



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
QUÍMICAS**

**ESTUDIO DE LA VARIACION DEL OZONO TROPOSFERICO EN RELACION
CON FENOMENOS ELECTRICOS (RELAMPAGOS) EN LATITUDES
TROPICALES: BARBADOS, HOUSTON, MEXICO Y GOLFO DE MEXICO**

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

LUIS ANTONIO LADINO MORENO



TUTOR: Darrel Baumgardner G. AÑO: 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo al Doctor Darrel Gibson Baumgardner quiero agradecerle enormemente por su apoyo (académico, personal y económico), confianza, conocimientos y consejos a lo largo de todo el proceso de mi Maestría; por haber creído en mi, en mi trabajo y en las capacidades que poseo, sin haberme conocido previamente. También quiero agradecerle a la Doctora Graciela Binimelis de Raga, Jefe del Grupo Interacción Micro y Meso escala del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo y brindarme todos los medios necesarios para poder realizar este trabajo, sin dejar a un lado sus conocimientos y consejos, siempre muy oportunos y acertados.

Por otro lado deseo mencionar la enorme gratitud que tengo con este País y con la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios en esta gran institución, así como al Posgrado en Ciencias Químicas y a DGAPA por el apoyo económico a través del proyecto PAPIIT IN113306.

A mis compañeros de trabajo de grupo Carlos, Lluvia, Mildred, Julio, Michel, Diana y Olivia, quienes aportaron un granito de arena de una u otra manera para que este trabajo se llevara a cabo. Por último, pero sin ser menos importantes, agradezco a todos los miembros de la Colonia Colombo-Mexicana con quienes compartí tantos agradables y bellos momentos.

DEDICATORIA

A mis padres Luz Carmiña y Jorge Ariel, por creer en mí y estar allí en todos los momentos de mi vida; por darme moral, ánimo y entusiasmo en los momentos más difíciles, y a mis queridos hermanos Alba y Jorge por su apoyo sentimental. Así como a Dios por iluminar mi camino y a mi linda novia Eliza por aguantarme y acompañarme en este camino.

Mamita, espero que desde donde estés puedas ver los frutos que tu cosechaste en mi y estés orgullosa de la persona que hoy en día soy gracias a tu esfuerzo y sacrificio.

CONTENIDO

RESUMEN

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

1	CAPITULO I: INTRODUCCION.....	1
1.1	LA ATMOSFERA.....	5
1.1.1	<i>Generalidades.....</i>	5
1.1.2	<i>Estructura Vertical.....</i>	6
1.2	OZONO.....	7
1.2.1	<i>Generalidades.....</i>	7
1.2.2	<i>Formación y destrucción de ozono.....</i>	9
1.2.3	<i>Usos del Ozono.....</i>	12
1.3	DESCARGAS ELECTRICAS.....	14
1.3.1	<i>Generalidades y Clasificación.....</i>	14
1.3.2	<i>Historia y Fundamentos Teóricos.....</i>	15
1.4	MOTIVACION Y JUSTIFICACION.....	19
1.5	OBJETIVOS.....	20
1.5.1	<i>Objetivo General.....</i>	20
1.5.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	20
1.6	HIPOTESIS.....	21
2	CAPITULO II: METODOS E INSTRUMENTACION.....	22
2.1	MEDICION DE LOS PERFILES DE OZONO.....	22
2.1.1	<i>FUENTES DE DATOS IONS-06.....</i>	28
2.2	MEDICION DE LOS RELAMPAGOS.....	31
2.2.1	<i>WWLLN(World Wide Lightning Location Network).....</i>	31
2.2.2	<i>Fuentes de Datos de la WWLLN.....</i>	33
2.3	TRAYECTORIA DE LAS MASAS DE AIRE.....	35

2.4	INCERTIDUMBRES.....	37
2.4.1	<i>Mediciones con las ozono sondas.....</i>	37
2.4.2	<i>Medición de los relámpagos.....</i>	37
2.4.3	<i>Trayectorias del aire.....</i>	38
3	CAPITULO III: ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	39
3.1	MANEJO DE DATOS.....	39
3.2	CORRELACION OZONO – RELAMPAGOS (Datos IONS-06).....	45
3.2.1	<i>Barbados (BB).....</i>	47
3.2.2	<i>Houston (HO).....</i>	49
3.2.3	<i>México (MX).....</i