transportado desde la estratósfera y que era destruido en superficie (Regener, 1949). La producción fotoquímica como fuente de ozono no se reconoció hasta que Crutzen (1973) y Chameides (1973) propusieron que la oxidación del metano y el monóxido de carbono en presencia de óxidos de nitrógeno daban lugar a una considerable producción de ozono.

A pesar de ser un gas traza, en la actualidad se le reconoce al ozono troposférico como el oxidante de mayor importancia en el aire junto a sus derivados fotoquímicos ( $\cdot\text{OH}$  y  $\text{HO}_2\cdot$ ). Por lo tanto, el ozono juega un papel importante controlando la capacidad oxidativa de la atmósfera. Sin el ozono, gases reducidos como el CO, hidrocarburos y la mayoría de los compuestos de azufre y nitrógeno, se acumularían considerablemente en la atmósfera.

Ambientalmente hablando, a nivel de superficie el ozono es considerado un contaminante puesto que puede afectar a la salud humana y puede causar daño a vegetales, animales e incluso a algunos materiales (plásticos, cauchos y concreto entre otros) (Baird, 2001).

Como se mencionó al inicio, el ozono troposférico tiene su origen en reacciones que involucran principalmente a óxidos de nitrógeno e hidrocarburos (compuestos orgánicos volátiles, COVs). En zonas urbanas estos gases son emitidos principalmente por automóviles e industrias que utilizan combustibles fósiles en sus procesos. En zonas rurales en cambio, la vegetación es la principal fuente de COVs. En áreas urbanas y bajo condiciones meteorológicas estables dichas especies se acumulan en la capa de mezcla. En los meses de verano (donde hay mayor radiación solar), se producen reacciones fotoquímicas que dan origen a la formación de ozono, aldehídos y peroxiacetilnitratos (PAN) (Figura 2).

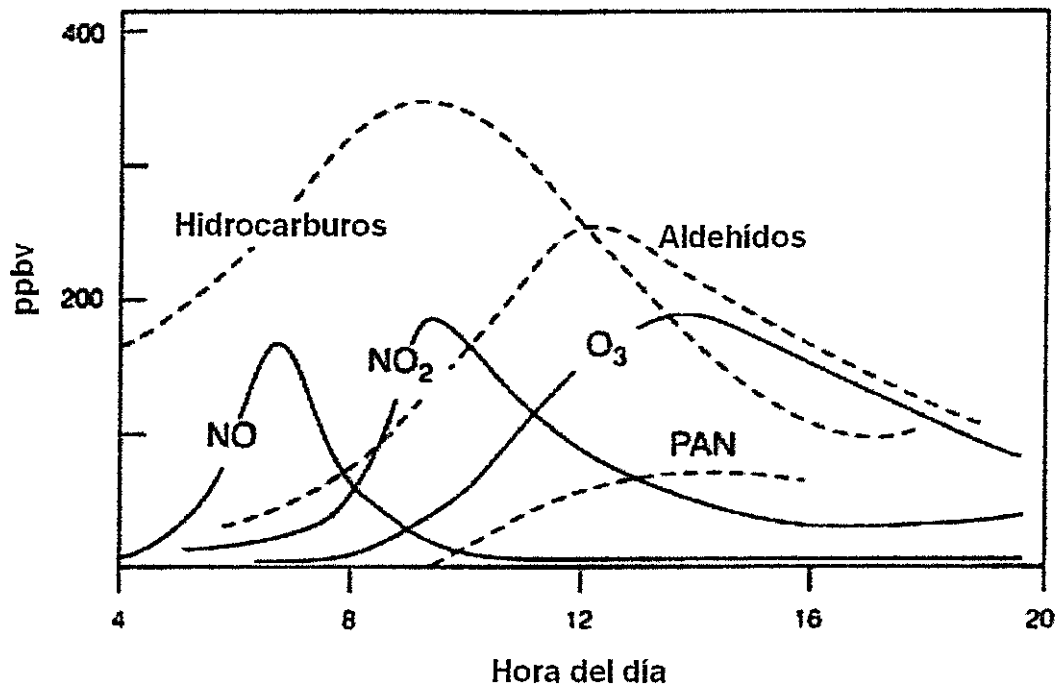
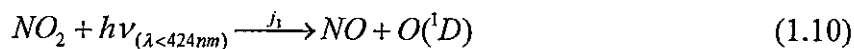


Figura 2. Evolución diaria de los precusores del smog fotoquímico. (Goody, 1995).

La formación de ozono troposférico comienza con la fotólisis del  $\text{NO}_2$ :



El  $\text{O}({}^1\text{D})$  resultante reacciona con una molécula de oxígeno para formar ozono (reacciones (1.2) y (1.3)).

En ausencia de otras reacciones competitivas el NO formado en la reacción (1.10) reaccionará rápidamente con el ozono formado cerrando el ciclo y restituyendo la molécula de  $\text{NO}_2$ :



Las reacciones ocurren rápidamente, estableciéndose una concentración de ozono dada por la relación de estado fotoestacionario:



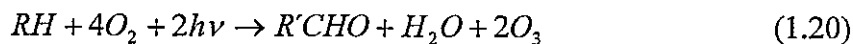
$$[O_3] = k \frac{[NO_2]}{[NO]} \quad (1.12)$$

De modo que la concentración de ozono dependerá de la relación  $\frac{[NO_2]}{[NO]}$  y del valor  $k = \frac{j_1}{k_1}$ , la cuál a su vez depende de la intensidad de la radiación solar.

De las reacciones se observa que no hay ganancia neta de ozono ya que el  $O_3$  producido en la reacción (1.3) se consume rápidamente por la reacción (1.11). La acumulación se explica sólo si existe un paso alternativo que evite su consumo, esto viene dado por la producción de ozono a través de la oxidación de COVs producida por los radicales  $\cdot OH$  y  $HO_2\cdot$ :



Reacción neta:



Si consideramos a la especie orgánica RH, donde R corresponde a una cadena hidrocarbonada, el mecanismo se inicia por la acción del radical  $\cdot OH$  que sustrae un

hidrógeno al hidrocarburo, rompiendo el enlace covalente creando otro radical libre  $R\cdot$  (reacción(1.13)), que reacciona con oxígeno para formar el radical peroxi ( $RO_2\cdot$ ) (reacción (1.14)) que oxida NO a  $NO_2$  formando el radical  $RO\cdot$  (reacción (1.15)), que en presencia de oxígeno forma un aldehído ( $R'CHO$ ) y un nuevo radical hidropéroxido ( $HO_2\cdot$ ) (reacción (1.16)), que oxida otra molécula de NO a  $NO_2$  (reacción (1.17)).

Cuando el NO se ha oxidado a  $NO_2$  (reacciones (1.15) y (1.17)) la descomposición fotoquímica de este último origina NO y oxígeno atómico (reacción (1.18)) que rápidamente reacciona con oxígeno molecular para dar ozono (reacción (1.19)).

El resultado neto del ciclo de reacciones es la formación de dos moléculas de ozono y un aldehído ( $R'CHO$ ). Los carbonilos formados pueden volver al ciclo de reacciones fotoquímicas que revertirán en una mayor producción de radicales orgánicos y radicales hidroxilos, que a su vez producirán una mayor cantidad de ozono.

### **1.3 Destrucción química y sumideros de ozono troposférico:**

En presencia de óxidos de nitrógeno, el ozono es titulado por NO (reacción (1.11)), esto ocurre principalmente en la noche donde la ausencia de actividad fotoquímica impide la formación de ozono y se favorece la acumulación de NO formado durante el día dejando a este último disponible para la reacción con ozono formando dióxido de nitrógeno y oxígeno molecular.

A muy bajas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles, las reacciones de radicales libres compiten con las siguientes reacciones:



Estas reacciones interconvierten las especies HOx y conducen a una pérdida catalítica de ozono. También en ausencia de óxidos de nitrógeno, la oxidación del CO puede llevar a un proceso de destrucción de ozono:



Reacción neta:



Si el  $HO_2 \cdot$  reacciona con otro radical peroxi en lugar del ozono, entonces no habría cambio en la concentración de ozono.

En regiones remotas a baja altitud y alta humedad, la fotólisis es el mecanismo predominante en la destrucción de ozono:



Muchos de los átomos de oxígeno electrónicamente excitados ( $O(^1D)$ ) se convierten a átomos no excitados (reacción (1.28)) que llevan a una rápida recombinación para volver a formar ozono. Unos pocos átomos excitados reaccionan con vapor de agua formando radicales hidroxilos (Warneck, 1988).

Desde un punto de vista físico, los procesos que eliminan ozono corresponden principalmente a depositación seca donde el ozono es absorbido en el suelo, en partículas, en agua o en la superficie de las plantas. La depositación húmeda, donde se incorpora ozono a elementos de precipitación (nubes, gotas de lluvia y aerosoles), es de poca importancia dada la baja solubilidad del ozono en agua (20 mL/L agua, 12°C y 1 atm (Babor y Ibarz, 1974), comparada por ejemplo con la del CO<sub>2</sub> que es de 111,8 mL/L de agua a la misma presión y temperatura).

#### **1.4 Meteorología asociada a contaminación por ozono:**

La zona de Chile central durante el período primavera-verano se ve fuertemente influenciada por la presencia semipermanente del Anticiclón del Pacífico Sur. Las condiciones sinópticas asociadas a altos índices de ozono están caracterizadas por la irrupción y presencia de una dorsal en la tropósfera media, marcada subsidencia sobre la zona central y altos valores de altura de geopotenciales en 500 hPa. Sincronizada en superficie se observa a menudo presencia de vaguada costera, que ocurre con mayor frecuencia a fines de primavera y durante el verano (Merino, 2006).

La subsidencia de las masas de aire determina el calentamiento adiabático por compresión, cielos despejados y marcada radiación solar incidente, reflejada en el aumento de la temperatura y consecuente sequedad de las masas de aire en la tropósfera media y baja (Merino, 2006).

A nivel de superficie tenemos que los contaminantes son emitidos a la atmósfera a un volumen de aire dado denominado capa de mezcla, que se ve afecta a las condiciones atmosféricas locales tales como inversiones térmicas, estabilidad

atmosférica, turbulencia, insolación, temperatura, humedad y geografía (Morales y Leiva, 2006). A escala local tenemos que durante la noche se forma una capa superficial limitada por una inversión térmica radiativa (Figura 3), que se produce por el enfriamiento acelerado de la superficie. A medida que la Tierra se enfría, la capa de aire cercana a la superficie también lo hace. Si la superficie se enfría a una temperatura menor que la del aire de la capa superior, se vuelve muy estable y la capa de aire cálido impide cualquier movimiento vertical. De esta forma se tiene una capa de mezcla a baja altura durante la noche y una débil capa residual que se ubica entre el tope de la capa de mezcla y la base de la subsidencia. Durante las primeras horas de la mañana, el aumento de la insolación provoca la ruptura de la inversión radiativa aumentando el volumen de mezcla formando una capa que estará delimitada ya sea por la inestabilidad atmosférica, por la base de la inversión térmica de subsidencia o por algún fenómeno de escala sinóptica.

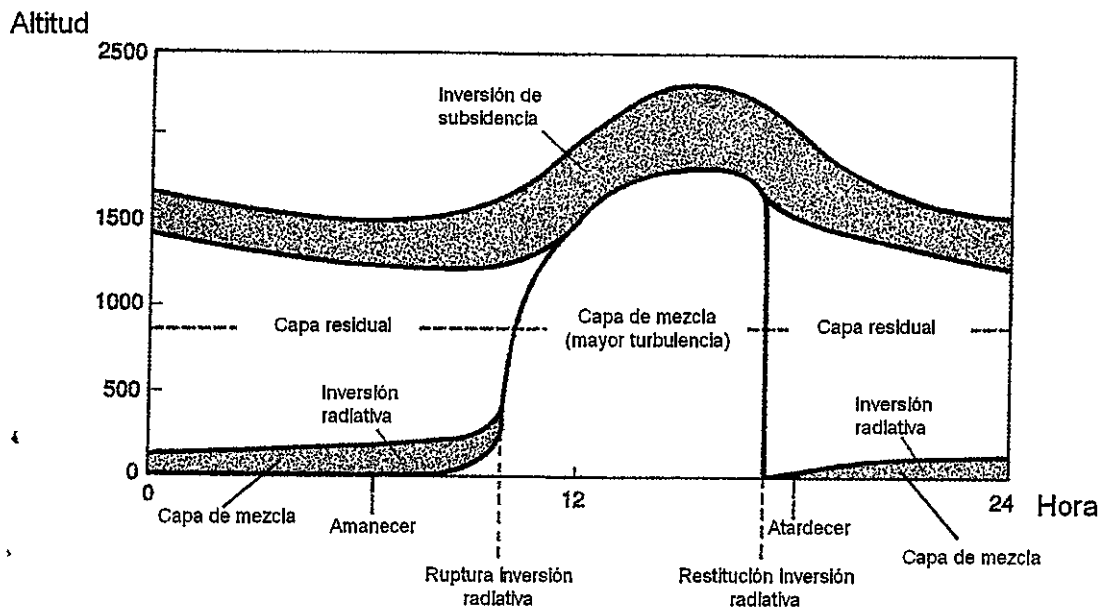


Figura 3. Evolución diaria de la capa de mezcla. (adaptado de Stull, 1989).

### 1.5 Mediciones de ozono:

Podemos dividir la instrumentación utilizada para medir ozono en dos grandes grupos, i) aquellos que miden ozono a nivel de superficie y ii) aquellos que miden la relación del ozono con la altura (perfiles verticales y columna de ozono). Los del primer grupo corresponden a monitores de ozono capaces de medir en forma continua mediante técnicas analíticas y espectroscópicas; siendo la más utilizada en la actualidad la medición de ozono mediante absorción de radiación ultravioleta según la Ley de Lambert-Beer.

Para obtener la variación que experimenta el ozono con la altura se utilizan diferentes métodos, uno de ellos es la medición con espectrofotómetros Dobson, que tiene su origen en el año 1920, miden la luz ultravioleta proveniente del Sol a diferentes longitudes de onda, en el rango entre 305 y 345 nm. El ozono absorbe fuertemente en 305 nm y no absorbe en 325 nm, la relación entre las dos intensidades representa una medida de la cantidad de ozono en el paso óptico recorrido. El espectrofotómetro Brewer, desarrollado en los ochenta y con presencia en más de 40 países en la actualidad, mide la radiación UV solar a cinco longitudes de onda entre los 300 y 330 nm.

Otro método de medición son las realizadas por satélites que proporcionan datos globales. Destacan las mediciones que en la actualidad realiza el *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS).

Las ozonosondas por su parte corresponden a un sensor de ozono que se ata a un globo de libre ascenso, el sensor envía por señal de radio la información a un receptor en tierra. Existen tres tipos de ozonosondas, siendo la *Electrochemical Concentration Cell*,

desarrollada por Komhyr en 1969, la más utilizada hasta el día de hoy. Este sensor se basa en un método electroquímico para la obtención de la concentración de ozono (ver 2.1.2).

Los perfiles de ozono también pueden ser medidos por instrumentos LIDAR de absorción diferencial y microondas, que tienen su fortaleza en la estratósfera y mesósfera principalmente.

### **1.6 Antecedentes:**

La cuenca de Santiago, ubicada al oeste de la Cordillera de Los Andes (altura promedio sobre 4500 msnm) y a unos 100 Km de la costa, separada de ésta por un cordón montañoso (Cordillera de la Costa con alturas por sobre los 1200 msnm) que presenta una interrupción de unos 50 Km de ancho por donde drena el río Maipo; se ve fuertemente influenciada por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental, resultando en una persistente inversión térmica de subsidencia y un clima semiárido. La condición geográfica de la ciudad le impone un fuerte obstáculo a la circulación de vientos a través de la cuenca provocando un encajonamiento hacia el oriente de la ciudad. Durante los meses de verano, el mayor calentamiento superficial permite romper la inversión térmica en horas de la mañana mejorando la ventilación, pero las altas emisiones de NOx y COVs y la alta radiación solar (mayor insolación en el período de verano con un máximo de 10 horas) conducen a problemas de contaminación por ozono (Morales y Leiva, 2006).

Históricamente se han experimentado episodios severos de contaminación por ozono en la zona central del país durante los meses de verano (diciembre, enero y

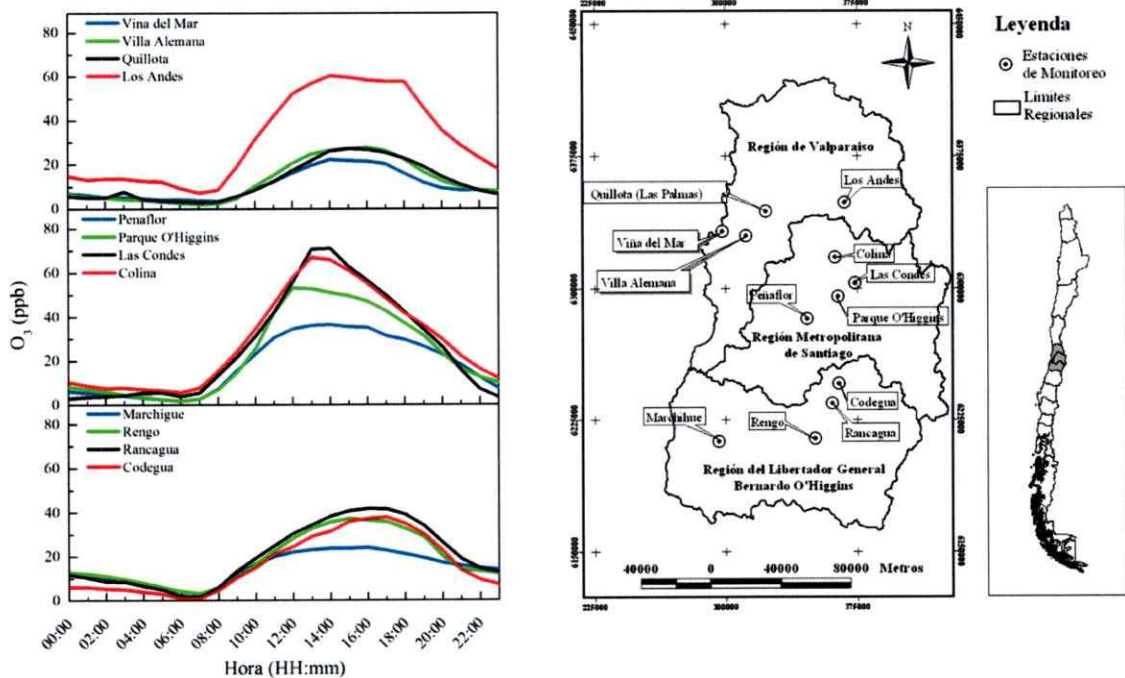
febrero), registrándose superaciones que llegaron a más de un tercio de los días, para el año 2009, del valor de la norma de 61 ppbv para el promedio móvil de 8 horas (Seguel, 2010).

En la Región Metropolitana, la estación de Las Condes, ubicada al nororiente de la capital es la que presenta la mayor cantidad de días con superación de la norma. La brisa valle-montaña que se establece en el período estival es predominante del sur y suroeste aumentando las concentraciones de ozono “viento abajo”, es decir, hacia el norte y noreste de las fuentes precursoras de ozono (NO<sub>x</sub> y COVs) (Morales y Leiva, 2006).

En la variación diaria del ozono, se observa que durante la noche las concentraciones decaen continuamente por la titulación con NO, llegando a valores cercanos a cero durante las primeras horas de la madrugada cuando los niveles de NO son significativamente mayores que el “*background*” de ozono (Villena y col., 2011).

Un estudio realizado el año 2010 (Figura 4), determinó la variación diaria de ozono en la zona central de Chile. Durante el día las concentraciones de ozono aumentan debido al inicio de la actividad fotoquímica producida por sus precursores y al aumento de la radiación solar alcanzando su pico máximo cercano al medio día y cuyo “hombro” se mantiene hasta pasadas las 18 horas. Se observa también un incremento de las concentraciones de ozono en dirección oeste - este dado por el movimiento de masas de aire contaminadas.





**Figura 4. Variación diaria del ozono para la Región de Valparaíso (16 de marzo al 6 de abril de 2010), Región Metropolitana (15 de diciembre de 2009 al 4 de enero de 2010) y Región del Libertador Bernardo O'Higgins (1 de febrero al 11 de marzo de 2010). (Seguel, 2011).**

Por otro lado, el rápido colapso del ozono en la capa de mezcla luego del atardecer permite pensar que el ozono queda atrapado en la capa residual, permaneciendo estable durante toda la noche representando un potencial reservorio de “ozono viejo” con la capacidad de poder irrumpir en superficie en horas de la tarde del día siguiente, fenómeno que ha sido descrito en otras latitudes (Morris y col., 2009; Velasco y col., 2007; Baumbach y Vogt 2003). Esta fenomenología de la irrupción de ozono podría explicar las rápidas saturaciones de que podrían dar cuenta las cuencas atmosféricas de extensión superficial pequeñas, como las que se encuentran en Chile.

El año 2009 el Centro Nacional del Medio Ambiente inicia un proyecto de investigación (financiado por el Gobierno de Chile a través del Ministerio del Medio

Ambiente) cuyo objetivo principal fue la caracterización de la contaminación fotoquímica en la zona central de Chile, de sus precursores orgánicos, establecer el comportamiento de los óxidos de nitrógeno y la consecuente formación de ozono. Es dentro de este último punto que nació la pregunta respecto de los cambios que experimenta el ozono con la altitud dentro de la capa de mezcla en los valles centrales de Chile, por lo que este trabajo se enmarca en ese objetivo específico a través de la hipótesis que se plantea a continuación.

### **1.7 Hipótesis:**

La zona central de Chile, y en particular la Región Metropolitana, presenta altos índices de concentración de ozono, los que se realzan en los meses de verano, y que son ocasionados principalmente por las altas emisiones de precursores de origen antropogénico y biogénico. De estudios preliminares de concentraciones de ozono en mediciones de superficie, datos de meteorología local, y dadas las condiciones geográficas de la cuenca atmosférica en que se ubica la ciudad de Santiago, nos permiten proyectar una zona preferencial de contaminación por ozono en altura, dentro de la capa de mezcla, cuya distribución se orientaría hacia la zona nororiente.

Lo anteriormente expuesto nos permite plantear la hipótesis de que estas masas de aire enriquecidas en  $O_3$  deberían estar sobrepasando el cordón de Chacabuco (límite norte de la Región Metropolitana) dirigiéndose en dirección Colina – Los Andes, por lo que la contaminación fotoquímica producida principalmente en la ciudad de Santiago se estaría extendiendo hacia la V Región Cordillera en una capa de aire que debiera ser

capaz de sobrepasar la barrera natural que impone el cordón de Chacabuco, cuya altitud en esta dirección varía entre los 1300 y 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm).

## **1.8 Objetivos:**

### **1.8.1 Objetivos generales:**

- Establecer la presencia, comportamiento y distribución horizontal y vertical del ozono en la capa de mezcla entre las regiones V, Metropolitana y VI.
- Caracterizar los perfiles verticales de ozono dentro de la capa de mezcla entre las regiones V, Metropolitana y VI.

### **1.8.2 Objetivos específicos:**

- Caracterizar la variabilidad diaria y estacional de los perfiles verticales de ozono de la Región Metropolitana.
- Identificar los procesos de intercambio altura-superficie de ozono asociados a sus características físico-químicas, sus precursores (NO<sub>x</sub> y COVs) y variables meteorológicas del área de estudio.
- Caracterizar y comparar los perfiles de ozono en los meses de verano de la zona central de Chile.
- Identificar y caracterizar el movimiento horizontal de ozono en la capa de mezcla desde la Región Metropolitana hacia la V Región.

## II MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 Materiales:

Para llevar a cabo el estudio se utilizó la instrumentación que se detalla a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Equipamiento utilizado en el estudio.

Equipo	Modelo	Marca
Sistema de radiosondeo DigiCORA	MW 31	Vaisala
Sistema de globo cautivo	TTB329	Vaisala
Monitor de ozono	205	2B Technologies
Monitor de ozono	49 i	Thermo Scientific
Monitor de NO, NO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub>	42 i	Thermo Scientific
Sensor de dirección y velocidad del viento	05305	R. M. Young

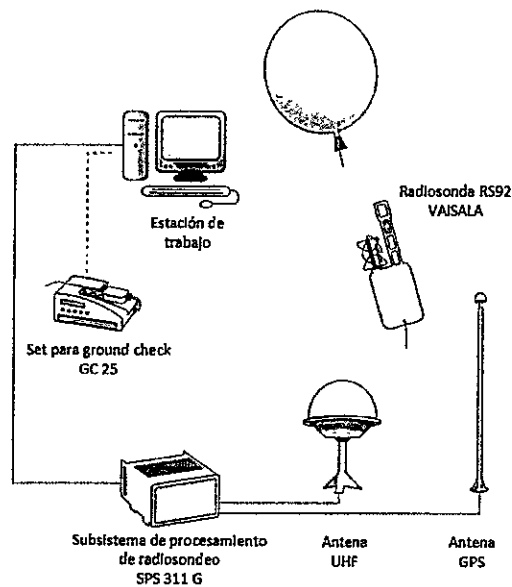
#### 2.1.1 Sistema de radiosondeo DigiCORA MW31:

El sistema está compuesto por:

- Ozonosonda ECC-6A, que mediante reacciones electroquímicas es capaz de medir ozono.
- Radiosonda RS92-SGP, capaz de medir presión, temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento.
- Set de antenas *Global Positioning System* (GPS) y *Ultra High Frequency* (UHF).
- Subsistema de procesamiento de radiosondeo, SPS 311 G.
- Set para ground check GC 25, para chequeo de radiosonda antes del vuelo.

- Estación de trabajo.
- Globos Totex fabricados de goma natural.
- Paracaídas Totex.

El acoplamiento de la radiosonda y la ozonosonda mediante una interfase, permite crear un paquete de información que incluye datos de ozono, presión, temperatura y humedad que es recepcionado en tierra por una antena UHF. La velocidad y dirección del viento se determinan por medio de satélites de navegación GPS. El subsistema de procesamiento de radiosondeo recibe las mediciones, hace la limpieza de la información y luego produce los conjuntos de datos de salida que son tomados por un software (DigiCORA Sounding Software, versión 3.62) instalado en una estación de trabajo que reproduce los datos del sondeo en forma de mensajes, gráficas y listas de datos. Las sondas se atan a globos que son llenados con helio con capacidad de ascenso hasta los 35 mil metros de altura (Figura 5).



**Figura 5. Sistema de radiosondeo DigiCORA MW31.**  
Fuente: Vaisala, 2005.

### 2.1.2 Principio de medición de la sonda de ozono:

La sonda de ozono es una *Electrochemical Concentration Cell* modelo 6A (ECC-6A, fabricada por Science Pump Corporation) (Figura 6). Está compuesta por una bomba de muestreo que introduce aire (con ayuda de un motor alimentado por baterías) a unas cámaras que contienen electrodos de platino inmersos en soluciones de yoduro de potasio a diferentes concentraciones. Fabricadas de politetrafluoroetileno (resina de Teflón TFE), las cámaras se encuentran unidas por un puente iónico que sirve para retardar la mezcla de las soluciones electrolíticas del cátodo y ánodo de modo de preservar sus concentraciones.

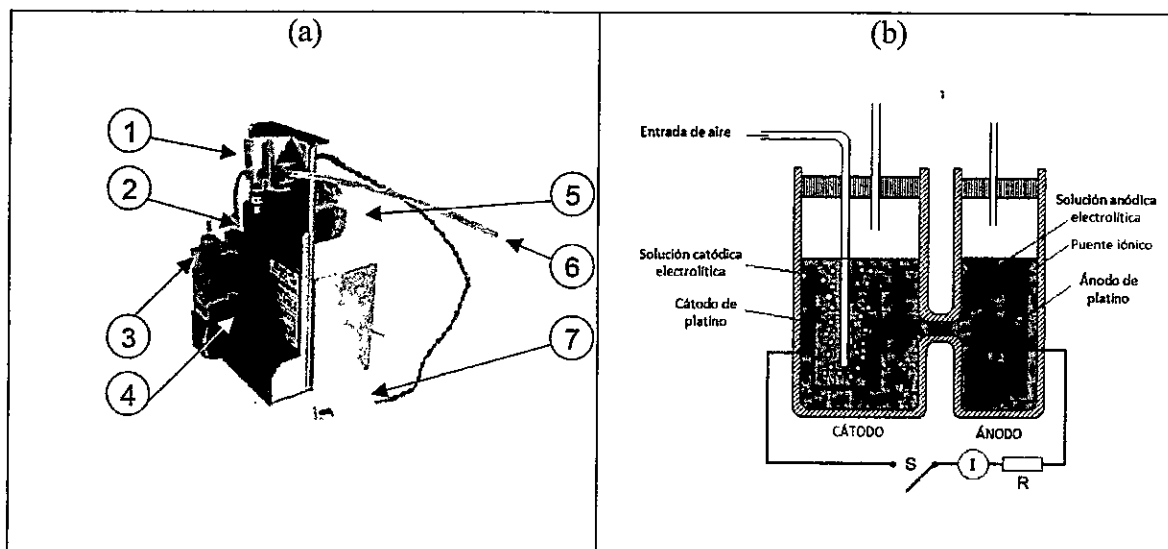
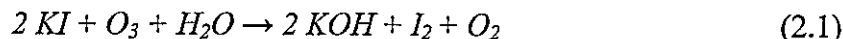


Figura 6. Sonda de ozono ECC-6A. (a) (1) Bomba de muestreo, (2) Cátodo, (3) Ánodo, (4) Cables para interfase, (5) Motor, (6) Manguera de aspiración de aire, (7) Conector para batería. (b) Esquema interno.

Fuente: Science Pump Corporation, 2004.

La reacción electroquímica toma lugar en los electrodos, que son químicamente inertes y no participan en la reacción, su misión es el transporte de electrones. Cuando

una muestra de aire ozonizada entra en la solución catódica, ocurre la siguiente reacción:



Se observa que el  $I_2$  formado incrementa su concentración. Si el circuito externo se cierra (switch S, Figura 6 (b)), a la reacción (2.1) le siguen:

Reacción anódica:



Reacción catódica:



Reacción neta:



Las reacciones (2.2) y (2.3) determinan la velocidad de la reacción dado que los electrones deben ser transferidos en la superficie de los electrodos.

La ECC-6A no requiere la aplicación de una fuerza electromotriz (fem) externa para funcionar, ya que la diferencia de concentración del yoduro de potasio entre el cátodo y el ánodo produce una diferencia de potencial entre ellos. La fem (E) de la celda puede ser calculada a partir de la ecuación de Nernst:

$$E \approx -\frac{0,0591}{2} \log K \quad (2.5)$$

Siendo:

$$K = \frac{(a_1)_{I_3^-} \cdot (a_3)_{I^-}^2}{(a_4)_{I_2} \cdot (a_2)_{I^-}^3} \quad (2.6)$$

Donde:

$a_1$  y  $a_2$  son las actividades respectivas del  $I_3^-$  y  $I^-$  dentro del compartimiento del ánodo; y  $a_3$  y  $a_4$  son las actividades respectivas del  $I^-$  y  $I_2$  dentro de la cámara del cátodo. En el equilibrio  $K \approx 1$ , las actividades son aproximadamente iguales a la concentración.

**En resumen:**

Cuando se cierra el circuito, la fem fuerza al ion yoduro próximo al ánodo a dar dos electrones al ánodo que son extraídos por el yodo en solución del cátodo. Se observa entonces un momentáneo incremento de la corriente, justo cuando se produce un aumento de la concentración de  $I_3^-$  en el electrolito del ánodo y una disminución de  $I_2$  en el del cátodo. Las actividades  $a_1$  y  $a_4$  cambian hasta que se alcanza la condición  $K \approx 1$ , que es cuando la fem decrece a cero alcanzando la condición de equilibrio. Por ejemplo, si la concentración de  $I_2$  se incrementa en la cámara del cátodo,  $K < 1$ , lo que produciría que la fem fuese positiva, por lo que las moléculas de yodo en las proximidades del cátodo tienden a aceptar electrones del mismo siendo reducidos a yoduro, mientras que el ion yoduro en las proximidades del ánodo es forzado a dar electrones al ánodo oxidándose a yodo, por lo que la intensidad de la corriente está directamente relacionada con la velocidad de conversión de yoduro a yodo, o de yodo a yoduro.



### 2.1.3 Cálculo de la concentración de ozono:

De las reacciones (2.1), (2.2) y (2.3) se desprende que cada molécula de ozono provoca una corriente eléctrica de dos electrones, de modo que  $N$  moléculas de ozono producen una carga  $Q = N \cdot 2e^-$ , pero  $N = N_A \cdot n$  (siendo  $N_A$  el número de Avogadro y  $n$  el número de moles). De la Ley de gases ideales tenemos que:

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT = \frac{Q}{2e^- N_A} RT \quad (2.7)$$

Cómo la intensidad de la corriente  $I = Q/t$  (carga en un tiempo dado), obtenemos:

$$PV = \frac{ItRT}{2e^- N_A} \quad (2.8)$$

Despejando  $P$ :

$$P = \frac{ItRT}{2e^- N_A V} \quad (2.9)$$

Pero:

$$e^- = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Por lo que el producto  $e^- \cdot N_A = 96485,34 \text{ C mol}^{-1} =$  constante de Faraday,  $F$ .

Reemplazando:

$$P = \frac{ItRT}{2FV} \quad (2.10)$$

Y considerando que el flujo de aire que entra por la bomba está dado por el tiempo  $t$  que demoran 100 mL en entrar a la celda, se tiene:

$$P = \frac{ItRT}{2F100mL} \quad (2.11)$$

Con  $R = 8,31431 \text{ JKmol}^{-1}$ , se tiene que:

$$P = 4,308 \cdot 10^{-4} ItT \quad (2.12)$$

Esta ecuación permite el cálculo de ozono a partir de las reacciones electroquímicas descritas, sin embargo, experimentalmente se ha observado que, en ausencia de ozono, existe una corriente eléctrica producida por especies oxidantes interferentes en la medición (especialmente el  $\text{O}_2$ ). También se ha detectado que la eficiencia de la bomba de muestreo disminuye al variar la presión ambiental. Debido a las dos condiciones anteriores es que a la ecuación (2.12) se le deben incorporar factores de corrección, por lo que finalmente se obtiene:

$$P = 4,308 \cdot 10^{-4} (I - I_{BG}) \cdot t \cdot T \cdot C_{ef} \cdot C_{ref} \quad (2.13)$$

Donde:

P : presión parcial de ozono (en mPa).

I : intensidad de la corriente eléctrica (en  $\mu\text{A}$ ).

$I_{BG}$  : corriente generada por otros oxidantes diferentes al ozono (en  $\mu\text{A}$ ).

t : tiempo de bombeo para 100 mL de aire (en s).

T : temperatura del aire medida en la base de la bomba (en K).

$C_{ef}$  : factor de corrección por disminución en la eficiencia que sufre la bomba con la variación de la presión ambiental con la altura. Los valores de este coeficiente están establecidos para los distintos niveles de presión y son incorporados automáticamente por el software de adquisición de datos (*Digicora Sounding Software*).

$C_{ref}$  : factor de corrección aplicado cuando se compara con otros métodos analíticos de medición de ozono (por ejemplo, absorción de radiación UV). Si no se compara con otro método,  $C_{ref}=1$ .

## 2.2 Sistema de globo cautivo TTB 329 Vaisala:

Se compone de un globo tipo zeppelin de 7 m<sup>3</sup> de volumen que se ata a un huinche eléctrico con una línea de 1000 m de largo (Figura 7). Al sistema se le acopla un monitor de ozono en miniatura marca 2B Technologies modelo 205, cuyo principio de medición es la absorción UV a 253,7 nm. El monitor usa dos celdas de detección para mejorar la precisión, la estabilidad de la línea base y el tiempo de respuesta (2B Technologies, Inc, 2005). Su pequeño tamaño (9 x 21 x 29 cm) y bajo peso (0,7 Kg sin carcasa) permitieron acoplarlo al globo cautivo para alcanzar una elevación de al menos 200 metros de altura.

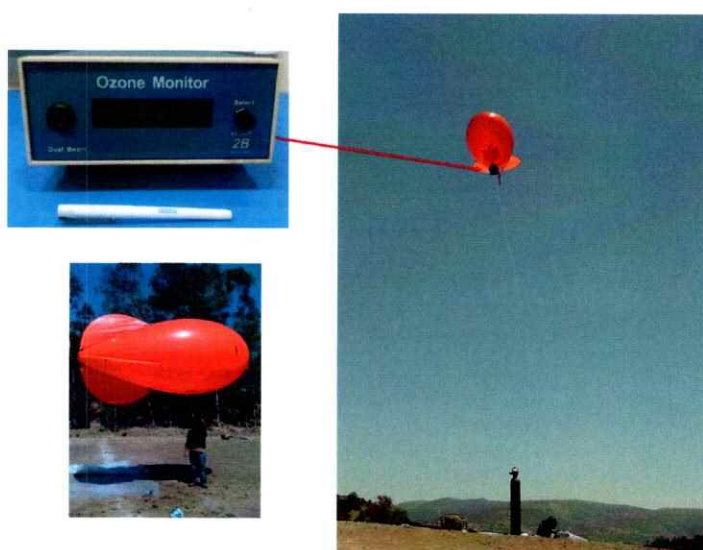


Figura 7. Sistema de globo cautivo TTB 329 Vaisala con incorporación del monitor de ozono 2B Technologies modelo 205.

### 2.3 Monitor de ozono 49i Thermo Scientific:

Para realizar mediciones de ozono a nivel de superficie se utilizaron monitores de ozono marca Thermo Scientific modelo 49i (método equivalente EPA, EQOA-0880-047). El fundamento de medición consiste en que la molécula de ozono absorbe radiación ultravioleta a una longitud de onda de 253,7 nm. El grado de absorción de dicha radiación se relaciona directamente con la concentración de ozono de acuerdo a la Ley de Lambert-Beer:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kLC} \quad (2.14)$$

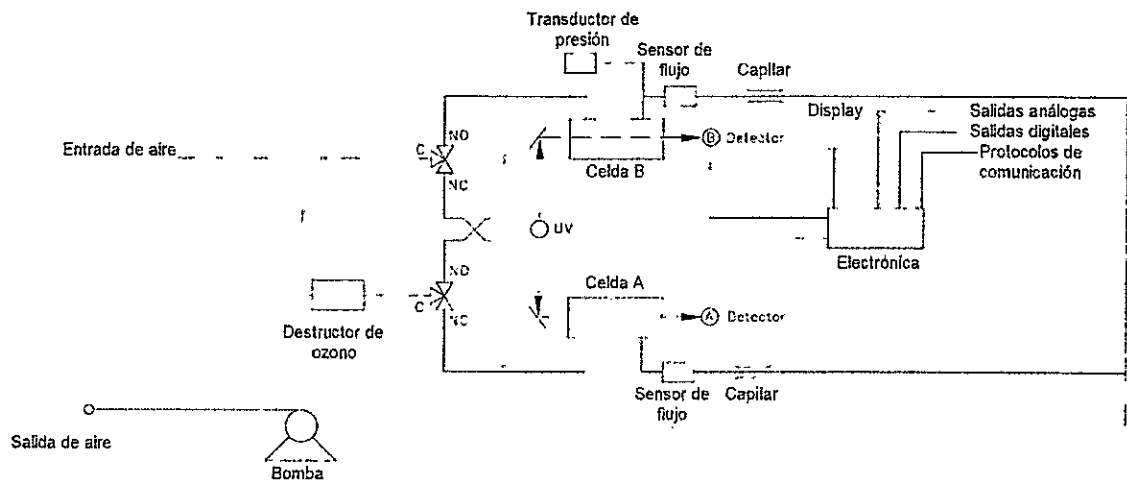
Donde:

- K : coeficiente de absorción molecular del ozono ( $308 \text{ cm}^{-1}$ , a  $0^\circ\text{C}$  y 1 atm).
- L : longitud del paso óptico (38 cm).
- C : concentración de ozono (en ppmv).
- I : intensidad de la luz ultravioleta de una muestra de aire con ozono (muestra de gas).
- $I_0$  : intensidad de la luz ultravioleta de una muestra de aire sin ozono (gas de referencia).

La muestra entra en el equipo y se divide en dos, como se muestra en la Figura 8, un flujo pasa a través del destructor de ozono y se convierte en el gas de referencia ( $I_0$ ), el otro flujo constituye la muestra de gas (I). Ambos pasan a través de válvulas de solenoide que alternan entre muestra de gas y gas de referencia entre las celdas A y B

cada diez segundos. Cuando la celda A contiene gas de referencia, la celda B contiene a la muestra de gas y viceversa.

La intensidad de la radiación ultravioleta de cada celda es medida por los detectores A y B. Cuando las válvulas de solenoide cambian entre gas de referencia y muestra de gas a la celda opuesta, se ignoran las intensidades de luz UV por algunos segundos para permitir que las celdas se vacíen y se vuelvan a llenar completamente. El monitor entrega el promedio de las concentraciones de ozono obtenidas en cada celda.



**Figura 8. Esquema interno monitor de ozono Thermo 49i.**  
Fuente: Thermo Scientific, 2008

#### **2.4 Monitor de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) 42i Thermo Scientific:**

Para realizar mediciones de NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) a nivel de superficie se utilizaron monitores continuos marca Thermo Scientific modelo 42i (método de referencia EPA, RFNA-1289-074). El fundamento de medición consiste en el principio de que la reacción entre el óxido nítrico (NO) y el ozono produce una molécula de NO<sub>2</sub> excitada con liberación de oxígeno molecular:



El  $NO_2^*$  formado vuelve rápidamente a su estado basal liberando el exceso de energía como un fotón:



La intensidad del fotón liberado es proporcional a la concentración de NO en la reacción (2.15).

Como la reacción es específica para el NO, primero el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) se debe transformar a óxido nítrico, esto se logra en una cámara de molibdeno que se encuentra a 325 °C. La temperatura proporciona la energía necesaria para la conversión  $NO_2$  a NO.

Se toma una muestra de aire ambiente, como se indica en la Figura 9. La muestra pasa a través de un capilar y luego a una válvula de solenoide que alterna entre modo NO y modo NOx. En modo NO la muestra pasa directo a la cámara de reacción. En modo NOx la muestra pasa a la cámara de molibdeno donde todos los óxidos de nitrógeno se convierten a NO y luego pasa a la cámara de reacción.

Para la producción del ozono necesario para llevar a cabo la reacción (2.15), entra aire seco a un ozonizador, que mediante descargas eléctricas convierte oxígeno en  $O_3$ . El ozono formado pasa a la cámara de reacción donde reacciona con el NO de la muestra produciendo  $NO_2^*$ . Un tubo fotomultiplicador (PMT) detecta la luminiscencia generada durante la reacción.

Como el monitor mide NO y NOx, por diferencia se obtiene el  $NO_2$  ( $NOx = NO + NO_2$ ).

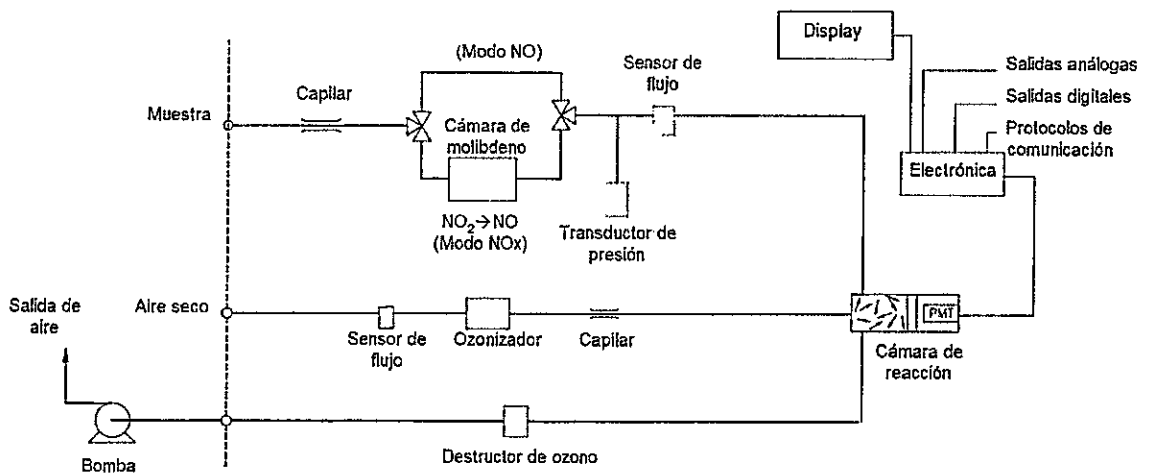
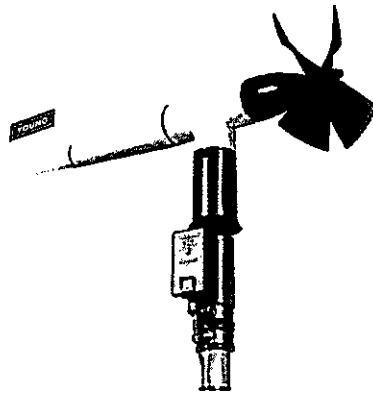


Figura 9. Esquema interno monitor de NOx Thermo 42i.  
Fuente: Thermo Scientific, 2006.

## 2.5 Sensor de dirección y velocidad del viento R. M. Young modelo 05305:

Para realizar mediciones en superficie de dirección y velocidad del viento se utilizó un sensor R. M. Young modelo 05305 (Figura 10). La rotación de la hélice produce una señal de onda sinusoidal de CA cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del viento. La posición de la aleta se transmite a través de un potenciómetro con aplicación de un voltaje constante, la señal de salida es un voltaje análogo directamente proporcional al ángulo azimutal.



**Figura 10. Sensor de dirección y velocidad del viento R.M. Young modelo 05305.**

## **2.6 Método:**

Para el estudio de los perfiles verticales de ozono dentro de la capa de mezcla entre las regiones V, Metropolitana y VI, se diseñaron tres programas. El primero corresponde a un programa anual de lanzamientos de ozonosondas desde la comuna de Colina en la Región Metropolitana, que permitiera caracterizar la variación que presenta el ozono en el perfil en altura a lo largo del año. El segundo corresponde a un programa que diera cuenta de la distribución del ozono en la zona central, para lo cual se realizaron ozonosondeos entre los meses de enero y febrero en las regiones V, Metropolitana y VI. Finalmente se desarrolló un programa que permitiera comprobar o descartar el transporte de ozono desde Santiago hacia Los Andes, para ello, en el mes de enero de 2011 se realizaron lanzamientos de ozonosondas y monitoreo en superficie de ozono, óxidos de nitrógeno y variables meteorológicas entre Colina, Las Condes y Los Andes. El detalle de los programas anteriormente expuestos se muestra a continuación:



### **2.6.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana (Programa 1):**

Se diseñó una programa anual de lanzamientos de ozonosondas de 13 meses de duración (septiembre 2010 - septiembre 2011). En el período de estudio se realizaron lanzamientos de ozonosondas desde Colina sobre una base mensual a diferentes horas del día, de modo de observar la variación diaria del perfil vertical de ozono y sus cambios a lo largo del año. Los horarios seleccionados (horario invierno) correspondieron al amanecer, a la media mañana y primeras horas de la tarde (ver Tabla 2). Los lanzamientos se realizaron en una estación de calidad de aire, instalada exclusivamente para este estudio en la Municipalidad de Colina y que cumple con los requerimientos del Reglamento de Estaciones de Medición de Contaminantes Atmosféricos (Decreto n° 61. Ministerio de Salud. 2008).

**Tabla 2. Variación anual de los perfiles de ozono en la Región Metropolitana. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas.**

Lugar de lanzamientos	Fecha*	Hora
Colina	29.09.10	15:36
	30.09.10	06:38
	30.09.10	14:17
	19.10.10**	06:02
	25.11.10	14:00
	26.11.10	06:00
	26.11.10	10:50
	26.11.10	13:58
	21.12.10	14:19
	22.12.10	05:55
	22.12.10	10:58
	22.12.10	14:04
	28.02.11	06:02
	28.02.11	11:01
	28.02.11	13:56
	23.03.11	13:56
	28.04.11	13:59
	26.05.11	14:01
	23.06.11	14:04
	28.07.11	14:04
23.08.11	13:55	
26.09.11	14:02	

\*No se realizaron lanzamientos en enero.

\*\*Por falla en el equipo se realizó 1 lanzamiento en octubre.

### 2.6.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile (programa 2):

Dentro de la hipótesis planteada, la distribución del ozono en la zona central de Chile se orientaría hacia la zona nororiente, para confirmar o descartar este hecho se diseñó un programa de ozonosondeos, entre los meses de enero y febrero de 2011, que abarcó las regiones V, Metropolitana y VI (Tabla 3).

**Tabla 3. Distribución de ozono en la zona central de Chile. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas.**

Lugar de lanzamientos	Fecha	Hora
Los Andes	06.01.11	06:06
	06.01.11	11:06
	06.01.11	15:01
Rancagua	13.01.11	06:10
	13.01.11	11:47
	13.01.11	14:33
San Antonio	18.01.11	06:04
	18.01.11	11:28
	18.01.11	14:13
Peñaflor	22.02.11	06:00
	22.02.11	11:19
	22.02.11	14:37
Las Condes	23.02.11	06:13
	23.02.11	11:06

Se complementará la información de la Tabla 3 con los lanzamientos realizados en Colina el 28 de febrero (Tabla 2).

### **2.6.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes (programa 3):**

Para el mes de enero se diseñó un programa de monitoreo que permitiera confirmar o descartar experimentalmente el transporte de ozono desde la Región Metropolitana hacia la V Región (corredor atmosférico Colina - Los Andes). Durante tres días consecutivos se realizaron dos lanzamientos de ozonosondas diarios, uno al medio día en la Región Metropolitana (19 y 20 de enero en Colina y 21 de enero en Las Condes) y uno en la tarde desde Los Andes (19, 20 y 21 de enero) (ver Tabla 4). Simultáneamente se midió ozono en un punto en altura entre Colina y Los Andes en el cordón de Chacabuco con el sistema de globo cautivo de la Figura 7, con lo que se obtuvieron mediciones continuas de O<sub>3</sub> a una altitud de 1800 metros.

**Tabla 4. Distribución del ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes. Fecha y hora de lanzamientos de ozonosondas.**

Lugar de lanzamientos	Fecha	Hora
Colina	19.01.11	10:53
Los Andes	19.01.11	17:11
Colina	20.01.11	12:05
Los Andes	20.01.11	17:08
Las Condes	21.01.11	12:03
Los Andes	21.01.11	17:20

Para complementar la información de los ozonosondeos se realizó monitoreo en superficie de ozono, óxidos de nitrógeno, velocidad y dirección del viento en Colina y de ozono y óxidos de nitrógeno en Los Andes.

#### 2.6.4 Puntos de monitoreo:

A continuación se muestra un resumen con información referente a la ubicación de los puntos seleccionados para realizar los programas (Tabla 5 y Figura 11).

**Tabla 5. Tabla resumen. Ubicación puntos de lanzamientos.**

Localidad	Punto de lanzamiento	Dirección	Coordenadas	Altitud msnm	Nº de lanzamientos
San Antonio	Liceo Juan Dante Parraguez A.	Av. Barros Luco 2401	Lat 33,60254° Lon 71,61442°	16	3
Los Andes	Estación Los Andes Red SIVICA	Av. Santa María 777	Lat 32,84637° Lon 70,58648°	836	6
Colina	Ilustre Municipalidad de Colina	Av. Colina 700	Lat 33,20585° Lon 70,68453°	609	24
Las Condes	Estación Las Condes Red MACAM	Av. Las Condes 11725	Lat 33,37681° Lon 70,52362°	794	3
Peñaflor	Ilustre Municipalidad de Peñaflor Dirección de Aseo y Ornato	Jaromir Pridal 669	Lat 33,60070° Lon 70,90067°	377	3
Rancagua	Estación Rancagua Red SIVICA	Av. República de Chile esquina Av. Compañía	Lat 34,16232° Lon 70,71395°	512	3

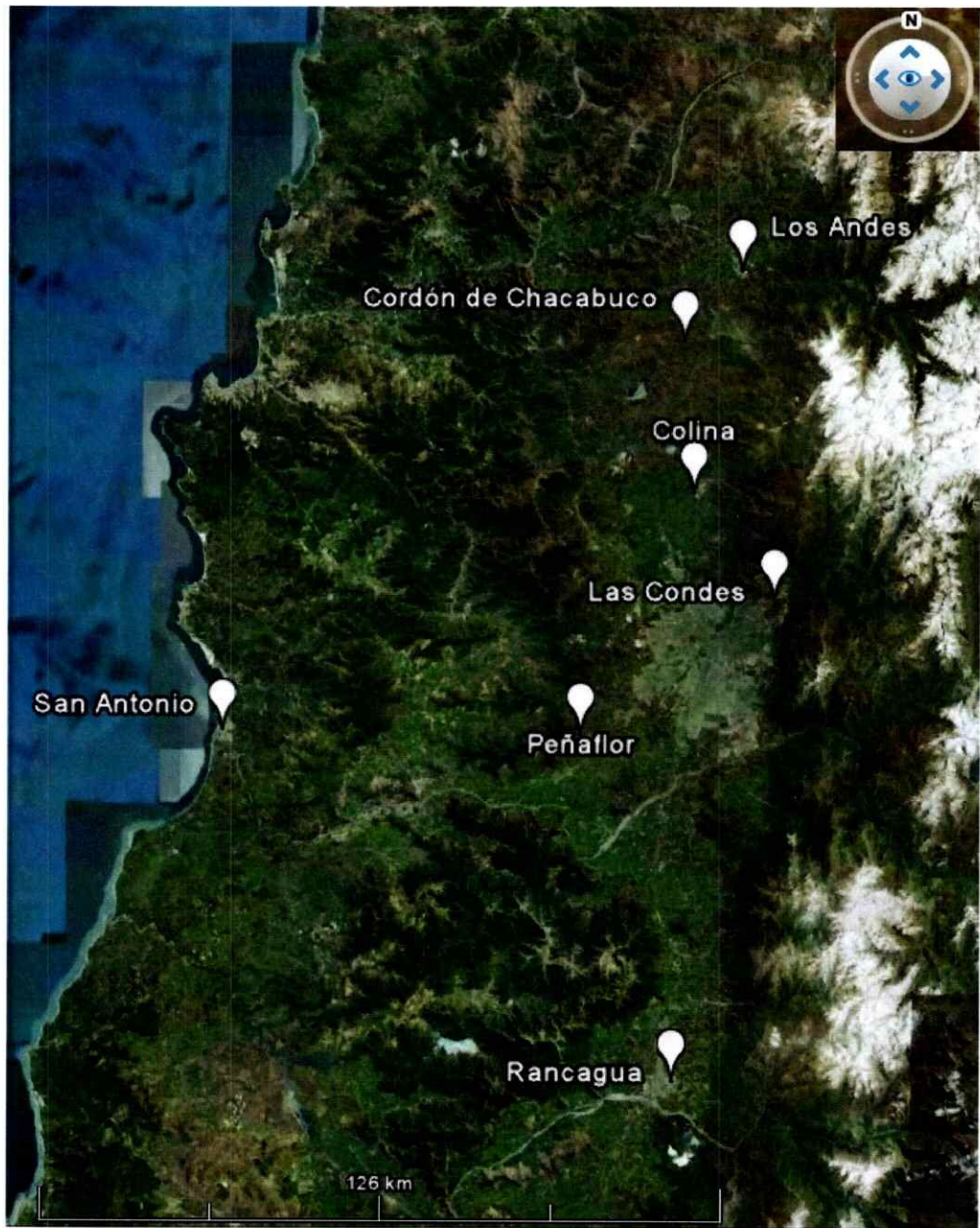


Figura 11. Puntos de lanzamientos de ozonosondas.

### **2.6.5 Identificación de la altitud de la capa de mezcla:**

Para identificar la altitud de la capa de mezcla se utilizarán las variables obtenidas a partir de la información meteorológica de los sondeos: inversiones térmicas, temperatura potencial, punto de rocío, humedad relativa y perfil adiabático seco (ver Glosario de Términos en la página xi).

### III RESULTADOS

#### **3.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana (resultados programa 1):**

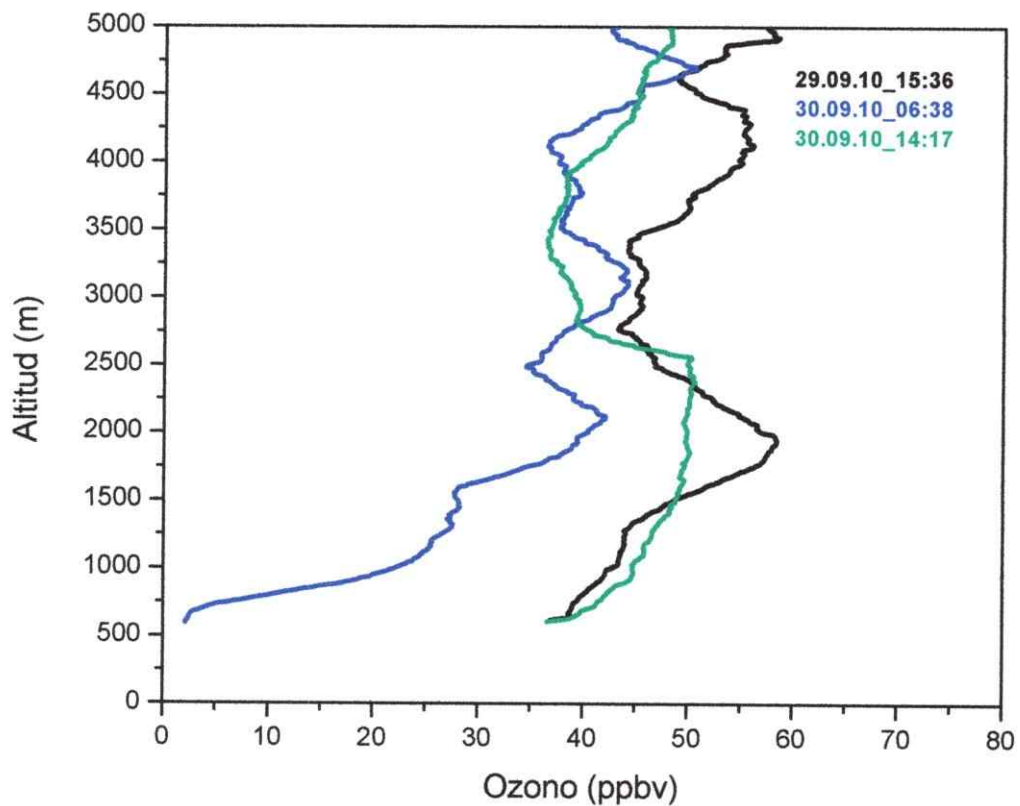
A continuación se presentan los resultados para el período septiembre 2010 - septiembre 2011, obtenidos sobre una base mensual desde la comuna de Colina en la Región Metropolitana, de acuerdo a lo descrito en el punto 2.6.1.

La Figura 12 muestra el inicio del programa 1 con tres lanzamientos realizados entre los días 29 y 30 de septiembre de 2010.

Para el lanzamiento del día 29 (en negro) se observa un aumento de las concentraciones de ozono con la altura con un pico de 58,2 ppbv en los 1978 m, por sobre esta altitud se observa un decaimiento para luego aumentar hasta 55,8 ppbv en los 4127 m de altitud.

Para el primer lanzamiento del día 30 (en azul) se observa una baja concentración de ozono en superficie (2,2 ppbv) con un rápido incremento con la altura donde se observan dos picos (de 41,9 ppbv en 2117 m y 44,0 ppbv en 3190 m de altitud) separados por un decaimiento (28,1 ppbv en los 1476 m). El perfil hasta los 2500 m presenta un comportamiento similar al del día anterior, con cierta variación en la altitud respecto de los picos, pero con menores concentraciones.

Para el último lanzamiento del día 30 (en verde) se observa un lento aumento con la altura hasta alcanzar los 50,0 ppbv en los 2559 m de altitud donde se produce un marcado quiebre en el perfil vertical, que no se observa en los perfiles anteriores. Se observa un aumento en las concentraciones hasta la altura del quiebre en comparación al perfil de la mañana. No se aprecia el pico en torno a los 2000 m visto en los dos perfiles anteriores.



**Figura 12. Perfiles verticales de ozono. Colina, 29 y30 de septiembre de 2010.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**



Por fallas en el equipo, en octubre de 2010 solo fue posible realizar un lanzamiento de ozonosonda, la Figura 13 muestra el perfil que se obtuvo para el día 19 de ese mes a las 06:02. Se observa en superficie una concentración de ozono de 3,2 ppbv con un rápido aumento con la altitud hasta los 2291 m donde el O<sub>3</sub> llega a 56,2 ppbv, por sobre este pico se observa un decaimiento acompañado de un nuevo incremento a mayor altitud, alcanzando los 47,1 ppbv en 4000 m.

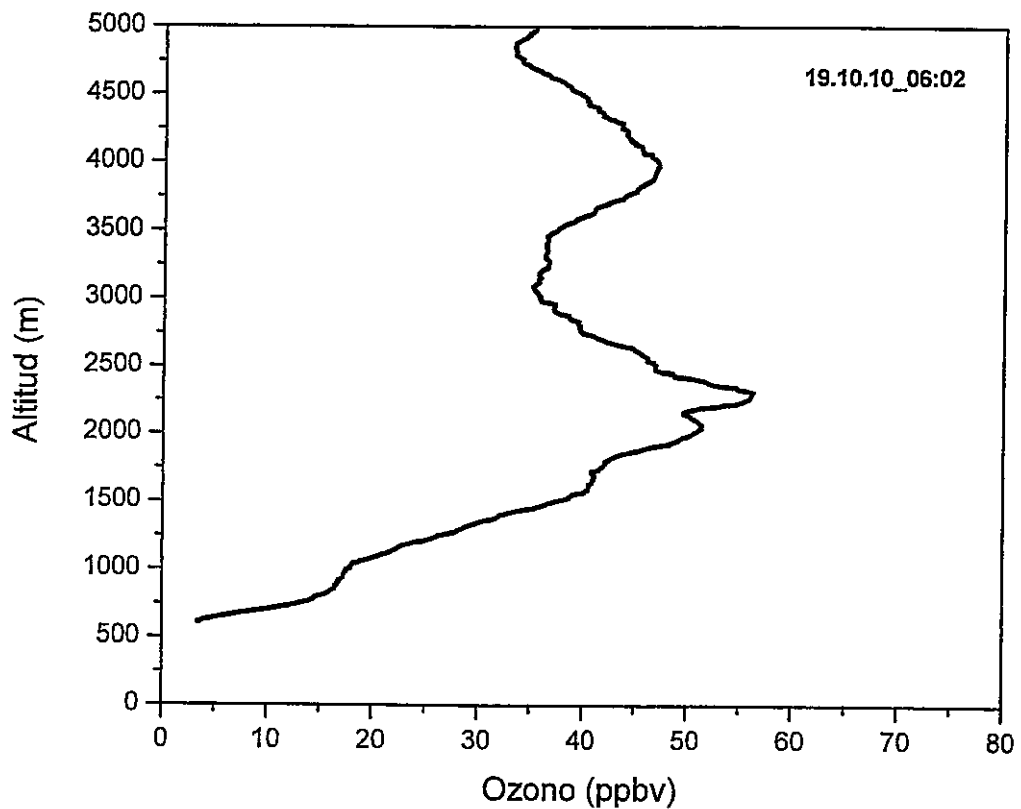


Figura 13. Perfil vertical de ozono. Colina, 19 de octubre de 2010.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

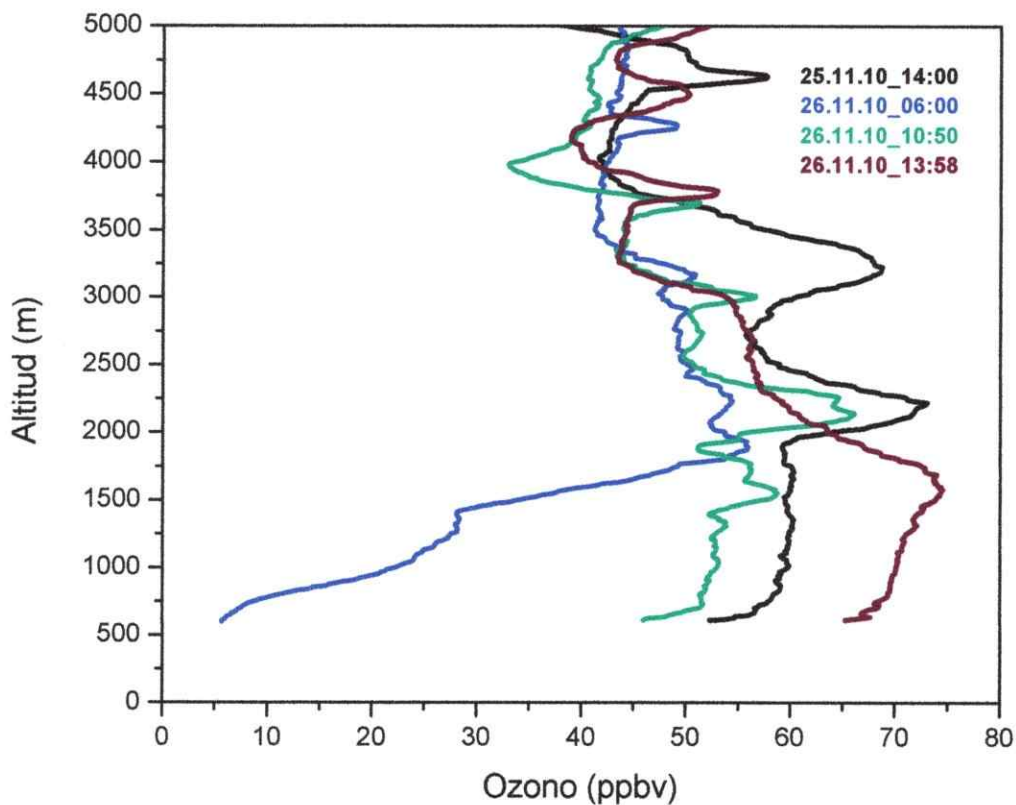
La Figura 14 muestra los perfiles de ozono para el mes de noviembre de 2010, donde se realizaron cuatro lanzamientos de ozonosondas entre los días 25 y 26.

Se observa que para el lanzamiento del día 25 (en negro), la concentración de ozono alcanza los 52,0 ppbv, aumentando hasta 58,9 ppbv en los primeros 300 m y manteniéndose relativamente constante hasta los 1900 (con 59,6 ppbv) donde se observa un rápido incremento llegando a 72,7 ppbv en los 2221 m de altitud. Se observan otros dos picos en altura (68,6 ppbv en 3226 m y 57,4 ppbv en 4629 m).

Para el primer lanzamiento del día 26 (en azul), la concentración de ozono en superficie alcanza 5,5 ppbv, aumentando rápidamente con la altura hasta llegar a 55,7 ppbv en 1900 m. A partir de esta altitud se observan concentraciones que oscilan entre 55,7 y 47,4 ppbv hasta los 3035 m. No se observan los picos en altura del lanzamiento del día anterior.

Para el segundo lanzamiento del día 26 (en verde), se observa un incremento en el perfil en comparación al anterior. Se observan numerosas estratificaciones en altura (58,6 ppbv en 1563 m; 65,6 ppbv en 2134 m; 64,2 ppbv en 2255 m; 56,2 ppbv en 3008 m y 50,9 ppbv en 3685 m).

Para el último perfil (en café), en los primeros 2065 m se observan las máximas concentraciones de ozono del día, con un máximo de 74,4 ppbv en los 1588 m de altitud para luego decaer. No se observa una tendencia respecto al perfil anterior exceptuando por el pico que se encuentra por los 3800 m que pareciera mantenerse estable.



**Figura 14. Perfis verticales de ozono. Colina, 25 y 26 de noviembre de 2010.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

La Figura 15 muestra los perfiles de ozono para el mes de diciembre de 2010, donde se realizaron cuatro lanzamientos entre los días 21 y 22.

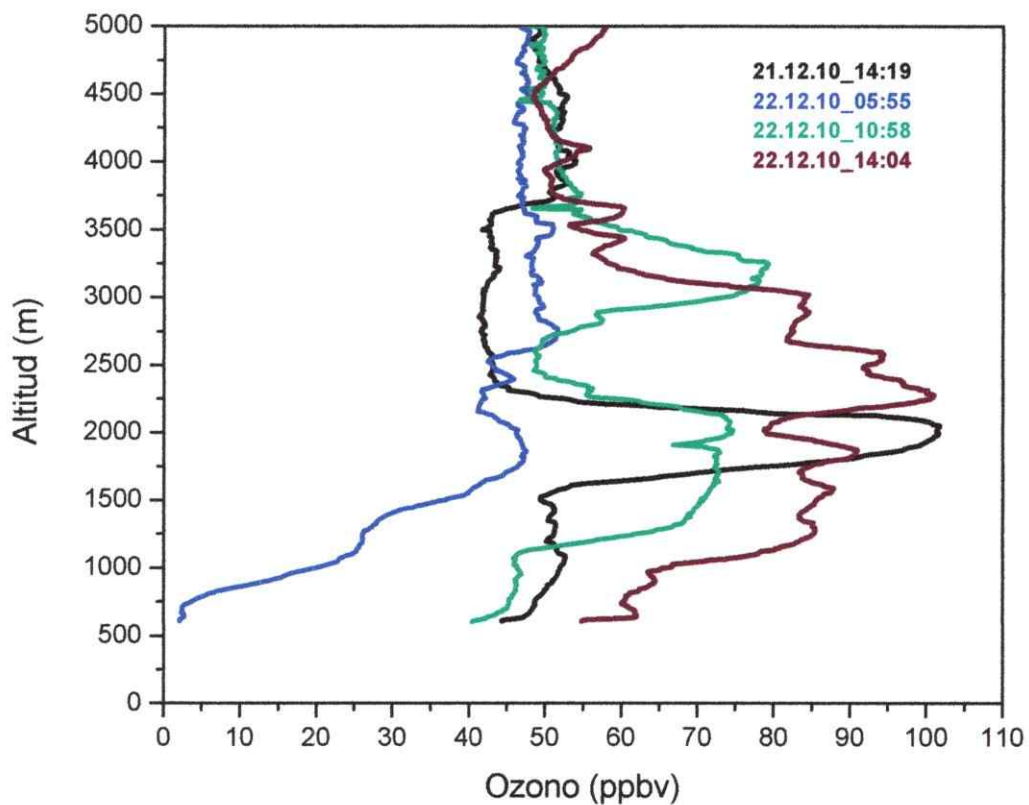
Se observa que la concentración de ozono en superficie para el día 21 (en negro) es de 44,5 ppbv. Se aprecia un aguzado pico de 101,6 ppbv en los 2000 m que decae rápidamente hasta 43,0 ppbv en los 2420 m manteniéndose sin mucha variación hasta los 3607 m de altitud.

En el primer perfil del día 22 (en azul), la concentración en superficie es 1,8 ppbv. Se observa un pico en altura en similar ubicación al del día anterior pero con

concentraciones mucho menores llegando solo a 47,4 ppbv en los 1874 m (en comparación a los 101,6 ppbv del perfil del día 21).

Para el perfil del día 22 a las 10:58 (en verde), se observa un aumento en las concentraciones de ozono, distinguiéndose dos zonas muy marcadas. La primera entre los 1095 y los 2454 m con concentraciones que llegan a 74,3 ppbv. La segunda zona se ubica entre los 2619 y los 3641 con un valor máximo que alcanza los 79,1 ppbv.

Para el último perfil del día 22 (en café), se observan las mayores concentraciones del día. En altura es posible diferenciar dos zonas que se separan por un mayor decaimiento en las concentraciones de ozono. En la zona baja observamos tres picos, uno de 84,4 ppbv (1277 m), otro de 87,5 ppbv (1580 m) y uno mayor a los anteriores de 90,7 ppbv (1866 m). En la segunda zona aparecen otros tres picos, uno de 100,8 ppbv (2264 m), otro de 93,9 ppbv (2576 m) y otro de 84,3 ppbv (3027 m). Luego del último pico mencionado, el O<sub>3</sub> decae a 56,5 ppbv en los 3321 m, por sobre esta altitud se observan otras estratificaciones de menor intensidad.



**Figura 15. Perfiles verticales de ozono. Colina, 21 y 22 de diciembre de 2010.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

La Figura 16 presenta los resultados para los 3 ozonosondeos realizados el día 28 de febrero de 2011.

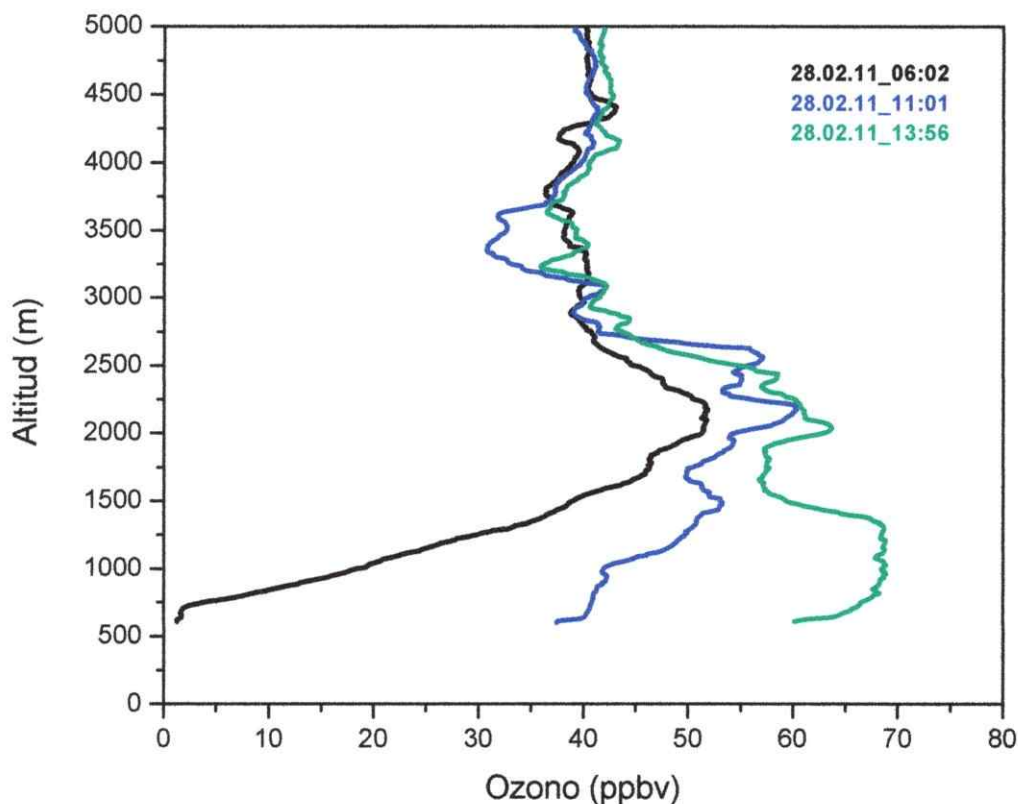
En el primer perfil (en negro) se observa una concentración de ozono de 1,2 ppbv en superficie con un rápido aumento con la altura alcanzando un pico de 51,6 ppbv en los 2204 m de altitud.

El segundo perfil se observa más disperso con tres picos importantes, uno de 52,9 ppbv (1502 m), otro de 60,3 ppbv en los 2204 m de altitud y otro de 56,9 ppbv

(2568 m). Las concentraciones en el perfil son mayores al anterior y destaca que el segundo pico coincide en altura con el del primer perfil, pero con una concentración mayor.

En el último perfil (en verde) se observan concentraciones mayores a los dos anteriores. La concentración de ozono en superficie alcanza los 60,2 ppbv, con un rápido aumento en los primeros 2210 m llegando a 68,2 ppbv y que se mantienen relativamente constantes hasta los 1337 m donde comienza a disminuir. Se observa una segunda zona de acumulación con dos picos a mayor altitud, uno de 63,5 ppbv (2048 m) y otro de 58,3 ppbv (2420 m).

En los tres perfiles se observa un decaimiento en el ozono en torno a los los 2900 m con concentraciones que varían entre los 38 y 40 ppbv.

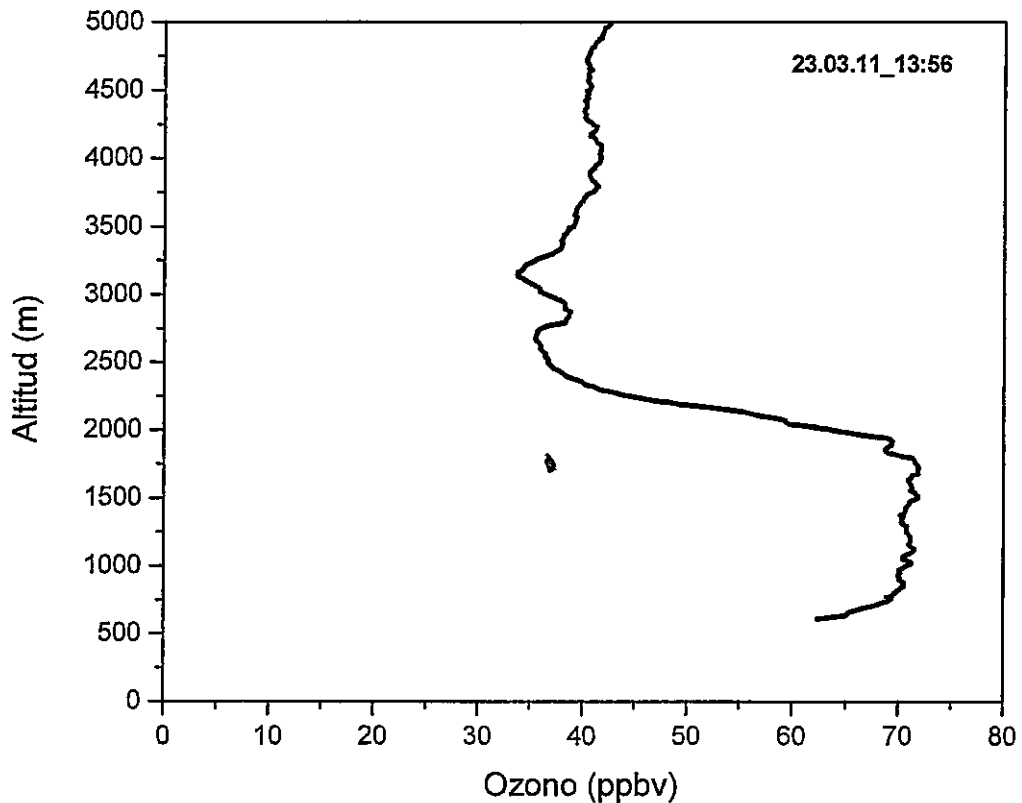


**Figura 16. Perfiles verticales de ozono. Colina, 28 de febrero de 2011.**  
 (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

Debido al cambio de estación (menor insolación, menores temperaturas y días más cortos en otoño respecto del período primavera-verano) y al costo de los insumos de los lanzamientos, se decidió que a partir del mes de marzo de 2011 y hasta septiembre de 2011 se realizara solo un lanzamiento mensual en horario cercano a las 14 horas, que es donde se observan las mayores concentraciones en el perfil vertical de ozono.

La Figura 17 muestra el perfil que se obtuvo para el día 23 de marzo a las 13:56 horas. En superficie se observan 62,5 ppbv aumentando hasta 70,5 en los 835 metros de

altitud, manteniéndose relativamente constante hasta los 1952 m donde desciende rápidamente hasta 35,5 ppbv en los 2663 m de altitud.



**Figura 17. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de marzo de 2011.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

La Figura 18 presenta el perfil de ozono para el día 28 de abril de 2011 a las 13:59 horas. Se observan 32,5 ppbv en superficie con un aumento hasta 37,0 ppbv en los 653 m de altitud, luego hay un leve descenso hasta los 939 m, por sobre esta altitud se observan 2 zonas separadas por un descenso en las concentraciones de ozono en los 2644 m. La zona inferior, entre 939 m y 2644 m presenta concentraciones que en sus



puntos máximos varían entre 49,6 ppbv (1571 m) y 51,7 ppbv (2212 m). En la zona superior se observa un pico aguzado de 54,7 ppbv en los 3000 m de altitud.

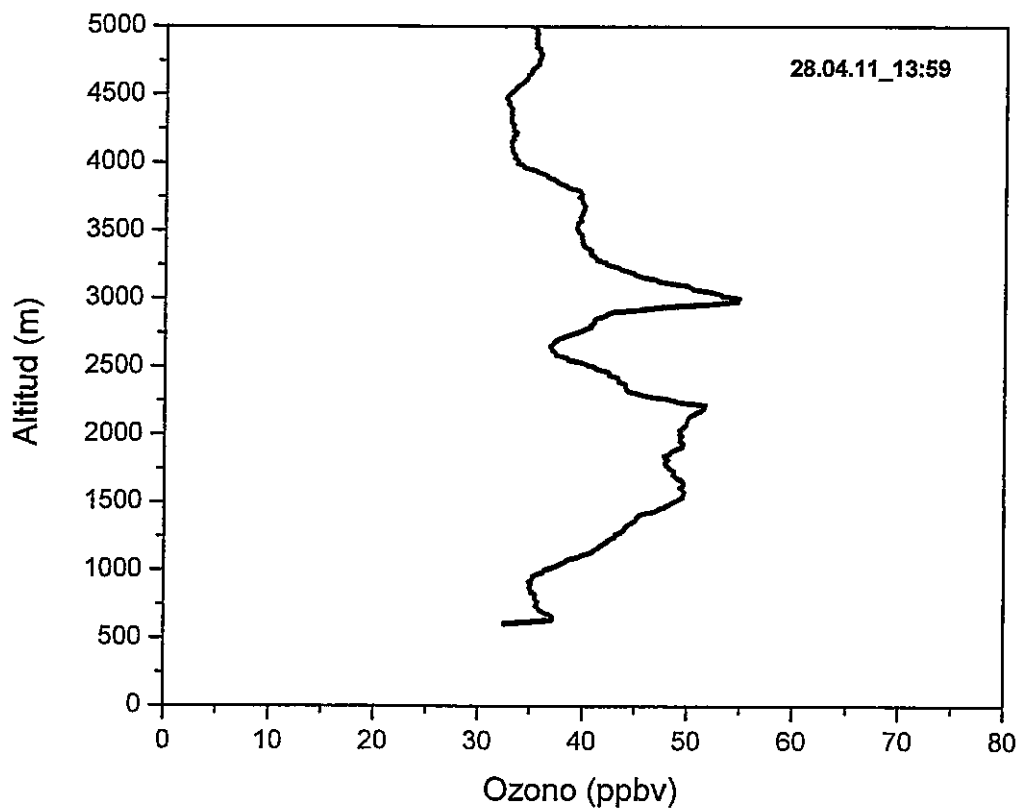
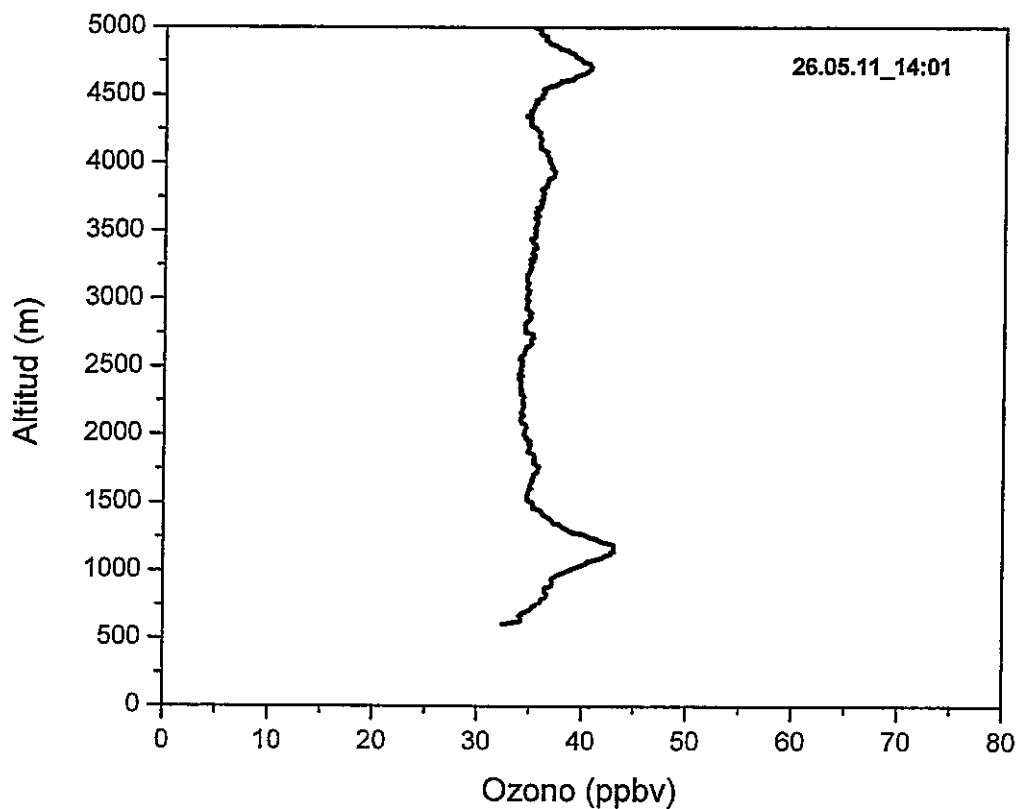


Figura 18. Perfil vertical de ozono. Colina, 28 de abril de 2011.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

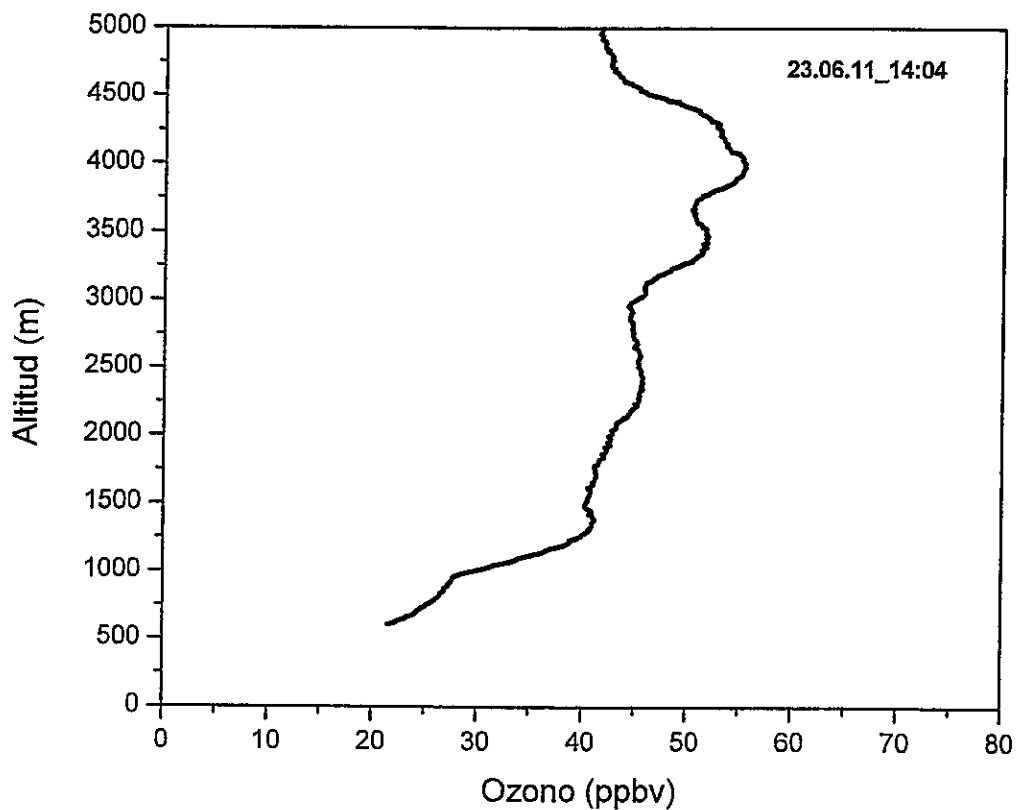
El perfil de la Figura 19 comienza con 32,5 ppbv en superficie, luego se observa un pico de 43,0 ppbv en los 1191 m de altitud. A partir de los 1563 m se verticalizan las concentraciones de ozono manteniéndose relativamente constantes en torno a los 35,0 ppbv que se interrumpen por un pico en altura de 40,5 ppbv en los 4707 m de altitud.



**Figura 19. Perfil vertical de ozono. Colina, 26 de mayo de 2011.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msum).

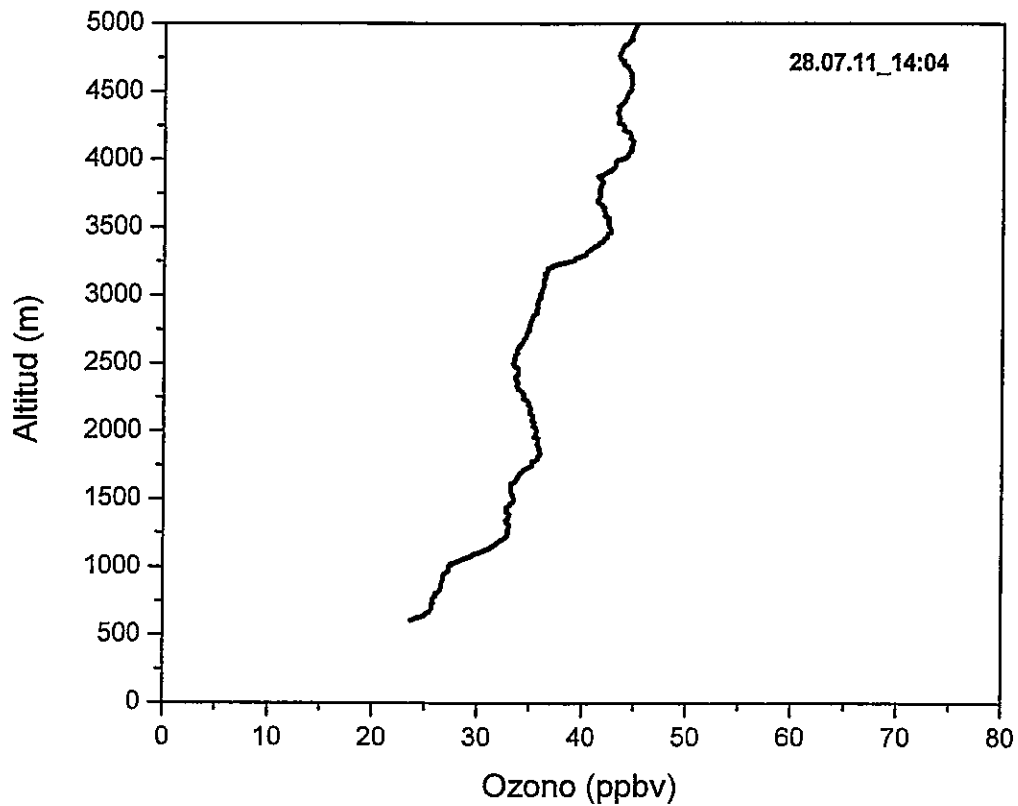
En el perfil de junio (Figura 20), la concentración en superficie es de 21,5 ppbv. Se observa un aumento del ozono con la altura con un quiebre en los 965 m de altitud, a partir de este punto aumentan las concentraciones llegando a 41,3 ppbv en 1364 m. Se

observa que el máximo del perfil se encuentra a mayor altura, con 55,4 ppbv en los 4005 m de altitud.



**Figura 20. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de junio de 2011.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

La concentración en superficie para el perfil de julio (Figura 21) es de 23,8 ppbv, se observa un aumento con la altura con un máximo de 44,8 ppbv en los 4108 m de altitud.



**Figura 21. Perfil vertical de ozono. Colina, 28 de julio de 2011.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

En la Figura 22 aparece el perfil vertical de ozono obtenido para el 23 de agosto de 2011 a las 13:55 horas. Se observa un aumento en las concentraciones de ozono desde la superficie (29,5 ppbv) hasta los 1250 m (42,2 ppbv), a partir de esta altitud el perfil se observa con leves oscilaciones que varían entre 40 y 45 ppbv.

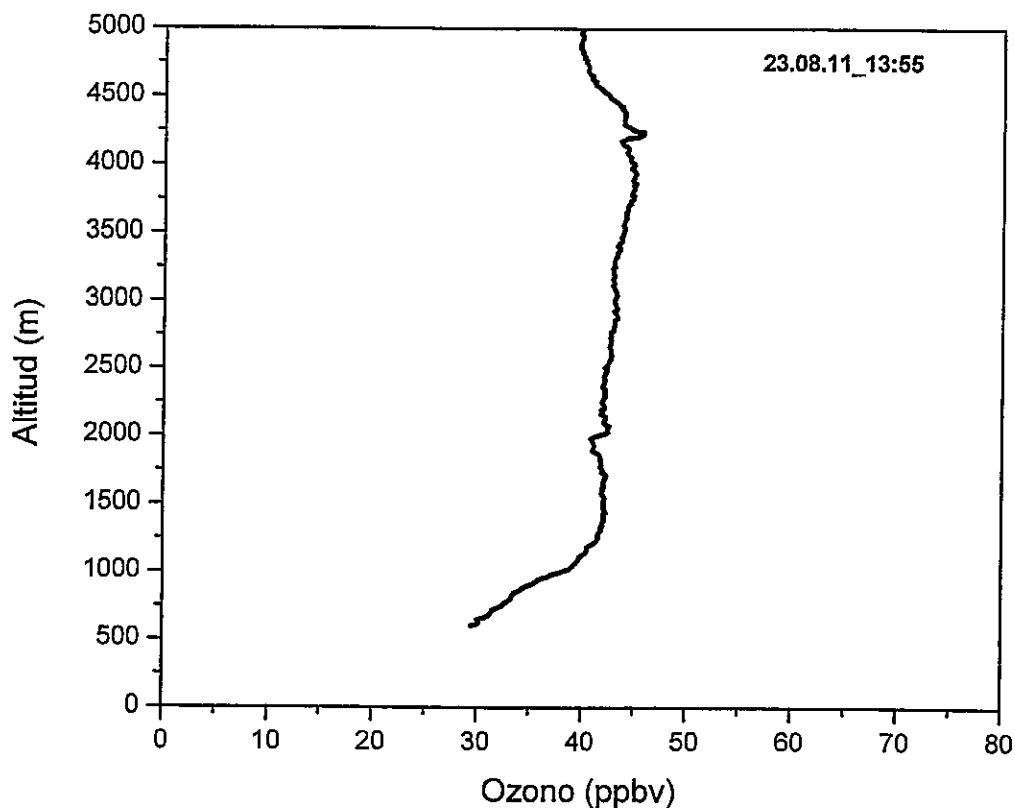


Figura 22. Perfil vertical de ozono. Colina, 23 de agosto de 2011.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

Para el último perfil del programa 1, realizado el 26 de septiembre de 2011 (Figura 23), se aprecia un aumento importante en las concentraciones de ozono comparadas con el mes anterior, siendo incluso superiores a las vistas en los lanzamientos realizados en septiembre de 2010. Se observan 49,3 ppbv en superficie que aumentan rápidamente hasta 64,7 ppbv (en los 666 metros). A mayor altitud se observan oscilaciones que varían entre 60,8 y 46,8 ppbv. El incremento en las concentraciones a lo largo del perfil en comparación a los cuatro meses precedentes coincide con el cambio

de estación (primavera), acercándonos al período estival donde aumentan las temperaturas y la insolación.

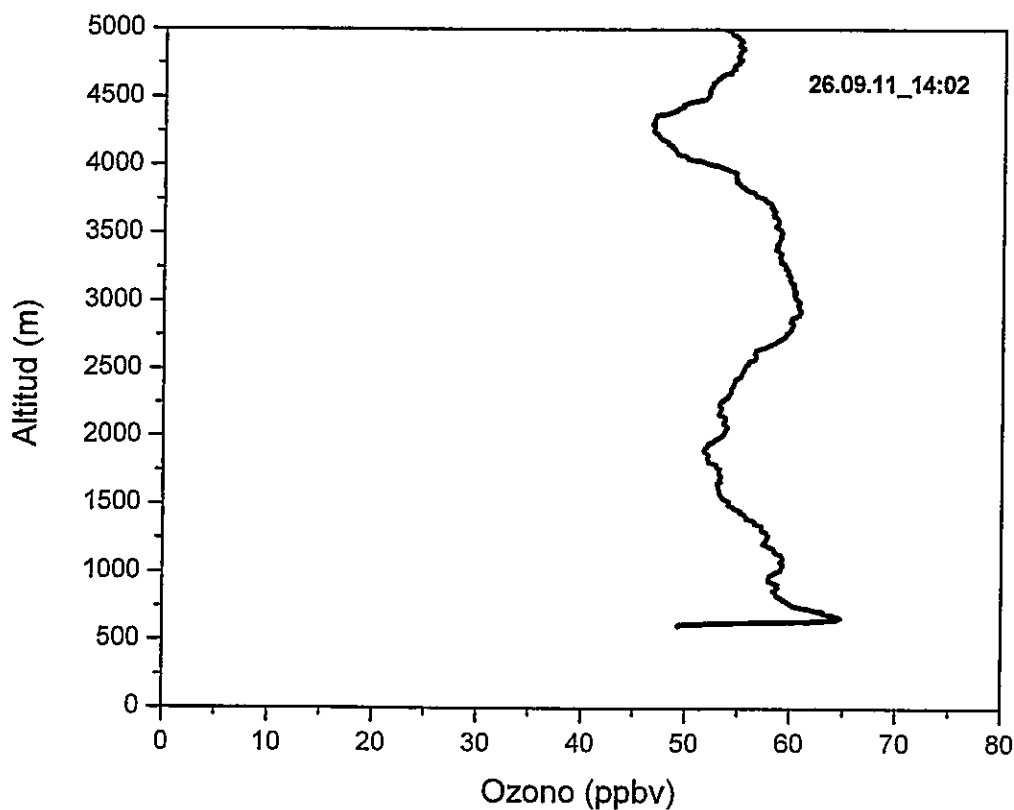


Figura 23. Perfil vertical de ozono. Colina, 26 de septiembre de 2011.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

### 3.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile (resultados programa 2):

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento y distribución del ozono en la zona central de Chile entre las regiones V (San Antonio y Los Andes), Metropolitana (Peñaflor, Las Condes y Colina) y VI (Rancagua), según los

planteamientos del punto 2.6.2. Para facilitar el análisis se ordenarán de oeste a este y de norte a sur.

### **3.2.1 San Antonio:**

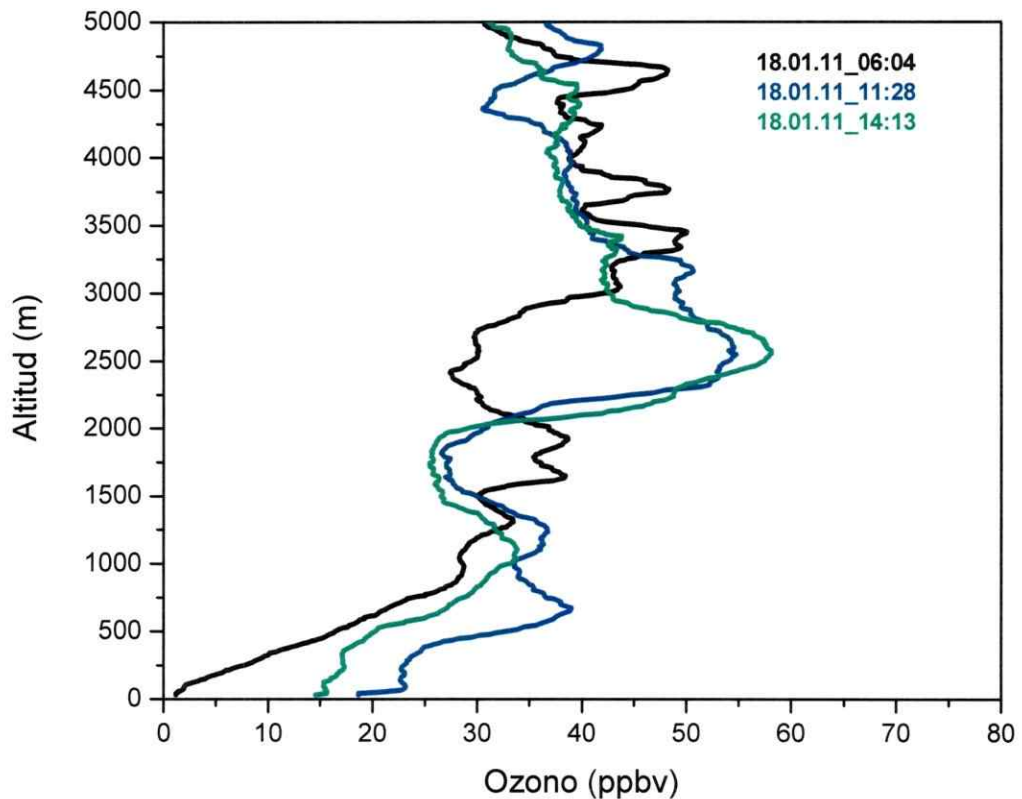
La Figura 24 muestra los perfiles verticales de ozono obtenidos para los lanzamientos realizados desde San Antonio el 18 de enero de 2011.

Para el primer lanzamiento del día (en negro), se observan 1,1 ppbv de ozono en superficie aumentando rápidamente con la altitud donde se observan estratificaciones que van en aumento (28,6 ppbv en 956 m; 33,3 ppbv en 1320 m; 38,2 ppbv en 1641 m y 38,5 ppbv en 1918 ppbv). Se observa una zona de descenso en los 2411 m (27,6 ppbv), por sobre esta altitud se observan varias estratificaciones (43,6 ppbv en 3044 m; 49,3 ppbv en 3347 m; 49,9 ppbv en 3450 m; 48,1 ppbv en 3772 m; 41,8 ppbv en 4231 m y 48,2 ppbv en 4646 m).

Para el segundo perfil (en azul), se observan 18,6 ppbv en superficie aumentando con la altura llegando a 23,0 ppbv en los 82 m donde se produce un quiebre. Se observan otros dos picos, uno de 38,8 ppbv en los 670 m y otro de 36,5 ppbv en los 1277 m. Se observa una zona de descenso llegando a 26,7 ppbv en 1840 m, a partir de este punto el ozono asciende llegando a 54,6 ppbv en 2568 m. Luego de los 3399 m (40,9 ppbv) las concentraciones decaen lentamente.

Para el perfil de las 14:13 (en verde), se observa un descenso en los primeros 2040 m en comparación al perfil anterior. Se observan dos zonas marcadas por una disminución en las concentraciones de ozono, la primera desde la superficie hasta los 1718 m con un pico de 33,8 ppbv en 1112 m y otra zona desde el tope de la primera

hasta los 3095 m de altitud con un pico de 58,0 ppbv en 2585 m. Entre los 1000 m y los 4100 m se observa un comportamiento similar al perfil anterior.



**Figura 24. Perfiles verticales de ozono. San Antonio, 18 de enero de 2011.**  
(San Antonio: lat 33,60254° lon 71,61442°; 16 msnm).

### 3.2.2 Los Andes:

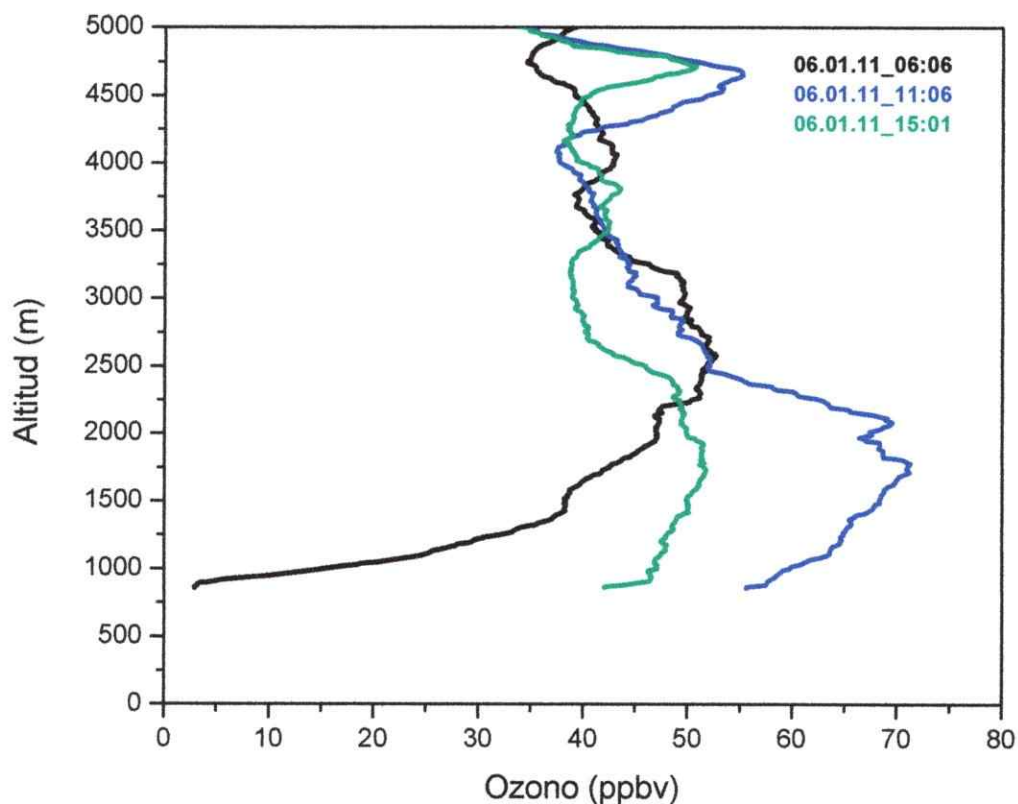
La Figura 25 presenta los perfiles verticales de ozono obtenidos para los lanzamientos realizados el día 6 de enero desde Los Andes.



Para el primer perfil (en negro), se observan bajas concentraciones en superficie (2,9 ppbv) que aumentan rápidamente con la altura con una gran acumulación entre los 1440 y los 3500 m de altitud con concentraciones que llegan a los 52,4 ppbv (2585 m).

En el perfil de las 11:06 (en azul), se observa el máximo del día con una acumulación mayor y a más baja altura que el perfil anterior, partiendo en superficie hasta los 2464 m con dos máximos que llegan a 71,1 ppbv (1787 m) y 69,4 ppbv (2090 m). Se observa un pico de 54,9 ppbv a mayor altura (4654 m).

En el perfil de la tarde (en verde), se observa una acumulación menor a la anterior, partiendo desde la superficie hasta los 2000 m con concentraciones que, en este rango, varían entre 46,0 y 51,4 ppbv. Se aprecia un pico a de 50,3 ppbv a mayor altitud (4715 m).



**Figura 25. Perfiles verticales de ozono. Los Andes, 6 de enero de 2011.**  
 (Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

### 3.2.3 Peñaflores:

En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos para los lanzamientos realizados en Peñaflores el 22 de febrero de 2011.

Los perfiles muestran un comportamiento similar, aumentando rápidamente su concentración desde la superficie con un pico muy aguzado que varía tanto en altura como en concentración. En el primer caso se tiene un máximo de 53,9 ppbv en 2411 m. Para el segundo perfil hay un pico de 67,3 ppbv en 1840 m. El tercer perfil presenta

mayor estratificación con dos máximos importantes de 65,25 ppbv (1770 m) y 69,4 ppbv (2090 m). El tercer perfil presenta menores concentraciones que el anterior en los primeros 1130 m, por sobre esta altitud las concentraciones se aprecian mayores.

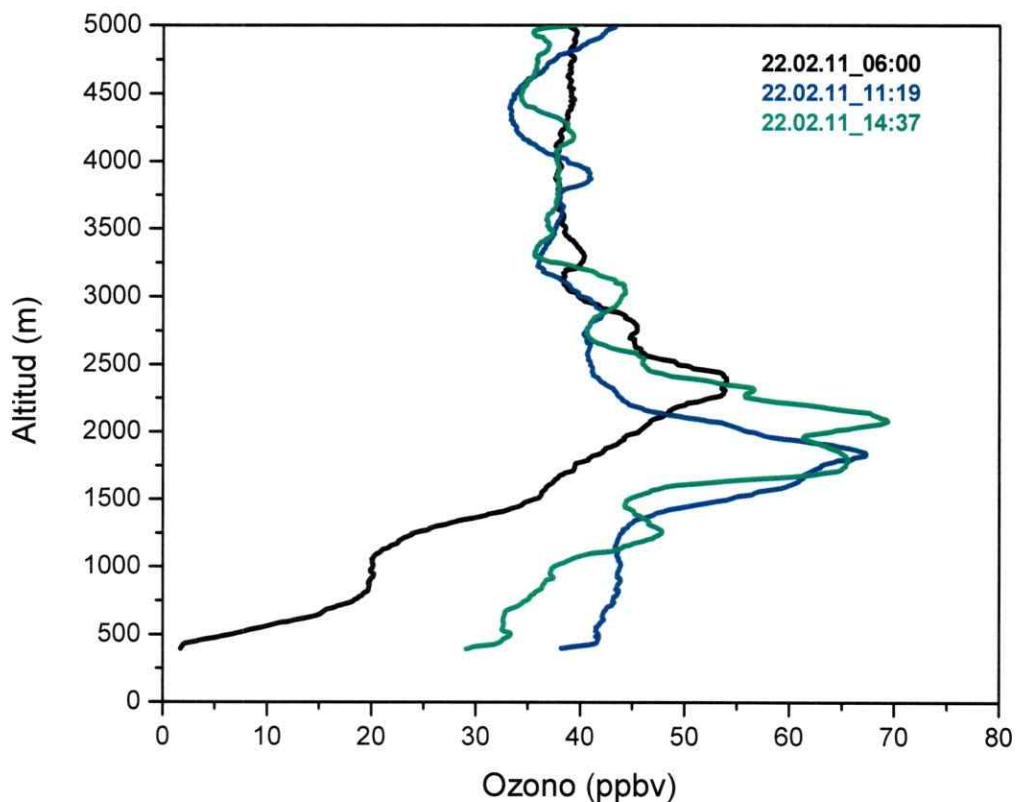


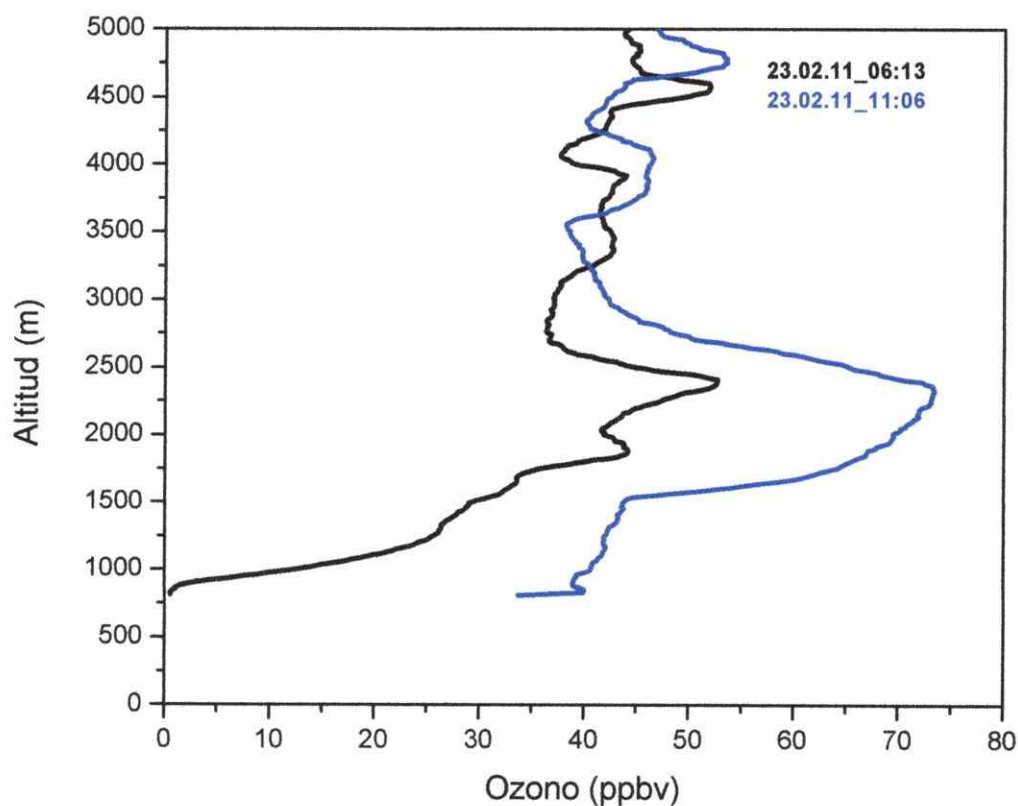
Figura 26. Perfiles verticales de ozono. Peñaflor, 22 de febrero de 2011.  
(Peñaflor: lat 33,60070° lon 70,90067°; 377 msnm).

### 3.2.4 Las Condes:

En la Figura 27 se presentan los perfiles para Las Condes del día 23 de febrero de 2011.

El primer perfil (en negro) muestra una concentración en superficie de 0,3 ppbv que aumenta rápidamente alcanzando dos máximos, uno de 44,2 ppbv (1874 m) y uno mayor de 52,7 ppbv (2411 m).

En el perfil de las 11:06 se observa un aumento de los picos, obteniéndose una gran acumulación de ozono entre los 1536 y los 3580 m, con un máximo de 73,1 ppbv en los 2360 m de altitud.



**Figura 27. Perfiles verticales de ozono. Las Condes, 23 de febrero de 2011.**  
(Las Condes: lat 33,37681° lon 70,52362°; msnm).

### 3.2.5 Colina:

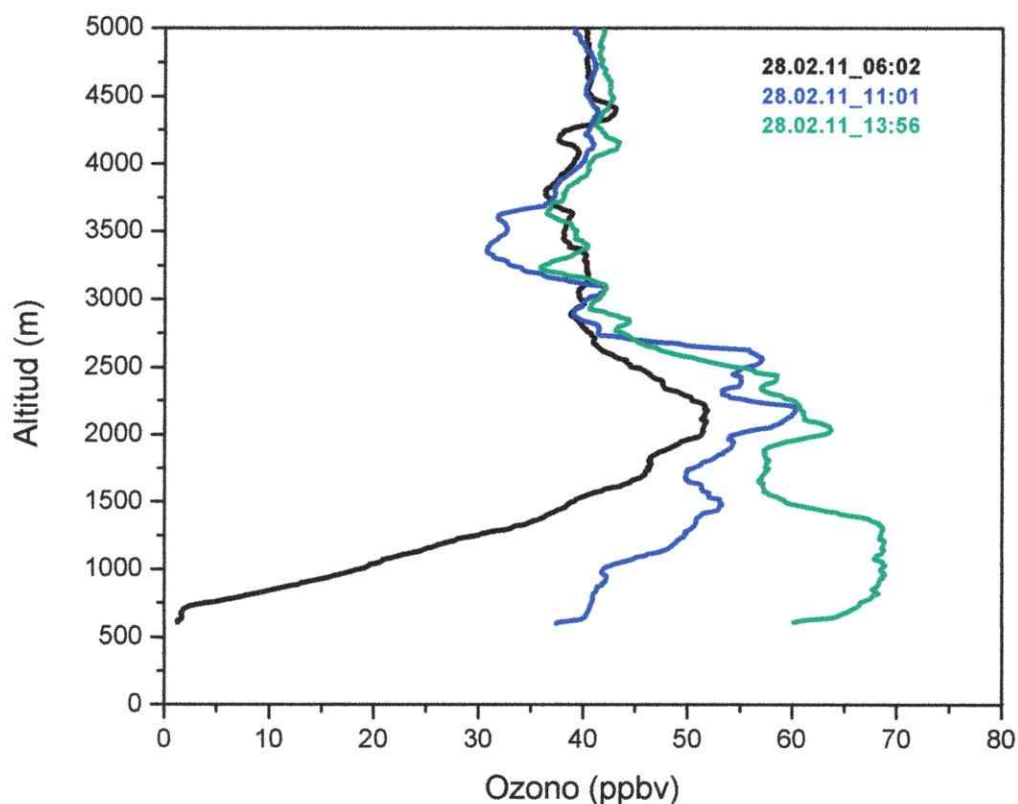
La Figura 28 muestra los mismos perfiles de la Figura 16 donde se observan los resultados para los 3 ozonosondeos realizados el día 28 de febrero de 2011.

En el primer perfil (en negro) se observa una concentración de ozono de 1,2 ppbv en superficie con un rápido aumento con la altura alcanzando un pico de 51,6 ppbv en los 2204 m de altitud.

El segundo perfil se observa más disperso con tres picos importantes, uno de 52,9 ppbv (1502 m), otro de 60,3 ppbv en los 2204 m de altitud y otro de 56,9 ppbv (2568 m). Las concentraciones en el perfil son mayores al anterior y destaca que el segundo pico coincide en altura con el pico del primer perfil, pero con una concentración mayor.

En el último perfil (en verde) se observan concentraciones mayores a los dos anteriores. La concentración de ozono en superficie alcanza los 60,2 ppbv, con un rápido aumento en los primeros 2210 m llegando a 68,2 ppbv y que se mantienen relativamente constantes hasta los 1337 m donde comienza a disminuir. Se observan una segunda zona de acumulación con dos picos a mayor altitud, uno de 63,5 ppbv (2048 m) y otro de 58,3 ppbv (2420 m).

En los tres perfiles se observa un decaimiento en el ozono en los 2890 m con concentraciones que varían entre los 38 y 40 ppbv.



**Figura 28. Perfils verticals de ozono. Colina, 28 de febrer de 2011.**  
 (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

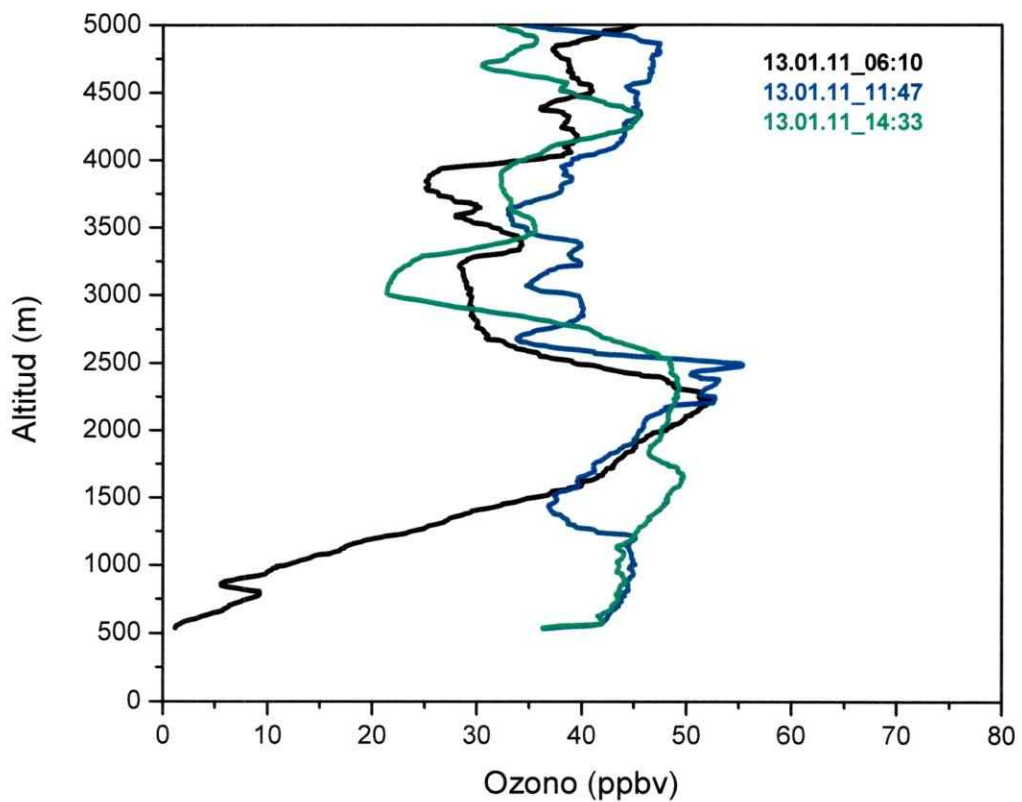
### 3.2.6 Rancagua:

La Figura 29 presenta los resultados para los lanzamientos de ozonosondas realizados en Rancagua el 13 de enero de 2011.

En el primer perfil (en negro) se observa ozono agotado en superficie con un aumento rápido con la altura donde aparece un quiebre en los 800 m con un leve descenso en las concentraciones. El pico que se observa es de 52,0 ppbv y se encuentra a 2220 m de altitud.

En el segundo perfil (en azul), se observa un aumento en las concentraciones desde la superficie alcanzando un máximo de 44,7 ppbv en 1208 m, por sobre esta altitud se observan estratificaciones con un máximo de 55,3 ppbv en los 2500 m de altitud.

En el tercer perfil (en verde) se observa una gran acumulación desde la superficie hasta los 3018 m con concentraciones que varían, en este rango de altura, entre 42,0 y 49,7 ppbv.



**Figura 29. Perfiles verticales de ozono. Rancagua, 13 de enero de 2011.  
(Rancagua: lat 34,16232° lon 70,71395°; 512 msnm).**

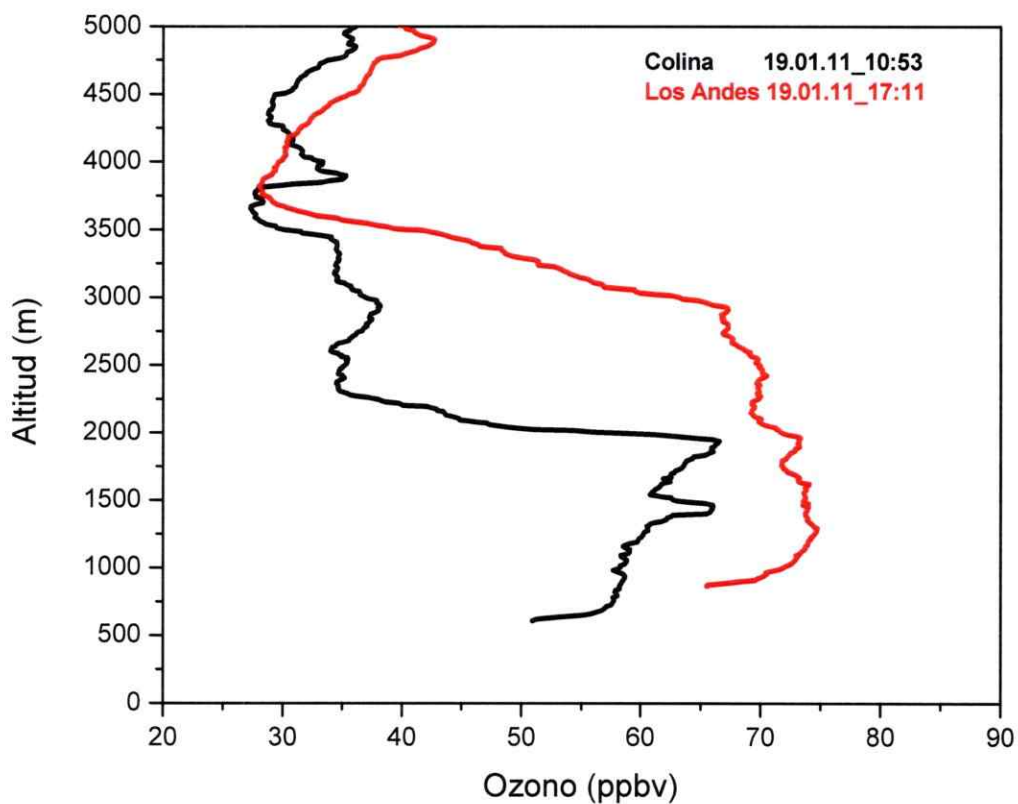
### **3.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes (resultados programa 3):**

De acuerdo a la hipótesis planteada, las masas de aire enriquecidas en ozono deberían estar sobrepasando el cordón montañoso que se ubica entre la Región Metropolitana y el Valle del Aconcagua, en dirección Colina – Los Andes. El cordón corresponde al cordón de Chacabuco que es una pequeña cadena montañosa que corre de forma transversal entre la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa. Cruza la depresión intermedia, separando el valle del Aconcagua del valle del Maipo marcando el límite norte entre la Región Metropolitana de Santiago y la V Región de Valparaíso, con alturas que varían de oeste a este entre 1300 y 2200 m.

Para realizar un análisis más acabado del comportamiento del ozono desde la Región Metropolitana hacia Los Andes es necesario incluir lo que ocurre con la dirección y velocidad del viento a lo largo de los perfiles verticales, de modo de establecer la influencia que aporta esta variable al transporte de contaminantes en el corredor. La interpretación tanto de los perfiles de ozono como de la velocidad y dirección del viento se verán con mayor detalle en la discusión.

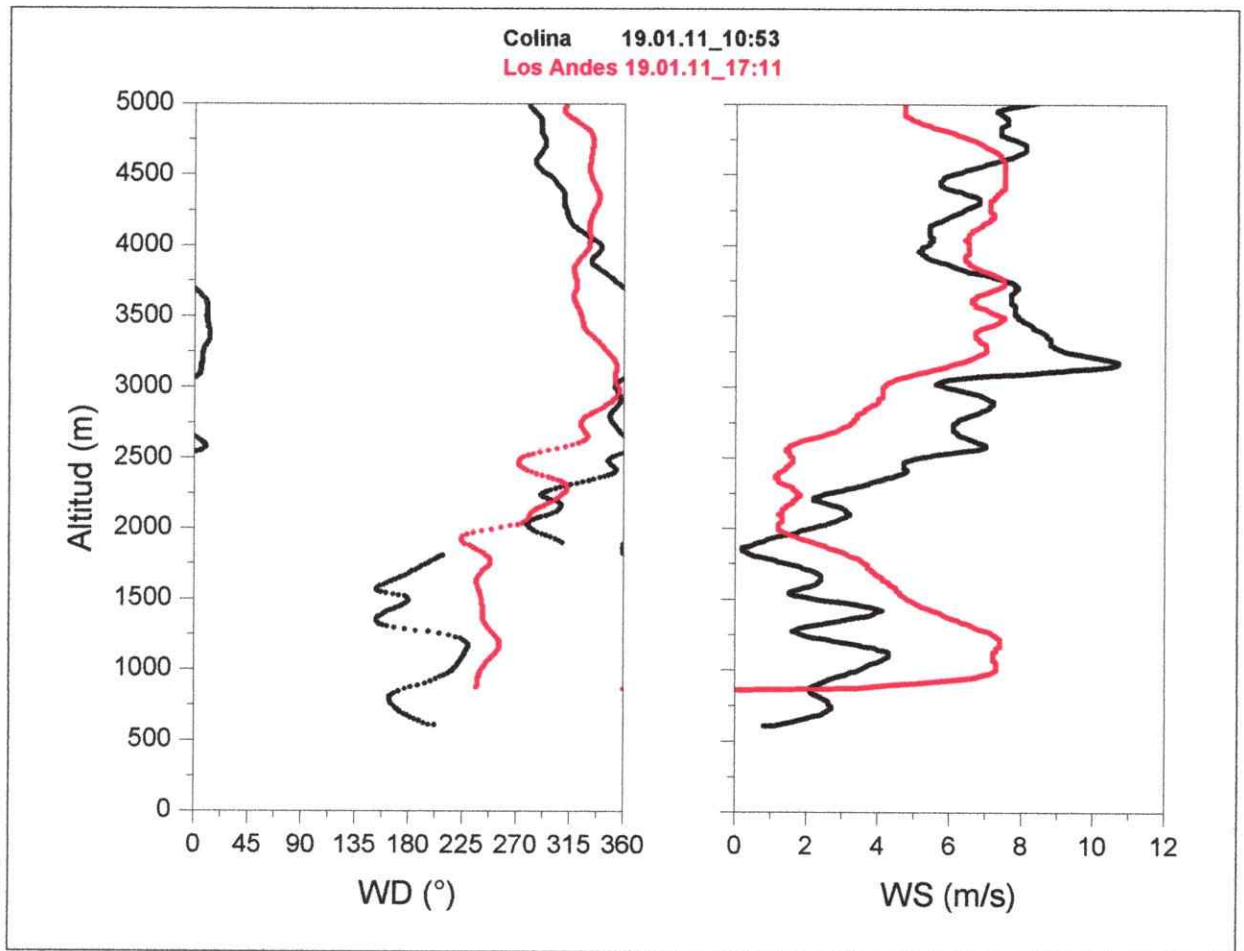
En la Figura 30 se observan los perfiles de ozono obtenidos para el día 19 de enero en Colina y Los Andes.





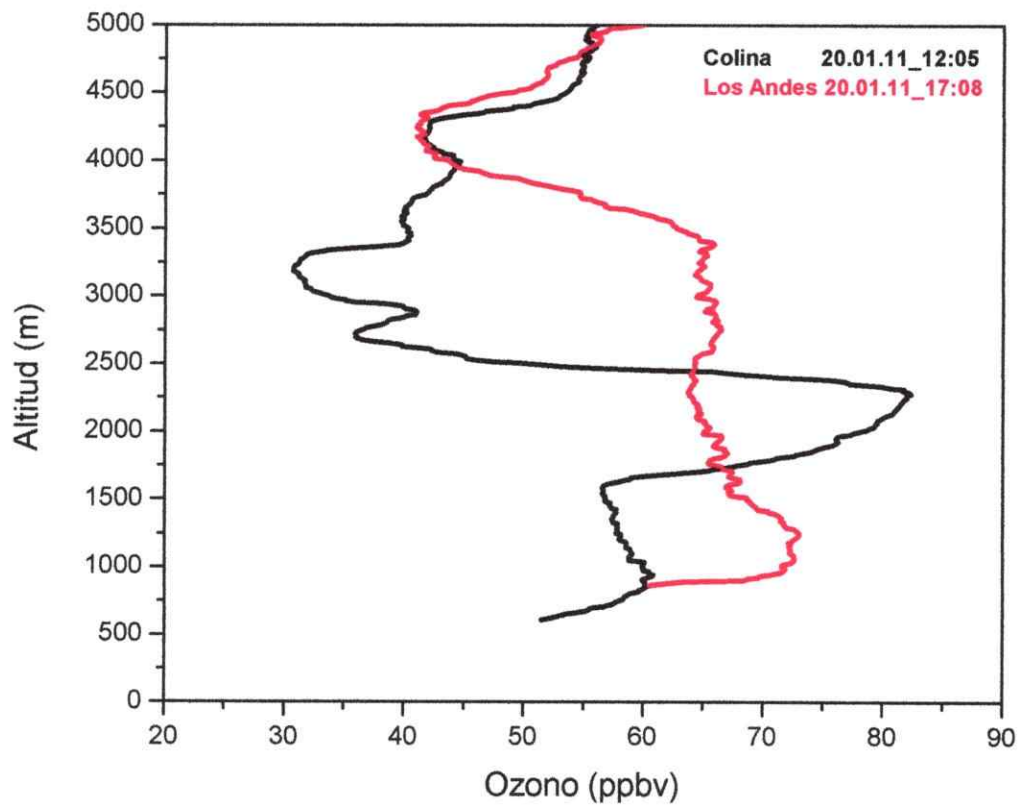
**Figura 30. Perfiles verticales de ozono. Colina y Los Andes, 19 de enero de 2011.**  
 (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

La Figura 31 muestra los perfiles verticales de dirección y velocidad del viento para Colina y Los Andes para los lanzamientos realizados el 19 de enero de 2011



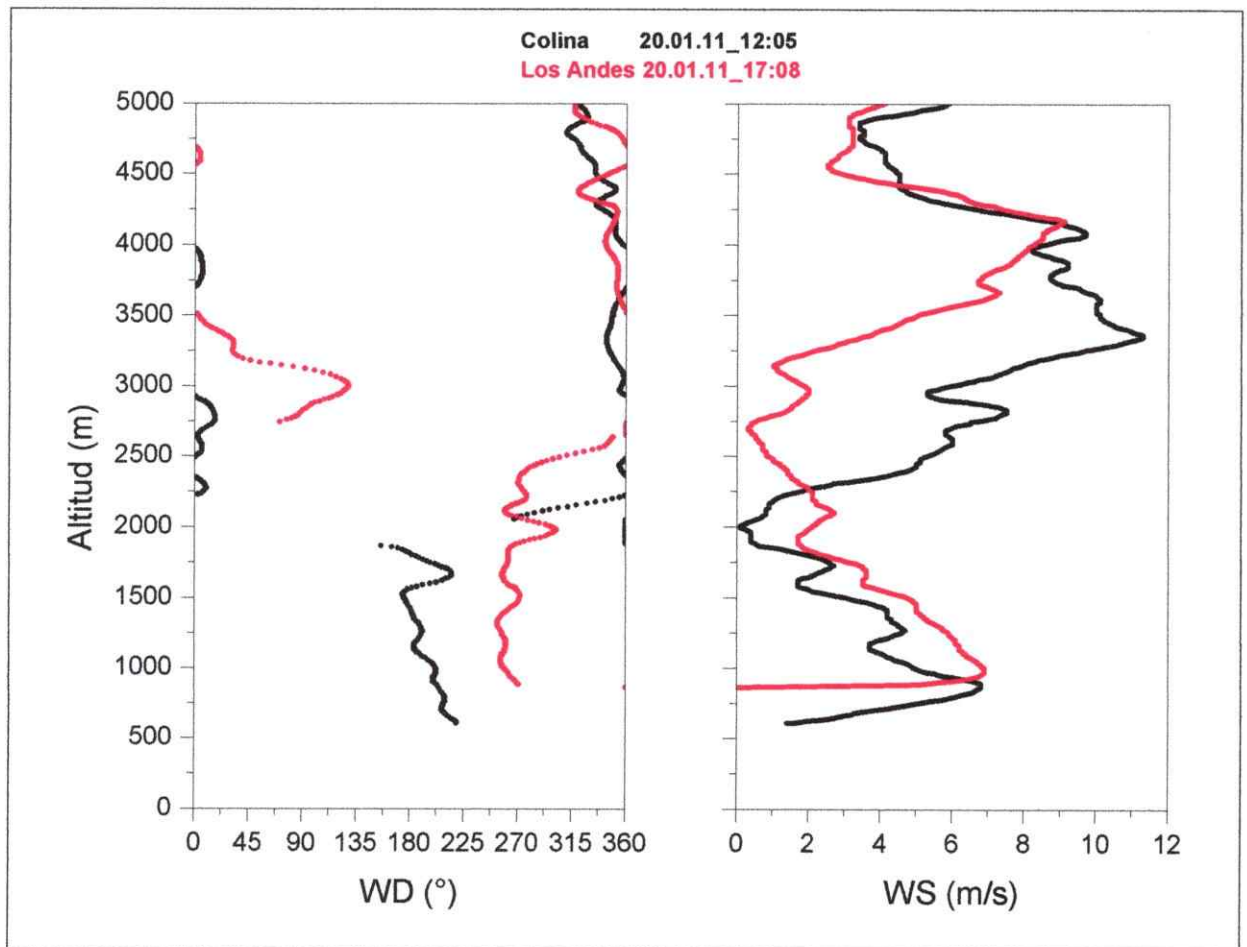
**Figura 31. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Colina y Los Andes, 19 de enero de 2011.**  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

En la Figura 32 se observan los perfiles de ozono obtenidos para el día 20 de enero de 2011 en Colina y Los Andes.



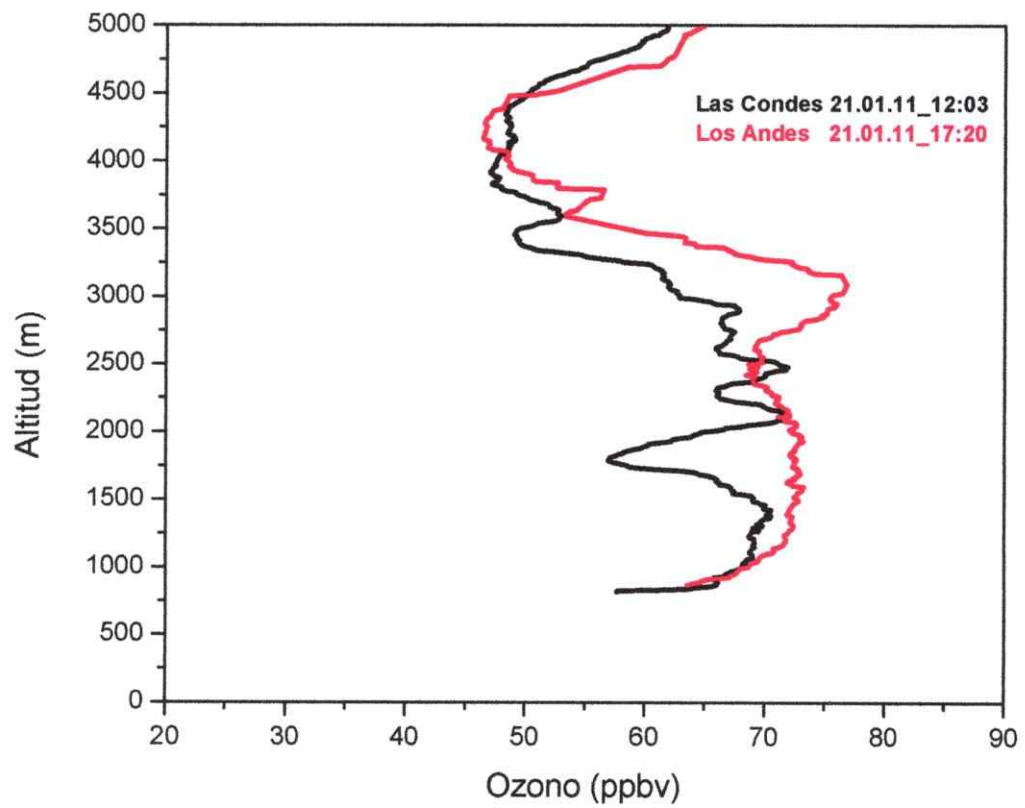
**Figura 32. Perfiles verticales de ozono para Colina y Los Andes, 20 de enero de 2011.**  
 (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

La Figura 33 muestra los perfiles verticales de dirección y velocidad del viento para Colina y Los Andes el día 20 de enero de 2011.



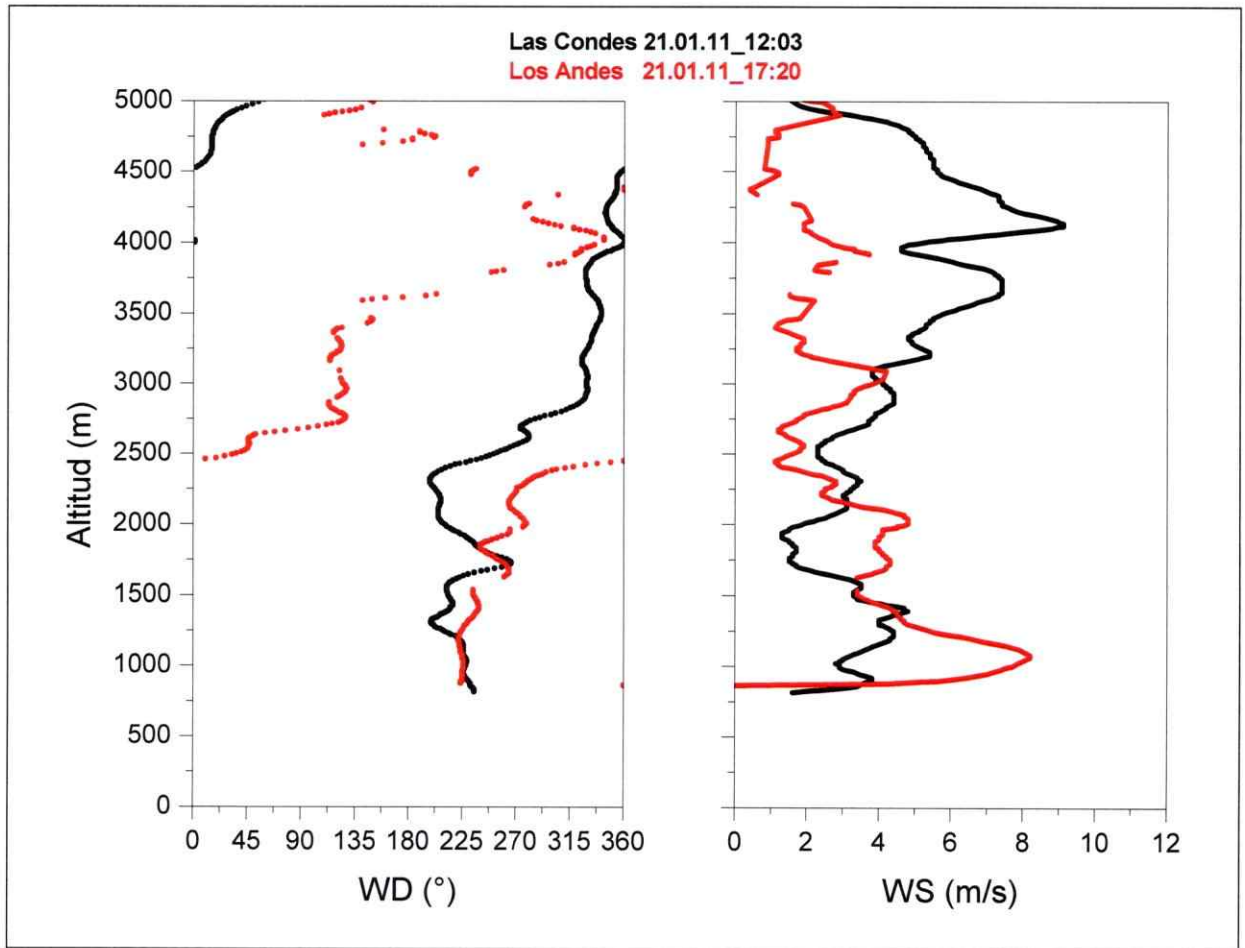
**Figura 33. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Colina y Los Andes, 20 de enero de 2011.**  
 (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

En la Figura 34 se observan los perfiles verticales de ozono obtenidos para el día 21 de enero en Las Condes y Los Andes.



**Figura 34. Pefiles verticales de ozono para Las Condes y Los Andes, 21 de enero de 2011.**  
(Las Condes: lat 33,37681° lon 70,52362°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).

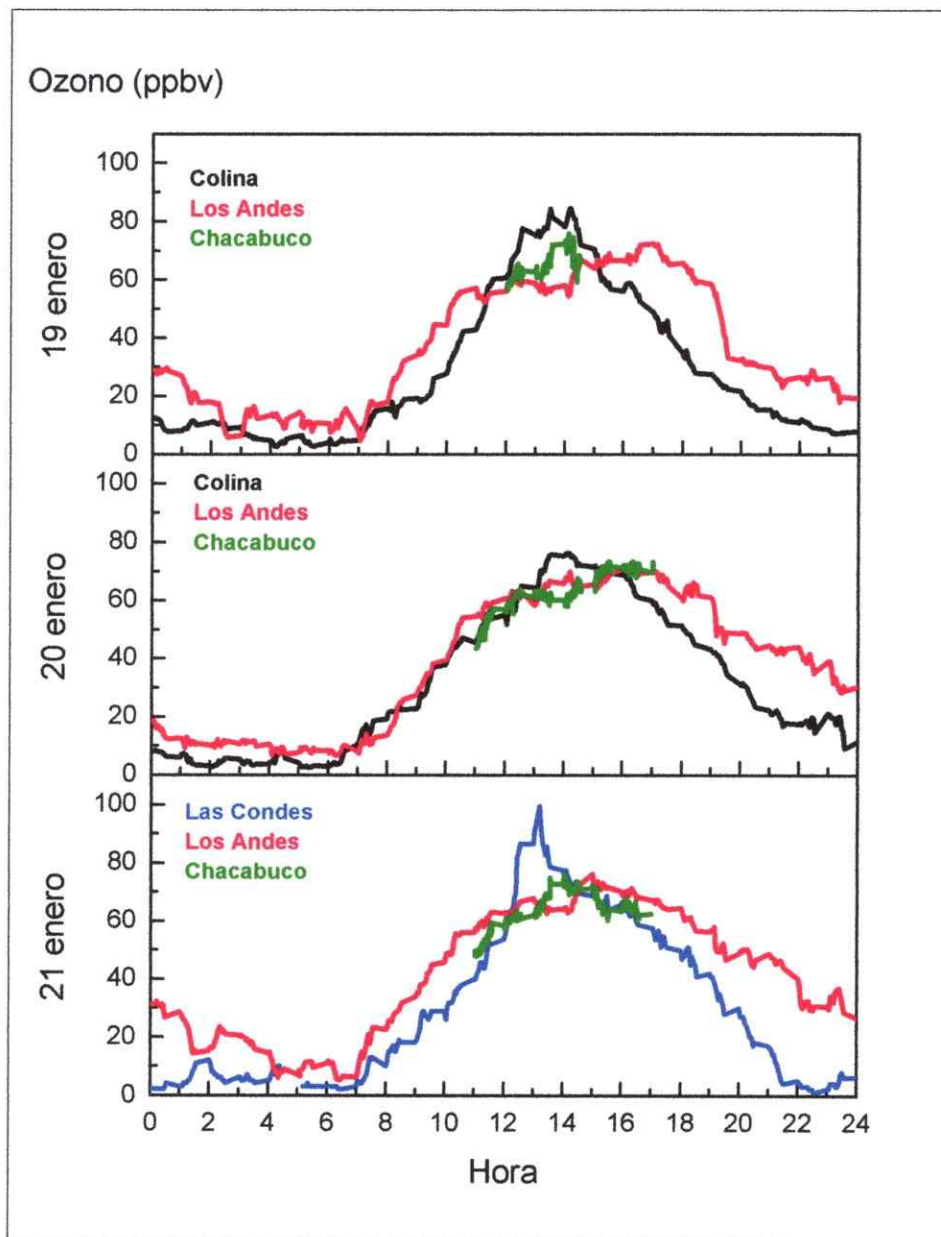
La Figura 35 muestra las variaciones en la dirección y velocidad del viento obtenidos para los lanzamientos del día 21 de enero en Las Condes y Los Andes.



**Figura 35. Perfiles verticales de dirección del viento (WD) y velocidad del viento (WS) para Las Condes y Los Andes, 21 de enero de 2011. (Las Condes: lat 33,37681° lon 70,52362°; 609 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).**

La Figura 36 muestra las concentraciones de ozono (en promedios de 5 minutos) para el monitoreo en superficie realizado en Colina, Las Condes y Los Andes y para el monitoreo con globo cautivo en el cordón de Chacabuco. Los datos considerados corresponden a los días en que se realizaron los lanzamientos (19, 20 y 21 de enero de

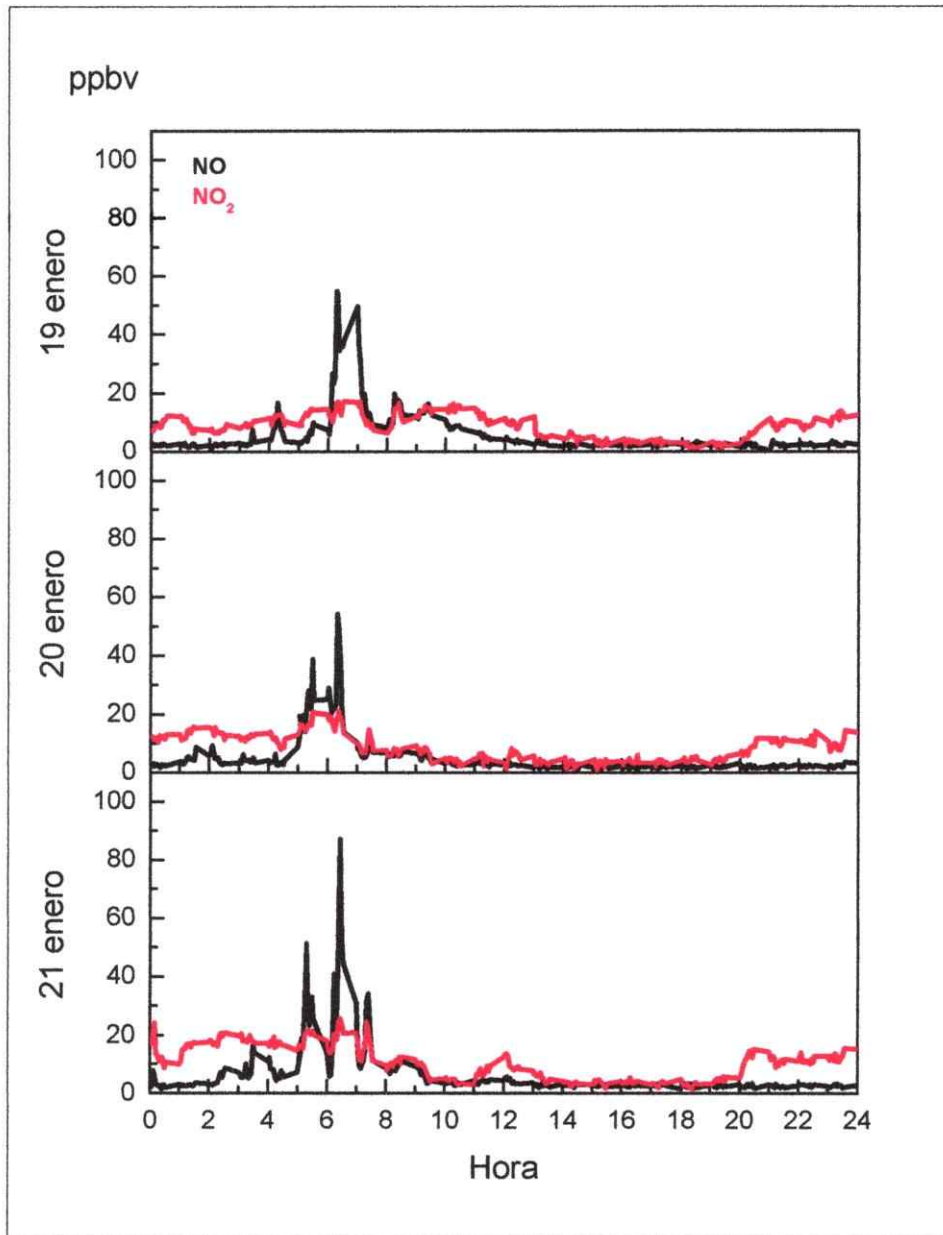
2011), sin embargo, el monitoreo en el cordón de Chacabuco se realizó entre las 11 y las 17 horas, que corresponde a los horarios entre los cuales se realizaron los ozonosondeos.



**Figura 36. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones de ozono en superficie (promedios de 5 min.) medidos en Colina (19 y 20 de enero de 2011), Las Condes (21 de enero de 2011), Los Andes (19, 20 y 21 de enero de 2011) y cordón de Chacabuco (19, 20 y 21 de enero de 2011).**

(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Las Condes: lat 33,37681° lon 70,52362°; 794 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm / Cordón de Chacabuco: lat 32,95991° lon 70,70617°; 1573 msnm).

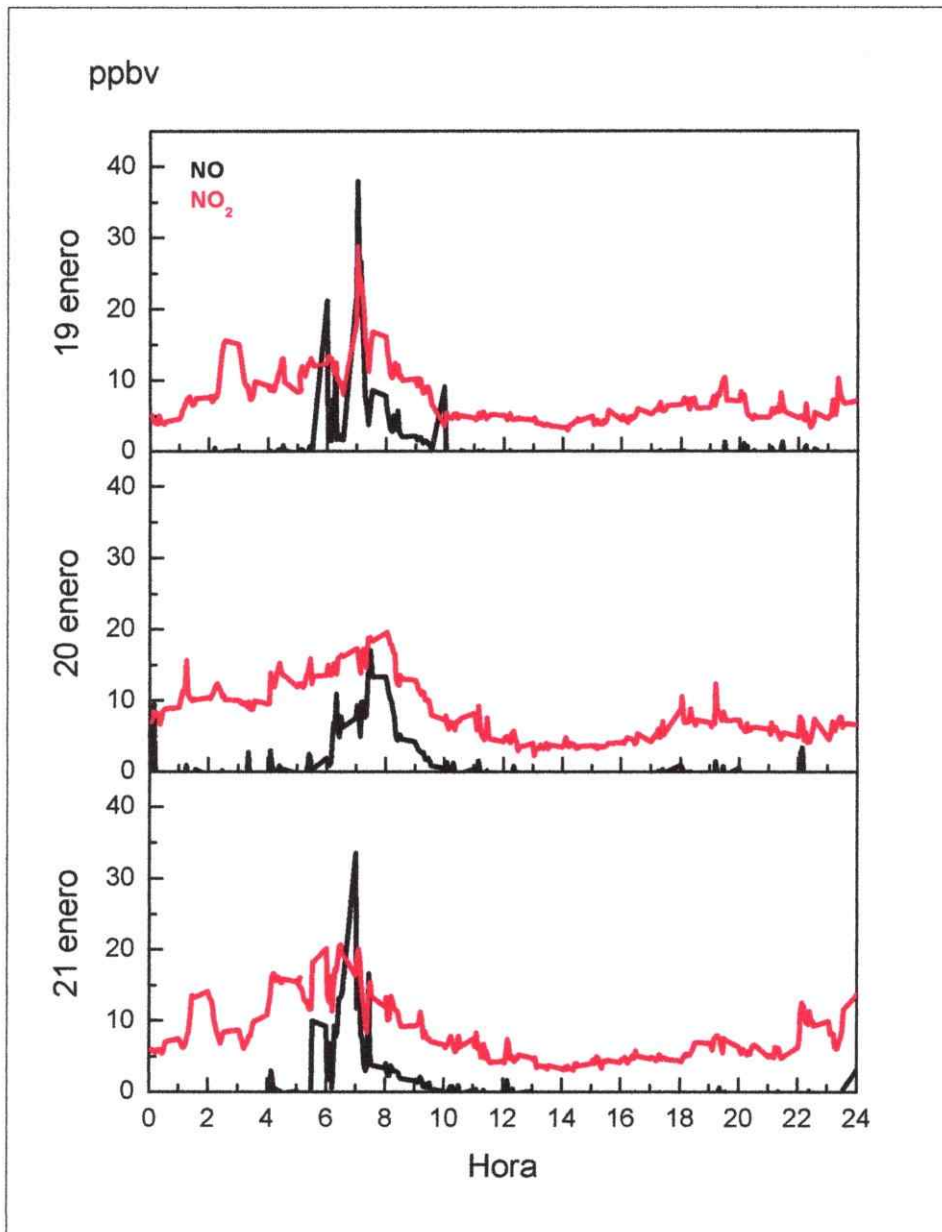
La Figura 37 muestra las concentraciones de óxidos de nitrógeno (promedio de 5 minutos), para el monitoreo en superficie realizado en Colina en los días de lanzamiento (19, 20 y 21 de enero de 2011).



**Figura 37. Corredor Atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones en superficie de óxidos de nitrógeno (promedios de 5 min.) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011. (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

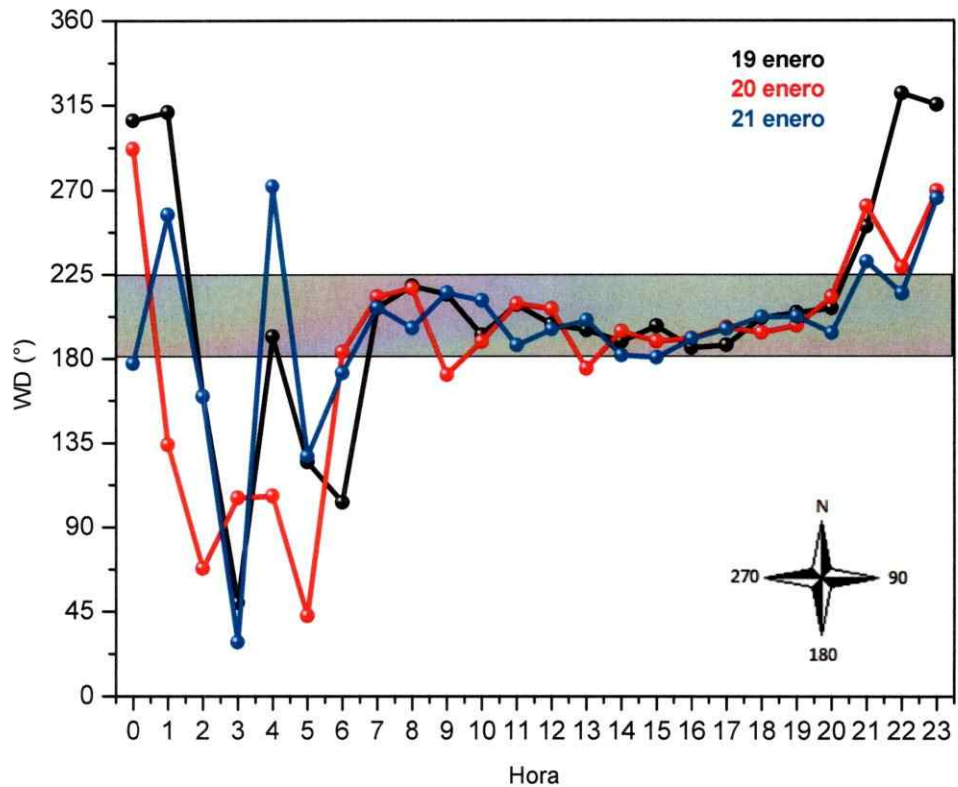


La Figura 38 muestra las concentraciones de óxidos de nitrógeno (promedio de 5 minutos), para el monitoreo en superficie realizado en Los Andes en los días de lanzamiento (19, 20 y 21 de enero de 2011).



**Figura 38. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Concentraciones en superficie de óxidos de nitrógeno (promedios de 5 min.) para Los Andes los días 19, 20 y 21 de enero de 2011. (Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).**

La Figura 39 muestra los resultados obtenidos para el monitoreo en superficie de dirección del viento para Colina (promedio de 1 hora). Se observa que entre las 7 y las 20 horas la tendencia es entre sur (180°) y suroeste (225°).



**Figura 39. Corredor Atmosférico Colina - Los Andes. Monitoreo en superficie de dirección del viento (WD, promedios de 1 hora) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011. (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

La Figura 40 muestra los resultados obtenidos para el monitoreo en superficie de velocidad del viento para Colina (promedio de 1 hora). Se observa como aumenta considerablemente a partir de las 10 de la mañana, alcanzando la máxima intensidad entre las 16 y 17 horas.

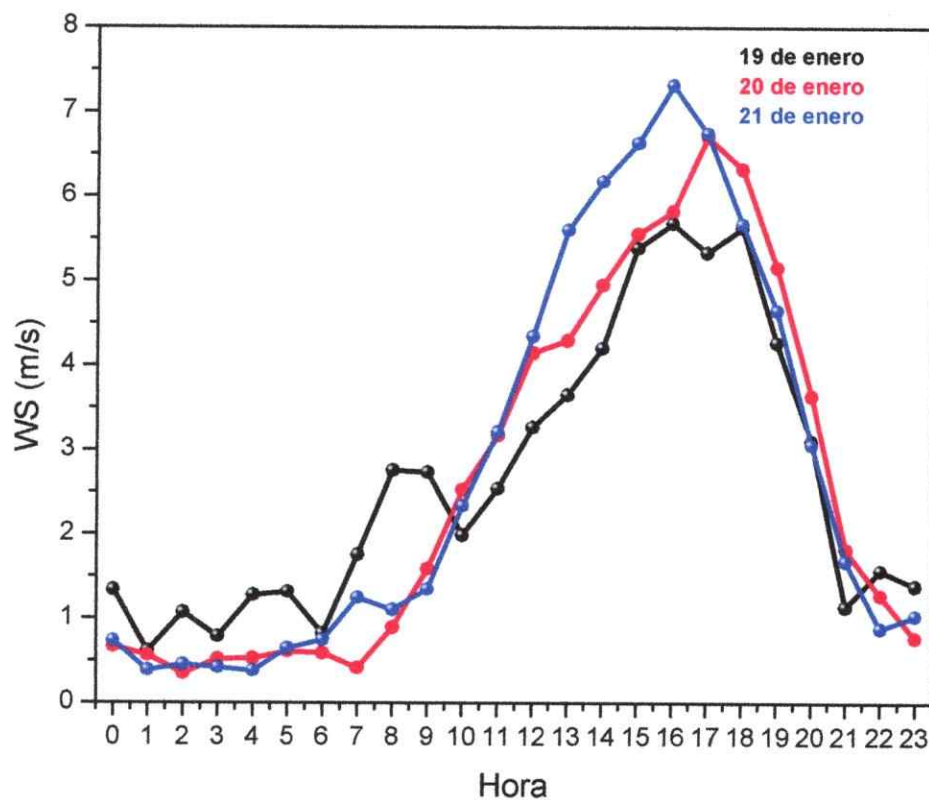


Figura 40. Corredor atmosférico Colina - Los Andes. Monitoreo en superficie de velocidad del viento (WS, promedios de 1 hora) para Colina los días 19, 20 y 21 de enero de 2011. (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).

### 3.4 Identificación de la altitud de la capa de mezcla e inversiones térmicas:

A continuación se presentan los resultados para la altitud de la capa de mezcla, la condición atmosférica dentro de ella y las principales inversiones térmicas observadas para todos los lanzamientos realizados.

La Tabla 6 resume la información obtenida para los sondeos del programa 1 realizados en Colina.

Tabla 6. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa I.

Fecha_hora	Altitud capa de mezcla (m)	Condición dentro de la capa de mezcla	Inversiones térmicas, altitud (m)
29.09.10_15:36	1382	Inestable	Subsidencia, 1936.
30.09.10_06:38	632	Estable	Radiativa, 632. Subsidencia, 1952.
30.09.10_14:17	2557	Inestable	Subsidencia, 2557.
19.10.10_06:02	639	Estable	Radiativa, 639. Subsidencia, entre 1349 y 1700. Otra, entre 2193 y 2302.
25.11.10_14:00	1829	Inestable	Subsidencia, entre 1829 y 1940.
26.11.10_06:00	805	Estable	Radiativa, 805. Subsidencia, entre 1650 y 1710. Otra, entre 1847 y 1950
26.11.10_10:50	1233	Inestable	Subsidencia, entre 1233 y 1275. Otra, entre 2254 y 2378.
26.11.10_13:58	1600	Inestable	No se observa.
21.12.10_14:19	1460	Inestable	Subsidencia, 2100.
22.12.10_05:55	940	Estable	Radiativa, 940. Subsidencia (débil), entre 1420 y 1526. Otra, entre 1710 y 2010.
22.12.10_10:58	650	Inestable	Radiativa, 650. Subsidencia, entre 1060 y 1160. Otra, entre 2090 y 2340.
22.12.10_14:04	910	Neutra	Subsidencia (débil), 910.
28.02.11_06:02	880	Estable	Radiativa, 880. Subsidencia, 1670.
28.02.11_11:01	890	Inestable	Subsidencia (débil), 1890. Otras (3 débiles), 2360; 2590 y 3070.
28.02.11_13:56	1190	Inestable	Subsidencia, entre 2365 y 2510.
23.03.11_13:56	1537	Inestable	Subsidencia, entre 2094 y 2121.
28.04.11_13:59	842	Inestable	Inversión débil, entre 2178 y 2216. Subsidencia, entre 2925 y 2967.
26.05.11_14:01	911	Inestable	Subsidencia, entre 1147 y 1240.
23.06.11_14:04	839	Inestable	Subsidencia, entre 839 y 952
28.07.11_14:04	1024	Inestable	No se observa
23.08.11_13:55	834	Inestable	Subsidencia (débil), entre 859 y 896
26.08.11_14:02	846	Inestable	Subsidencia, entre 950 y 1000

La Tabla 7 resume la altitud de la capa de mezcla, la condición atmosférica dentro de ella y las principales inversiones térmicas obtenidas para los sondeos del programa 2.

Tabla 7. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa 2.

Lugar Fecha_hora	Altitud capa de mezcla (m)	Condición dentro de la capa de mezcla	Inversiones térmicas, altitud (m)
San Antonio 18.01.11 06:04	786	Estable	Radiativa, 786. Subsidencia moderada, entre 1580 y 1720.
San Antonio 18.01.11 11:28	150	Estable	Subsidencia, entre 150 y 500
San Antonio 18.01.11 14:13	315	Inestable	Subsidencia, entre 315 y 612. Otra, entre 1000 y 1125
Los Andes 06.01.11 06:06	1030	Estable	Radiativa, 1030. Subsidencia (débil), 3560.
Los Andes 06.01.11 11:06	896	Inestable	Inversión, entre 896 y 910. Subsidencia (débil), 1980.
Los Andes 06.01.11 15:01	3160	Inestable	No se observa.
Peñaflor 22.02.11_06:00	810	Estable	Radiativa, 810. Inversión térmica entre 1045 y 1290. Subsidencia débil, entre 1580 y 1760.
Peñaflor 22.02.11 11:19	985	Inestable	Inversión entre 985 y 1215. Subsidencia débil entre 1375 y 1460.
Peñaflor 22.02.11_14:37	1180	Inestable	Subsidencia, entre 1180 y 1300. Otras dos, entre 1800 y 1880 y entre 2035 y 2065.
Las Condes 23.02.11_06:13	985	Estable	Radiativa, 985. Subsidencia débil, entre 1770 y 1850. Otra inversión en 3380.
Las Condes 23.02.11 11:06	1390	Inestable	Subsidencia débil, entre 2550 y 2580.
Colina 28.02.11 06:02	880	Estable	Radiativa, 880. Subsidencia, 1670.
Colina 28.02.11 11:01	890	Inestable	Subsidencia (débil), 1890. Otras (3 débiles), 2360; 2590 y 3070.
Colina 28.02.11 13:56	1190	Inestable	Subsidencia, entre 2365 y 2510.
Rancagua 13.01.11_06:10	790	Estable	Radiativa, 790. Subsidencia, entre 1110 y 1500. Otra inversión, entre 2350 y 2420.
Rancagua 13.01.11 11:47	1170	Inestable	Subsidencia, entre 1170 y 1205. Otra inversión en 2330.
Rancagua 13.01.11 14:33	830	Inestable	Inversión térmica, entre 830 y 900. Subsidencia débil en 2540.

La Tabla 8 resume la altitud de la capa de mezcla, la condición atmosférica dentro de ella y las principales inversiones térmicas obtenidas para los sondeos del programa 3.

**Tabla 8. Capa de mezcla, condición atmosférica e inversiones térmicas para lanzamientos del programa 3.**

<b>Lugar Fecha_hora</b>	<b>Altitud capa de mezcla (m)</b>	<b>Condición dentro de la capa de mezcla</b>	<b>Inversiones térmicas, tipo y altitud (m)</b>
Colina 19.01.11 10:53	1200	Inestable	Subsidencia, entre 1915 y 2022.
Los Andes 19.01.11 17:11	3370	Estable	Subsidencia moderada, 3370.
Colina 20.01.11 12:05	1567	Inestable	Subsidencia, entre 2360 y 2440.
Los Andes 20.01.11 17:08	3350	Inestable	Subsidencia, 3350.
Las Condes 21.01.11 12:03	1750	Inestable	Subsidencia débil, 3200.
Los Andes 21.01.11 17:20	3400	Inestable	Subsidencia débil, 3400.

## IV DISCUSIÓN

### 4.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana:

En general se observa que en los perfiles de la mañana (lanzamientos realizados cerca de las 6 a.m.) el ozono se encuentra en muy bajas concentraciones en los primeros metros, y aumentan considerablemente a medida que transcurre el día. Para explicar estas variaciones tomemos como ejemplo lo que ocurre con los perfiles verticales de ozono de los días 25 y 26 de noviembre de 2010 de la Figura 14 cuando se añaden las variables de la termodinámica atmosférica. Se observa entonces en la Figura 41, que para el perfil del día 25 a las 14:00 horas, la altitud de la capa de mezcla se ubica alrededor de los 1880 metros de altitud, el comportamiento del ozono dentro de este volumen es prácticamente constante (alrededor de 60 ppbv) lo que indica, por una parte, una buena mezcla vertical, y, por otro lado, que el ozono dentro de la capa de mezcla no interactúa con lo que ocurre a mayor altitud (donde se observan picos con mayores concentraciones de  $O_3$ ). Por su parte, la radiación solar a esta hora del día debería favorecer la formación de  $O_3$  dentro de la capa de mezcla a partir de las emisiones de  $NO_x$  y  $COVs$ . Para el perfil del día 26 a las 06:00 horas, antes del amanecer, se observan dos situaciones: **primero**, la presencia de una inversión térmica superficial cuyo tope se ubica cercano a los 800 metros; recordemos que los lanzamientos en Colina se realizaron a una altitud de 609 msnm, por lo que el tope de la inversión superficial origina una capa

de 191 metros de profundidad, se observa que el ozono dentro de este volumen se encuentra en muy bajas concentraciones que se explican por lo siguiente:

- La inversión superficial produce un volumen de aire confinado muy estable.
- La ausencia de radiación solar durante la noche impide la formación de ozono.

Por el contrario se favorecen la titulación de  $O_3$  con óxido nítrico,  $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$  (reacción (1.11)), y los procesos de depositación.

- Además, y como se verá más adelante en el análisis del corredor atmosférico Colina - Los Andes, el pico de emisiones de óxido nítrico alrededor de las 6 de la mañana favorece la titulación de  $O_3$  provocando un mínimo en sus concentraciones.

La **segunda** situación que se observa en este perfil es la formación de la capa residual, que corresponde al volumen entre el tope de la inversión superficial (800 metros) y la base de la subsidencia (1650 metros). Se observan concentraciones importantes de ozono que aumentan con la altitud y que se explican por lo siguiente:

- La formación de la inversión superficial da origen a la capa residual, atrapando contaminantes dentro de ella (COVs,  $NO_x$ ,  $O_3$ , etc.).
- Al igual que en el caso anterior, la falta de radiación solar durante la noche favorece la titulación de ozono con el NO remanente que se encuentre disponible dentro de esta capa, así como también los procesos de depositación.
- El elemento diferenciador debe ser que las emisiones matinales de óxido nítrico no estarían siendo capaces de superar la barrera que le impone la inversión radiativa, lo que impide que el ozono en la capa residual se agote con la misma

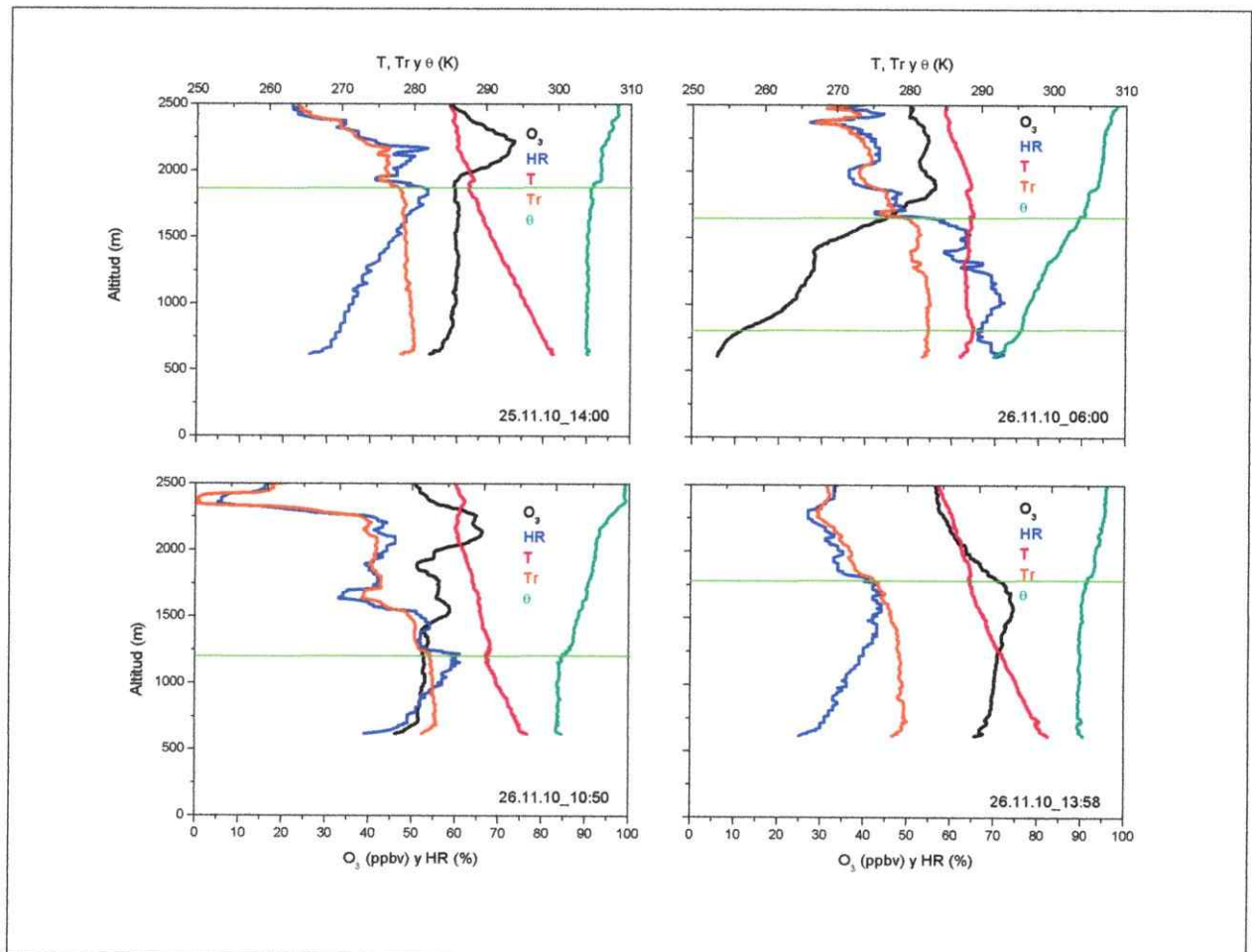


eficiencia que el ozono en la capa superficial. Ahora bien, el ozono presente en la capa residual debe dar los valores de “background” para lo que ocurra el resto del día, es decir, cuando *rompa* la inversión radiativa y aumente la capa de mezcla, el aumento de la turbulencia favorecerá la mezcla vertical y el ozono de la capa residual contribuirá con ozono “viejo” en la capa de mezcla, por lo que se esperaba que las concentraciones de O<sub>3</sub> en los perfiles verticales posteriores a las 6 a.m. muestren valores mayores a los que se observan en la capa residual.

Para el perfil del día 26 a las 10:50 horas se observa que la capa de mezcla se sitúa alrededor de los 1200 metros de altitud; al igual que el día 25, el comportamiento vertical indica una buena mezcla. No se observa la inversión radiativa del perfil de las 6 a.m. por lo que las concentraciones dentro de la capa de mezcla cumplen con lo esperado: son mayores producto de la incorporación tanto de ozono “viejo” proveniente de la capa residual, como de ozono “nuevo” formado por las reacciones fotoquímicas que inician con la oxidación de COVs por el radical ·OH (ver reacciones (1.13) a (1.19)).

Para el perfil de las 13:58 horas del día 26 se observa un incremento en la altitud de la capa de mezcla respecto del perfil anterior (alrededor de los 1780 metros), el aumento en la altitud produce un incremento del volumen de mezcla que debería ayudar a diluir los contaminantes dentro de esta masa de aire, sin embargo, el perfil muestra un aumento significativo de más de 20 ppbv de O<sub>3</sub> respecto del anterior, esto se explicaría por el incremento de la actividad fotoquímica (mayor radiación solar a esta hora del día y mayor disponibilidad de precursores).

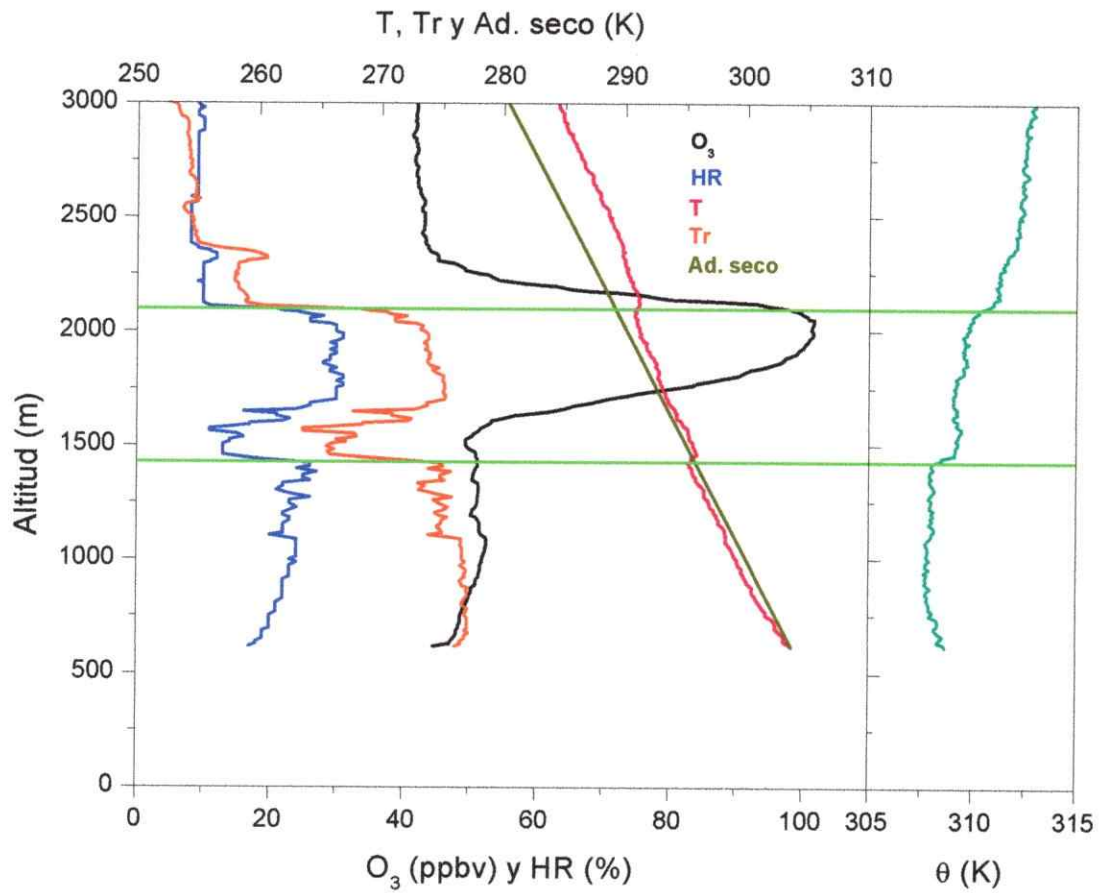
Al realizar este mismo análisis al resto de los perfiles del programa 1, se observa en general el mismo comportamiento: a las 6 a.m. ozono agotado en superficie y presencia de capa residual; a medida que transcurre el día, se produce un mayor desarrollo de la capa de mezcla y las concentraciones de  $O_3$  aumentan debido al rompimiento de la inversión superficial, que provoca la intrusión de ozono “viejo”, sumado a la incorporación de ozono “nuevo” dado por la incorporación de precursores y un aumento en la radiación solar (mayor fotoquímica).



**Figura 41. Comportamiento de ozono y variables atmosféricas dentro de la capa de mezcla y capa residual. Perfiles verticales de ozono ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr) y temperatura potencial ( $\theta$ ) para Colina, 25 y 26 de noviembre de 2010. Líneas verdes horizontales indica capas de mezcla y residual. (Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

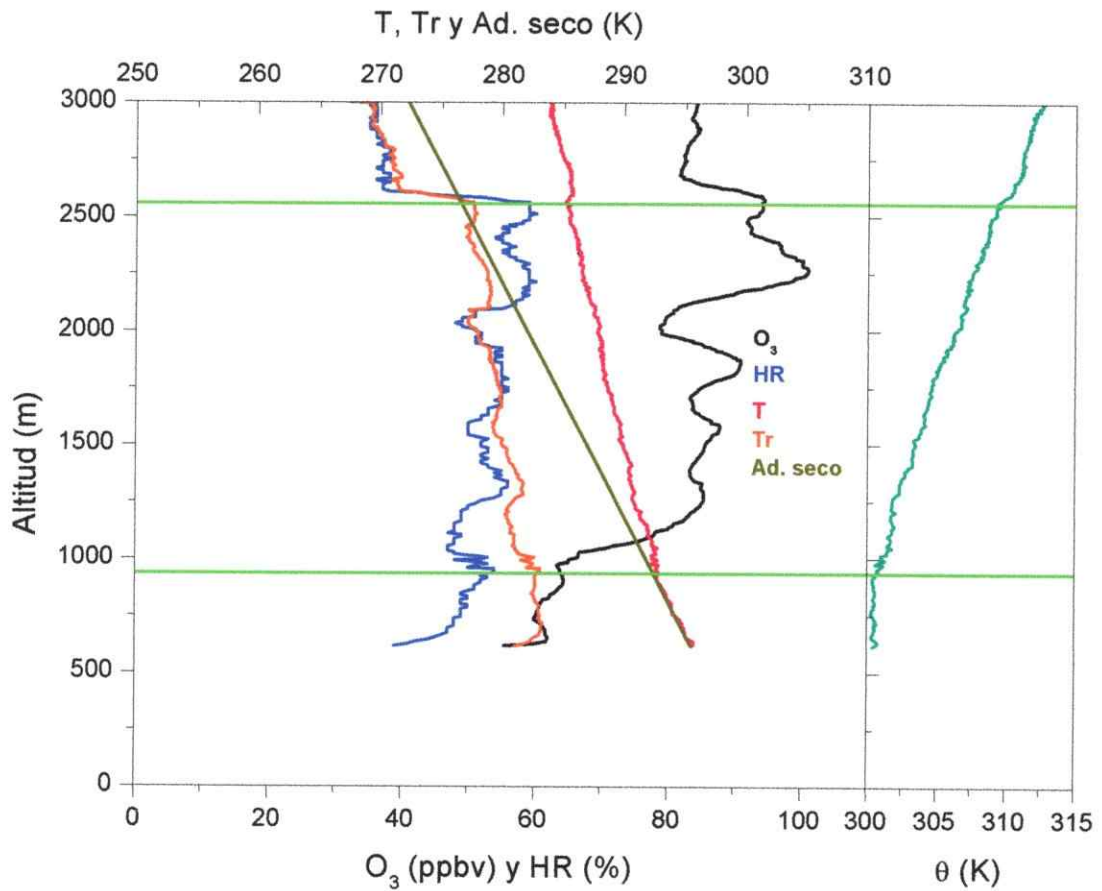
Al realizar un análisis descriptivo, se observa que el período de mayor ozono se encuentra en las estaciones cálidas, entre los meses de noviembre y marzo, superándose los 60 ppbv. Se observan además en diciembre las más altas concentraciones, donde se destacan dos perfiles, primero el del día 21 donde se obtiene un máximo muy aguzado de 101,6 ppbv a los 2000 metros de altitud; y segundo, el último perfil del día 22 donde se observan altas concentraciones hasta los 3500 metros. Realizando el mismo ejercicio que para los lanzamientos de noviembre de la Figura 41, considerando además la condición sinóptica para ambos días, la cual corresponde a paso de dorsal y subsidencia, favoreciendo los movimientos descendentes de las masas de aire (fuente: Laboratorio de Meteorología y Pronóstico de la Calidad del Aire, Centro Nacional del Medio Ambiente), se observa para el perfil del día 21 (Figura 42) una estratificación importante de ozono en la capa residual (entre los 1460 y los 2100 metros de altitud) que no interfiere con lo que ocurre en los primeros 1460 m dentro de la capa de mezcla. Esta estratificación de ozono se explica entonces por la compresión del aire en la capa residual y la incorporación de masas enriquecidas en contaminantes provenientes viento arriba.

Para el día 22 de diciembre (Figura 43) se observa una capa de mezcla en los 910 m que actúa como una barrera natural a las altas concentraciones que se observan sobre ella. Los altos valores observados a mayor altitud se encuentran en la capa residual, y deben provenir de una gran actividad fotoquímica originada por una contribución importante de precursores, a pesar del mayor enfriamiento de la atmósfera en comparación al día anterior.



**Figura 42. Estratificación de ozono en la capa residual producida por presencia de dorsal. Perfil vertical de ozono troposférico (O<sub>3</sub>), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), perfil adiabático seco (Ad. seco) y temperatura potencial (θ) para Colina, 21 de diciembre de 2010, 14:19 horas. Líneas verdes horizontales indica altitudes de capa de mezcla y residual.**

**(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**



**Figura 43. Estratificaciones de ozono en la capa residual producidas por presencia de dorsal. Perfil vertical de ozono troposférico ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), perfil adiabático seco (Ad. seco) y temperatura potencial ( $\theta$ ) para Colina, 22 de diciembre de 2010, 14:04 horas. Líneas verdes horizontales indican altitud de capas de mezcla y residual.  
(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

Abril es el último mes que presenta estratificaciones importantes para luego entrar al período frío (otoño - invierno) donde el ozono a lo largo de los perfiles es menor al período cálido debido al descenso de la insolación y al aumento de la estabilidad atmosférica. Se observa en mayo el mínimo con un comportamiento vertical que no varía significativamente sus concentraciones con la altura. Entre los meses de junio y julio la tendencia es hacia el aumento a medida que se asciende, pero sin

mayores estratificaciones de ozono. Agosto presenta un comportamiento vertical relativamente constante a partir de los 1300 m. Septiembre de 2011 marca el término del programa, se aprecia un aumento importante en las concentraciones de O<sub>3</sub>, sobretodo en superficie comparadas con el mes anterior, siendo incluso superiores a las observadas en los lanzamientos realizados en septiembre de 2010; el incremento en el O<sub>3</sub> a lo largo del perfil en comparación a los cuatro meses precedentes coincide con el cambio de estación (primavera), acercándonos al período estival donde aumenta la insolación favoreciendo una mayor fotoquímica y su consecuente aumento en la producción de ozono.

#### **4.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile:**

##### **4.2.1 San Antonio:**

Debido a que San Antonio es una localidad situada en el borde costero, sin mayor influencia de fuentes precursoras, es posible afirmar que las concentraciones de ozono observadas corresponden a valores base, con influencia de precursores presentes en este tipo de ambientes, por ejemplo, el “*background*” de ozono es sensible a las emisiones naturales de metano, cuya oxidación contribuye a los valores de base a nivel global (Solberg y col., 2005; West y Fiore, 2005; WHO, 2005;), estimándose que puede llegar a contribuir con ~5 ppbv al ozono en superficie (Fiore y col., 2007). Bajo estos antecedentes se observa para los sondeos de San Antonio de la Figura 24 un valor de referencia de 33,3 ppbv en la capa residual, dado por el perfil de las 06:04 y un valor que varía entre 15 y 25 ppbv para el ozono superficial extraído a partir de los otros dos perfiles.

#### **4.2.2 Los Andes:**

Como se observa en la Figura 4, de estudios previos se determinó que Los Andes es una zona receptora de contaminantes provenientes viento arriba, presentando las más altas concentraciones de ozono de la región (Seguel, 2010). En el perfil de las 11:06 de la Figura 25 se observan las máximas concentraciones del día. El perfil de las 15:01 muestra valores menores al sondeo anterior debido a la ausencia de subsidencia y al aumento de la inestabilidad atmosférica que sitúan la capa de mezcla en los 3160 metros de altitud (ver Tabla 7), aumentando el volumen de mezcla favoreciendo una mejor ventilación y dilución de las masas de aire.

#### **4.2.3 Peñaflor:**

Los sondeos realizados en Peñaflor (Figura 26) muestran que las concentraciones de ozono se encuentran por sobre los valores costeros. Si bien el ozono dentro de la capa de mezcla no supera los 45 ppbv, condicionan en gran medida a la ciudad de Santiago. Complementariamente, el análisis de precursores orgánicos realizado en el “Estudio Fotoquímico Regional” (Seguel, 2010) arrojó que en esta localidad, coexisten importante aportes antropogénicos (principalmente tolueno y xilenos), que no se observan de forma importante en el borde costero, junto a especies de origen biogénico (principalmente el isopreno). Este aumento en el aporte antropogénico permite una mayor disponibilidad de COVs capaces de reaccionar con el radical  $\cdot\text{OH}$  y llevar a la formación de ozono, lo que explica las mayores concentraciones respecto de lo que ocurre en el borde costero.

#### **4.2.4 Las Condes:**

Ubicada viento abajo de una importante fuente de precursores como lo es la ciudad de Santiago, Las Condes presenta altas concentraciones de ozono, sobretudo en el perfil de las 11:06 de la Figura 27, observándose una situación similar a lo que ocurre en septiembre, donde existe una gran acumulación en la capa residual, donde el límite de la capa de mezcla actúa como una barrera natural a la irrupción de ozono en superficie.

#### **4.2.5 Colina:**

Colina es un receptor de lo que ocurre en el centro y poniente de la Región Metropolitana. De todos los puntos observados, es donde se observan las mayores concentraciones en superficie (Figura 28). En los dos últimos perfiles, la capa de mezcla está limitada por inestabilidad atmosférica (ver Tabla 7), en la capa residual se observan concentraciones que varían entre 45 y 65 ppbv. En el tercer perfil se observa la mayor acumulación de ozono alcanzando los 68 ppbv dentro de la capa de mezcla.

#### **4.2.6 Rancagua:**

En los perfiles se observan concentraciones menores a las vistas al oriente y nororiente de Santiago. Para el segundo perfil de la Figura 29, se rompe la inversión radiativa observada en el primer sondeo y la capa de mezcla coincide con la subsidencia (ver Tabla 7). Para el tercer perfil se observa que las concentraciones en los primeros 1200 m son muy similares a las del sondeo anterior. En general se aprecia que la capa de mezcla no varía considerablemente su altitud en los tres sondeos (ver Tabla 7), los mayores cambios se observan en la subsidencia, que varía de 1110 m en el primer

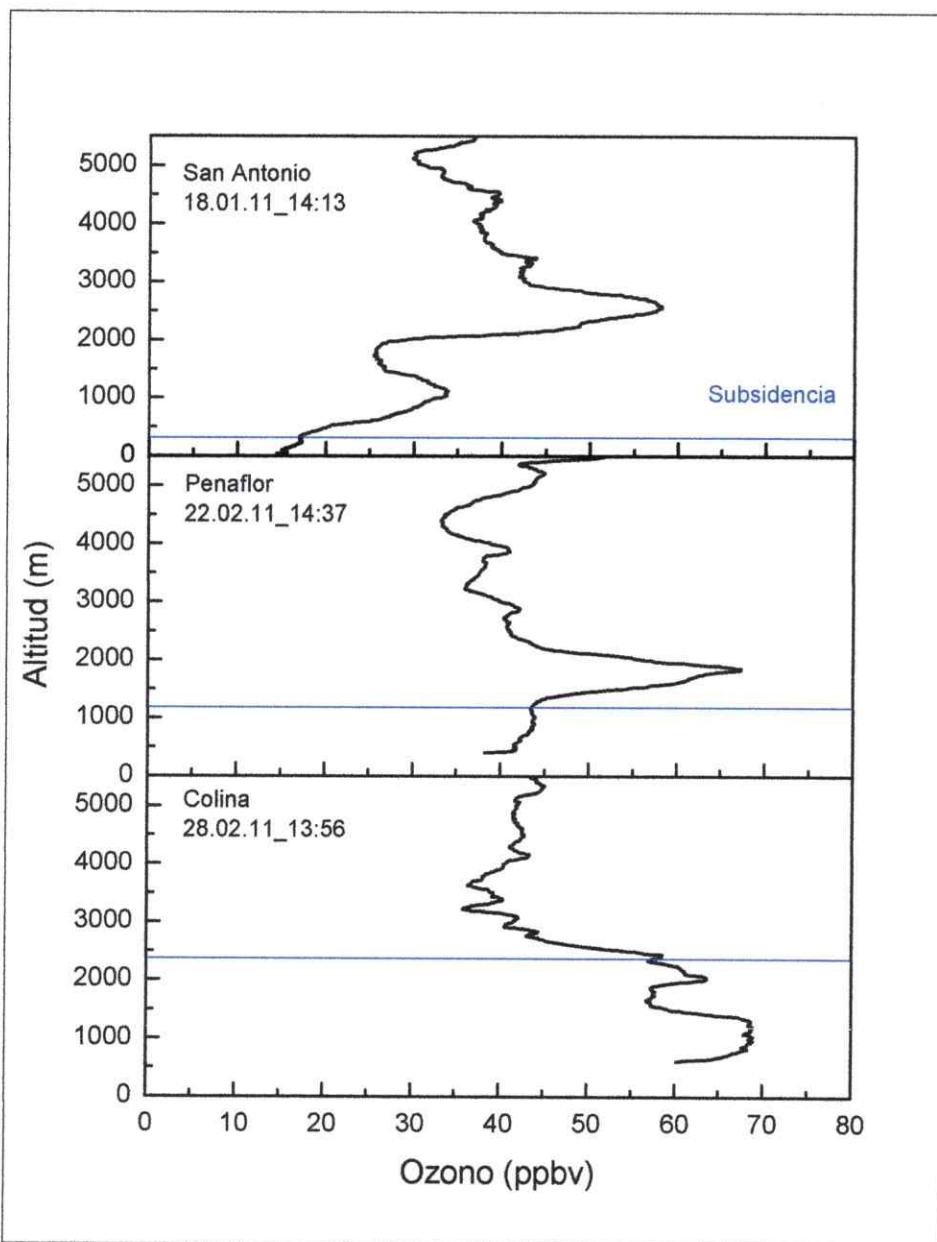


sondeo a 2540 m en el último, aumentando el volumen de aire que se encuentra bajo ella, a pesar de este incremento en altitud, los picos de  $O_3$  que se observan por debajo de la subsidencia no varían considerablemente, lo que es un indicativo del arribo de ozono proveniente viento arriba.

Por otro lado, Si consideramos los sondeos de las 14 horas de San Antonio, Peñaflor y Colina (dirección costa - cordillera), se observa que la abundancia de ozono en la capa de mezcla está determinada por contribuciones marinas, biogénicas y antropogénicas que se adicionan a una determinada masa de aire. La Figura 44 permite observar las diferencias existentes entre los perfiles de ozono en una localidad con influencia marina como San Antonio, en una localidad suburbana viento arriba de Santiago, como Peñaflor y en Colina, situada viento abajo de Santiago. Las diferencias entregan importante información para la determinación de valores de línea base y capacidades de cuencas atmosféricas. Como se indicó en el punto 4.2.1, San Antonio entrega valores de línea base, con influencia de precursores de origen marino. El sondeo de Peñaflor muestra que las concentraciones de ozono se encuentran por sobre los valores costeros, si bien el  $O_3$  en la capa de mezcla no supera los 45 ppbv, estas concentraciones pueden condicionar en gran medida a la ciudad de Santiago, como se indicó en el punto 4.2.3, el aumento respecto de San Antonio se explica por la mayor incorporación de precursores de origen antropogénico que desencadenarán las reacciones con el radical  $\cdot OH$  y formarán ozono. Colina por su parte es el receptor de lo que ocurre hacia el oeste de la región, el perfil observado debe corresponder a la incorporación de ozono proveniente desde el poniente y a formación de  $O_3$  "in-situ", el aumento significativo en la actividad industrial y de transporte de la Región

Metropolitana y las diferencias en su geografía respecto del borde costero provoca una importante incorporación y acumulación de precursores, lo que se traduce en un perfil con valores que bordean los 70 ppbv.

También en la Figura 44 se observa la evolución de la inversión térmica de subsidencia (línea azul horizontal), si se considera como un continuo, vemos el aumento en su altura en la dirección oeste-este, esto se debe a dos efectos conjuntos, primero, al aumento en la altitud del terreno (San Antonio, 16 msnm < Peñaflor, 377 msnm < Colina, 609 msnm) y segundo, al mayor calentamiento superficial a medida que nos alejamos del borde costero: en San Antonio, la geografía no impone un obstáculo a la circulación de vientos por lo que no se produce un encajonamiento que ayude al calentamiento superficial, además se tiene el efecto del mar que actúa como regulador térmico. En cambio, a medida que nos alejamos hacia el este, el mayor calentamiento superficial, ayudado por la geografía de los valles, produce un calentamiento de las masas de aire que se encuentran cercanas a la superficie provocando una mayor turbulencia que empuja a la subsidencia a mayor altitud. Por otro lado, se aprecia un efecto de barrera natural en San Antonio y Peñaflor donde impide el paso de las altas concentraciones que se observan a mayor altura en los perfiles (los picos que se observan sobre la subsidencia no son objeto de estudio de esta Tesis, sin embargo, se están trabajando algunas hipótesis que expliquen su presencia). En Colina en cambio, la mayor altitud de la subsidencia debería favorecer una mejor ventilación y una mayor dilución de los contaminantes, sin embargo, se observan concentraciones mucho mayores a las encontradas viento arriba (en San Antonio y Peñaflor), lo que demuestra que es en Santiago donde existe la mayor producción y acumulación de ozono.



**Figura 44. Evolución del perfil de ozono en la capa de mezcla y aumento en la altitud de la inversión de subsidencia en torno a las 14 horas en la dirección oeste-este. Perfiles verticales de ozono obtenidos en San Antonio (18 de enero de 2011), Peñaflores (22 de febrero de 2011) y Colina (28 de febrero de 2011).**

**(San Antonio: lat 33,60254° lon 71,61442°; 16 msnm / Peñaflores: lat 33,60070° lon 70,90067°; 377 msnm / Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm).**

#### **4.3 Distribución de ozono en el corredor atmosférico Colina - Los Andes:**

Dentro de la hipótesis planteada, las masas de aire enriquecidas en  $O_3$  formadas en la Región Metropolitana deberían estar sobrepasando el cordón de Chacabuco dirigiéndose en dirección Colina – Los Andes, por lo que la contaminación fotoquímica producida principalmente en la ciudad de Santiago se estaría extendiendo hacia la V Región Cordillera en una capa de aire que debiera ser capaz de sobrepasar la barrera natural que impone el cordón de Chacabuco, cuya altitud en esta dirección varía entre los 1300 y 2200 metros. A partir de la información planteada anteriormente se identificaron las siguientes condiciones que permitirían el transporte de ozono en el corredor:

##### **Para Colina y Las Condes:**

- Presencia de capa residual en Colina y Las Condes. El ozono en esta capa es el susceptible de ser transportado. De lo contrario se beneficiaría la mezcla vertical más que el transporte horizontal.
- La dirección del viento en la capa residual debe ser hacia Los Andes.
- La inversión de subsidencia en Colina debe ser lo suficientemente alta de modo que sobrepase la altitud del Cordón de Chacabuco.

##### **Para Los Andes:**

- La inversión de subsidencia debe ser lo suficientemente alta de modo que sobrepase la altitud del Cordón de Chacabuco.

- Debe presentar características de zona de convergencia: alta capa de mezcla, buena mezcla vertical, altas concentraciones de ozono, y dirección y velocidad del viento predominante desde la Región Metropolitana en horas de alta actividad fotoquímica.

**Para el Cordón de Chacabuco:**

- El comportamiento del ozono en este punto (perfil diario) debe presentar características que indiquen el paso de contaminantes desde la Región Metropolitana hacia la V Región.

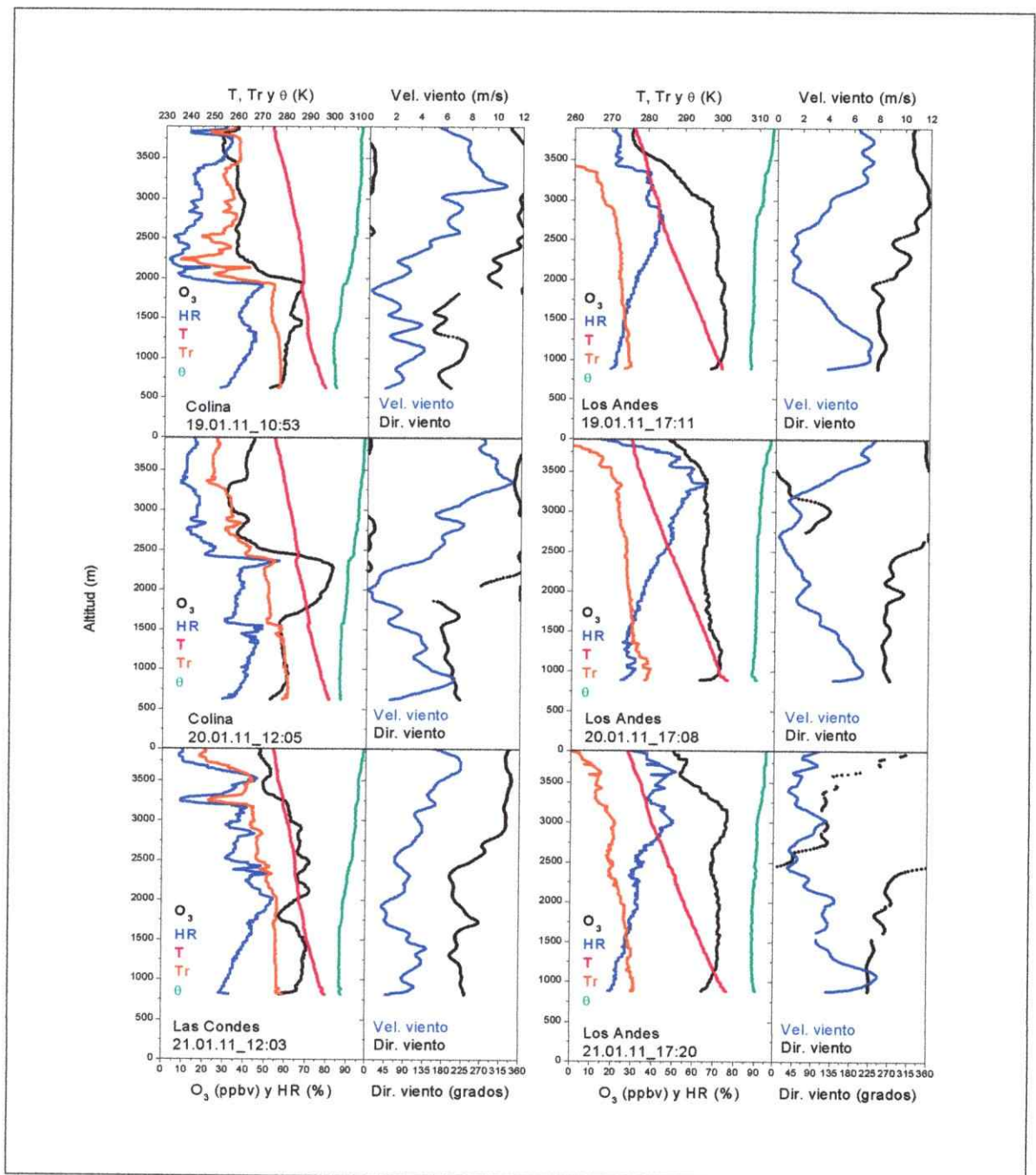
Ahora bien, el análisis conjunto de las variables meteorológicas y la termodinámica atmosférica, incorporado a los perfiles verticales de ozono de Colina, Las Condes y Los Andes del programa 3 nos permitirán realizar un análisis más acabado respecto de la formación del corredor atmosférico (ver Figura 45). Vemos que el primer requisito para Colina y Las Condes se cumple, se observa la formación de capa residual, la temperatura potencial se mantiene relativamente constante dentro de la capa de mezcla lo que indica una atmósfera estable, pero cuando se producen inversiones térmicas, posterior a ellas se observa un aumento en la pendiente de  $\theta$ , lo que se traduce en inestabilidad marcando el límite inferior de la capa residual que se elevará hasta la inversión de subsidencia que se observa a mayor altitud en los tres casos.

Para la segunda condición, de los perfiles de dirección y velocidad del viento de Colina y Las Condes se observa que, en la capa residual para el día 19 de enero, la dirección varía entre sur y suroeste, para el día 20 entre sur y sursuroeste en su gran

mayoría y para el día 21 la variación es entre sur y suroeste variando en su parte superior a noroeste, por lo tanto, en los tres perfiles se observan tramos en que el viento se dirige hacia la V Región, con oscilaciones en su velocidad que varían entre 2 y 4 m/s.

Para la tercera condición se observa que la altitud de la subsidencia en los tres casos permite sobrepasar al cordón de Chacabuco. Para el 19 de enero en Colina se observa por debajo de los 2000 metros, para el día 21 alrededor de los 2300 metros, y para Las Condes el 22 de enero se observa cercana a los 3250 metros.

Para el caso de Los Andes, observamos que el comportamiento del ozono dentro de los perfiles indica una buena mezcla vertical con altas concentraciones de  $O_3$ , la poca variación de la temperatura potencial indica una atmósfera muy estable dentro de la subsidencia que en los tres casos se observa a una altitud mucho mayor que en Colina y Las Condes (recordemos que se debe considerar como un continuo), lo que permite la intrusión de masas de aire provenientes viento arriba, y que se incorporan al volumen de mezcla de Los Andes gracias a la buena mezcla vertical que se observó en los tres casos. Para el día 19 de enero Los Andes recibe la influencia de lo que ocurre mayoritariamente hacia el suroeste, para el día 20 la influencia es desde el suroeste y oeste suroeste, y para el día 21 es entre suroeste y oeste, esto demuestra que la dirección predominante es desde la dirección de Colina.



**Figura 45. Estudio del corredor atmosférico Colina - Los Andes. Comportamiento del ozono y variables meteorológicas en la capa de mezcla y capa residual para los sondeos realizados entre los días 19 y 21 de enero de 2011 desde Colina y Las Condes (izquierda) y Los Andes (derecha). Perfiles verticales de ozono ( $O_3$ ), humedad relativa (HR), temperatura (T), temperatura punto de rocío (Tr), temperatura potencial ( $\theta$ ), dirección y velocidad del viento.**

**(Colina: lat 33,20585° lon 70,68453°; 609 msnm / Las Condes: lat 33,37681° lon 70,52362°; 794 msnm / Los Andes: lat 32,84637° lon 70,58648°; 836 msnm).**

Finalmente, para el cordón de Chacabuco, el monitoreo realizado en superficie es consistente con los planteamientos de que el ozono producido en Santiago es capaz de sobrepasar esta cadena y llegar a Los Andes. La Figura 36 en el apartado "Resultados" muestra el comportamiento superficial de ozono para los días 19, 20 y 21 de enero de 2011 en Colina, Las Condes, cordón de Chacabuco y Los Andes, paralelo a los lanzamientos de ozonosondas realizados (para Colina, Los Andes y Las Condes se realizó monitoreo continuo durante todo el período, para el cordón de Chacabuco en cambio, el monitoreo se realizó entre las 11 y las 17 horas para considerar el lapso entre lanzamientos).

En el análisis día a día del monitoreo continuo de ozono, para el 19 de enero se observa que el comportamiento del ozono en el cordón de Chacabuco es similar a lo que ocurre en Colina, pero con concentraciones menores. Se observa que el máximo en Los Andes se encuentra desfasado 3 horas respecto de Colina y que es similar al máximo del cordón de Chacabuco.

Para el día 20 de enero se observa en el cordón de Chacabuco un comportamiento prácticamente superpuesto al de Colina hasta las 13 horas. Desde las 15 horas en adelante el perfil superficial se comporta como el de Los Andes.

El 21 de enero muestra un corrimiento de los máximos, Las Condes alcanza su concentración máxima antes de las 13 horas, el cordón de Chacabuco a las 14 horas y Los Andes a las 15 horas. Nuevamente se observa la misma condición del día 19 donde el pico retrasado de Los Andes es similar con el valor del cordón de Chacabuco.

Por otro lado, los perfiles superficiales de O<sub>3</sub> de Los Andes primero dan cuenta que durante la madrugada el ozono no es agotado con la misma eficiencia que en Colina,



esto se explica por las mayores emisiones de NO en R.M. respecto de la V Región, a mayor disponibilidad de NO, mayor titulación de ozono (recordemos la reacción  $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ), de hecho, se observa que las concentraciones matinales de óxido nítrico encontradas en Los Andes son significativamente menores a las encontradas en Colina (Figuras 37 y 38), y estas emisiones producen un mínimo de ozono alrededor de las 6 a.m. (Figura 36). Un segundo elemento diferenciador es el adelantamiento del periodo de acumulación de ozono, el cual comienza 2 horas antes en Los Andes respecto de Colina (Figura 36). La diferente sincronización, se debe a la menor inhibición ocasionada por emisiones de óxidos de nitrógeno en horas de la mañana en regímenes limitados por compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Seguel, 2012). Menores emisiones de NO disminuyen la titulación de  $\text{O}_3$  en Los Andes durante la madrugada, si a eso se le suma una importante irrupción de ozono “viejo” desde la capa residual, se darán las condiciones para la mayor acumulación de ozono. La acumulación de  $\text{O}_3$  también es inhibida por la reacción de  $\cdot\text{OH}$  con  $\text{NO}_2$ , de manera que menores concentraciones de  $\text{NO}_2$  favorecen una mayor disponibilidad de radicales  $\cdot\text{OH}$  para reaccionar con COVs y formar  $\text{O}_3$ . Por otro lado, el tiempo de retardo en el descenso de las concentraciones en horas de la tarde en Los Andes respecto de Colina y Las Condes, es indicativo del arribo de aire rico en ozono a partir de las 15 - 16 horas.

Como observación general, para los tres días se aprecian altas concentraciones de ozono en el cordón de Chacabuco; recordemos que este punto de monitoreo no se encuentra bajo la influencia de fuentes precursoras de ozono, por lo que los altos valores observados se explican por el paso de masas de aire enriquecidas en ozono que se desplazan en la dirección del viento, que, como se observa en la Figura 39, es en la

dirección Colina - Los Andes durante gran parte del día, entre las 7 y las 20 horas el viento es predominante del sur y suroeste (entre  $180^\circ$  y  $225^\circ$ ), influenciando a Los Andes que se ubica al noreste de Colina (Figura 11) y que aumentan en intensidad en horas de la tarde (Figura 40), lo que demuestra el último requisito para la formación del corredor atmosférico Colina - Los Andes.

Por lo tanto, del análisis conjunto de los perfiles verticales de ozono, meteorología, termodinámica atmosférica, y monitoreo continuo de ozono,  $\text{NO}_x$ , dirección y velocidad del viento presentados en este título, se demuestra experimentalmente el cumplimiento de los requisitos que permiten el transporte de ozono desde Colina hacia Los Andes originando el corredor atmosférico.

## V CONCLUSIONES

### 4.1 Variación anual de los perfiles verticales de ozono en la Región Metropolitana:

El análisis fotoquímico y termodinámico de la atmósfera permiten explicar las variaciones diarias que experimenta el perfil vertical de ozono. La presencia de la inversión radiativa durante la noche confina a los contaminantes en una capa superficial muy estable, donde se benefician los procesos de depositación y titulación de ozono con NO. La formación de la capa residual mantiene concentraciones importantes de ozono de hasta ~25-30 ppbv que se incorporan a la capa de mezcla una vez que rompe la inversión radiativa (antes de las 11 de la mañana), a partir de lo cual se concluye que los altos valores que se observan en los perfiles posteriores a las 6 a.m. se explican por la incorporación tanto de ozono remanente del día anterior, como también de O<sub>3</sub> formado a partir de las reacciones fotoquímicas que involucran a los COVs y NOx.

Dentro de la capa residual, el comportamiento del ozono está también condicionado por lo que ocurre con las condiciones atmosféricas locales y a escala sinóptica. La formación de esta capa cuando hay paso de dorsales favorece la incorporación de ozono por debajo de la subsidencia (~ 2000-2500 metros), produciendo estratificaciones con altas concentraciones de O<sub>3</sub> susceptible de ser transportado influenciando zonas viento abajo.

Ahora bien, las variaciones estacionales que se observan responden principalmente al aumento de la insolación en los períodos cálidos (primavera y verano) donde el ángulo de inclinación con el sol es más perpendicular y la radiación llega de forma más directa. El estudio demuestra que a partir de la primavera comienza el incremento paulatino en las concentraciones de ozono, alcanzando el máximo en diciembre. A partir de abril comienza el descenso, alcanzando el mínimo en otoño (mayo).

#### **4.2 Distribución de ozono en la zona central de Chile:**

El estudio demuestra el aumento de las concentraciones desde el borde costero hacia el interior de los valles. Los sondeos realizados en San Antonio entregan los valores de línea base para lo que ocurre viento abajo. En altura, por debajo de la subsidencia (variación diaria entre ~150 y ~300 metros) el valor es de 33 ppbv, en superficie el valor varía entre 15 y 25 ppbv.

Peñaflor arroja el valor base para la Región Metropolitana, si bien la concentración de ozono en la capa de mezcla no superan los 45 ppbv, condicionan en gran medida a la ciudad de Santiago, dejando un estrecho margen para la superación de la Norma de 61 ppbv (MINSEGPRES, 2002). Por otro lado, las mayores concentraciones encontradas en Peñaflor respecto de San Antonio se explican por la mayor influencia de la actividad antropogénica, en esta localidad suburbana ubicada viento de arriba de Santiago.

Las mayores concentraciones de ozono se observaron en Colina y Las Condes, corroborando que es hacia el oriente y nororiente de la Región Metropolitana donde

existe la mayor acumulación de  $O_3$  no solo en superficie, si no también en el perfil vertical.

#### **4.3 Distribución de ozono en el corredor Colina - Los Andes:**

Los lanzamientos efectuados en Colina permitieron constatar el desplazamiento horizontal de  $O_3$  hacia Los Andes bajo las siguientes condiciones: formación de capa residual, viento en dirección hacia la V Región y subsidencia a una altitud que permite sobrepasar al cordón de Chacabuco. Por otro lado, el análisis de los perfiles verticales de ozono y las condiciones observadas dentro de la capa de mezcla en los sondeos de Los Andes permiten calificarla como zona de convergencia.

Por su parte, el comportamiento observado en los perfiles diarios de  $O_3$  en el cordón de Chacabuco (zona rural), se explicaría por el transporte de ozono y precursores (fotoquímica) que se desplazan en la dirección del viento, el cual es predominante en dirección Colina - Los Andes (Figuras 39 y 40), y que se comprueba a partir de las correlaciones entre los perfiles diarios de Chacabuco, Colina, Las Condes y Los Andes. Sin embargo, a pesar de las similitudes encontradas, se distingue una diferencia importante a partir de las ~15-16 horas donde se observó diferente sincronización en el decaimiento de las concentraciones en la V Región respecto de R.M., que se explicaría por el arribo de masas de aire enriquecidas provenientes desde Santiago; otro indicativo de este arribo se obtiene a partir de los sondeos de Los Andes, que entre los días 19 y 21 de enero de 2011 mostraron concentraciones significativas a las 17 horas.

Finalmente, del análisis conjunto de los perfiles verticales de ozono, meteorología, termodinámica atmosférica, y monitoreo continuo en superficie de ozono, NOx, dirección y velocidad del viento presentados, se identificaron los siguientes requisitos que permitirían el transporte de ozono desde Colina hacia Los Andes (Tabla 9):

**Tabla 9. Requisitos para la formación del corredor atmosférico Colina - Los Andes.**

	<b>Indicador</b>	<b>Situación de Cumplimiento</b>	
<b>Colina y Las Condes</b>	• Presencia de capa residual	✓	
	• Dirección del viento hacia Los Andes	✓	
	• Altitud de la inversión de subsidencia mayor a cordón de Chacabuco	✓	
<b>Los Andes</b>	• Altitud de la inversión de subsidencia mayor a cordón de Chacabuco	✓	
	Características de zona de convergencia	• Alta capa de mezcla	✓
		• Buena mezcla vertical	✓
		• Altas conc. de O <sub>3</sub> en perfiles verticales	✓
		• Dirección y velocidad del viento predominante desde R.M.	✓
<b>Cordón de Chacabuco</b>	• Altas concentraciones de O <sub>3</sub>	✓	
	• Comportamiento del perfil diario de O <sub>3</sub> que indique paso de masas de aire enriquecidas	✓	

#### 4.4 Recomendaciones:

Debido a que el transporte de contaminantes “*versus*” contribuciones locales y su aporte en la superación de normas de calidad del aire no han sido caracterizados en el país de forma comprensiva es que el análisis de información a partir de ozonosondas juega un rol fundamental en el entendimiento de esta problemática, cuyo estudio se transforma en un nuevo eje hacia la comprensión del comportamiento de la contaminación fotoquímica en nuestro país, permitiendo establecer las siguientes líneas de investigación y recomendaciones:

- Utilizar este trabajo como información base para realizar análisis de trayectorias de vientos y modelación fotoquímica en el corredor atmosférico Colina - Los Andes.
- Realizar campañas de monitoreo en el valle del Aconcagua en la V Región de modo que permitan determinar el aporte de ozono proveniente desde el oeste hacia el borde cordillerano.
- Ampliar el monitoreo en la VI región de manera de determinar el comportamiento de los perfiles verticales de ozono desde el borde costero hacia Rancagua.
- Identificar el aporte de ozono desde la tropósfera libre.
- Crear una red de mediciones de perfiles verticales de ozono en la zona central de Chile de manera que la información se utilice en un modelo de pronóstico de contaminación por O<sub>3</sub>, principalmente durante el período primavera-verano.

- Realizar sondeos de forma sistemática en el corredor atmosférico Colina - Los Andes de modo de establecer las características de ocurrencia del transporte, que aportarían con información clave para un modelo de pronóstico.
- Debido a que este trabajo demuestra la importancia de las mediciones de ozono y variables meteorológicas en el sector de Colina es que se recomienda la instalación de una estación de monitoreo de calidad del aire en ese sector, que cumpla con los requisitos establecidos en el D.S. 61 del 2008 del Ministerio de Salud.
- Por último, se recomienda incorporar análisis de perfiles verticales de ozono y meteorología a las líneas base de aquellos proyectos sometidos a Estudios de Impacto Ambiental que sean fuentes emisoras de precursores de ozono.



## VI BIBLIOGRAFÍA

- 2B Technologies Inc. 2005. Ozone Monitor Dual Beam Model 205 Operation Manual.
- Babor, J. A. y Ibarz, J. 1974. Química General Moderna. Ed. Marín. Barcelona. España.
- Baird, C. 2011. Química Ambiental. Ed. Reverté. Barcelona. España.
- Baumbach, G. y Vogt, U. 2003. Influence of Inversion Layers on the Distribution of air Pollutants in Urban Areas. *Water, Air, and Soil Pollution*. 3. 65-76.
- Chapman, S. 1930. A Theory of Upper-atmospheric Ozone. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*. 3 (26) 103-25.
- Delgado, J. M. 2005. Validación e Implementación de Técnicas de Captación Pasiva para el Estudio de los Niveles y Efectos de Ozono Troposférico y Dióxido de Nitrógeno en un Área Costera Mediterránea. Tesis Doctoral. Departamento de Química Inorgánica y Orgánica. Universitat Jaume I. Castelló de la Plana. España.
- Fiore, A., West, J., Horowitz, L., Naik, V., Schwarkopf, M. 2008. Characterizing the Tropospheric Ozone Response to Methane Emission Controls and the Benefits to Climate and Air Quality. *Journal of Geophysical Research*. 113. D08307.
- Goody, R. 1995. Principles of Atmospheric Physics and Chemistry. Oxford University Press. Oxford. UK.
- Komhyr, W. D. 1969. Electrochemical Concentration Cell for Gas Analysis. *Ann. Geophys.* t 25. fasc 1. pp 203-210.
- Merino, M. 2006. Episodios de Alta Concentración de Contaminantes: Material Particulado MP10 y Ozono Troposférico. En R. G. E. Morales (ed.), Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. pp 55-76. Editorial Universitaria. Santiago. Chile.
- Ministerio de Salud. 2008. Decreto n° 61 Reglamento de Estaciones de Medición de Contaminantes Atmosféricos.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. 2003. Decreto Supremo n° 112 Establece Norma Primaria de Calidad de Aire para Ozono (O<sub>3</sub>).

Morales, R. G. E. y Leiva, M. A. 2006. Contaminación por Ozono. Distribuciones Focales y Temporales en la Ciudad de Santiago. En R. G. E. Morales (ed.), Contaminación Atmosférica Urbana. Episodios Críticos de Contaminación Ambiental en la Ciudad de Santiago. pp 173-231. Editorial Universitaria. Santiago. Chile.

Morris, G. A., Ford, B., Rappenglück, B., Thompson A. M., Mefferd, A., Ngan, F., Lefer, B. 2010. An Evaluation of the Interaction of Morning Residual Layer and Afternoon Mixed Layer Ozone in Houston Using Ozonesonde Data. Atmospheric Environment. 44. 4024-4034.

Science Pump Corporation. 2004. Operator's Manual Model 6A ECC Ozonesonde.

Seguel, R., Morales, R., Leiva, M. 2012. Ozone Weekend Effect in Santiago, Chile. Environmental Pollution. 162. 72-79.

Seguel, R., Mancilla, C., Morales, R., Leiva, M. 2011. Perfil de Ozono en Chile Central. Centro Nacional del Medio Ambiente.

Seguel, R. 2010. Estudio Fotoquímico Regional. Centro Nacional del Medio Ambiente.

Solberg, S., Derwent, R., Hov, O., Langner, J., Lindskog, A. 2005 European Abatement of Surface Ozone in a Global Perspective. Ambio. 34. 47-53.

Stull, R. B. 1989. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers. 666 S.

Thermo Scientific. 2008. UV Photometric O<sub>3</sub> Analyzer Model 49i Instruction Manual.

Thermo Scientific. 2006. Chemiluminescence NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> Analyzer Model 42i Instruction Manual.

Vaisala. 2005. Digital Ozonesonde RS92 User's Guide.

Velasco, E., Márquez, C., Bueno, E., Bernabé, R. M., Sánchez, A., Fentanes, O., Wöhrnschimmel, H., Cárdenas, B., Kamilla, A., Wakamatsu, S., Molina, L. T. 2007. Vertical Distribution of Ozone and VOCs in the Low Boundary Layer of Mexico City. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 7. 12751-12779.

Villena, G., Kleffmann, J., Kurtenbach, R., Wiesen, P., Lissi, E., Rubio, M. A., Croxatto, G., Rappenglück, B. 2011. Vertical Gradients of HONO, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> in Santiago de Chile. Atmospheric Environment. 45. 3867-3873.

Warneck, P. 1988. Chemistry of the Natural Atmosphere. Volume 41. Academic Press Inc. London. UK.

West, J., Fiore, A., Management of Tropospheric Ozone by Reducing Methane Emissions. 2005. Environmental Science and Technology. 39 4685-4691.

World Health Organization. 2005. Air Quality Guidelines Global Update.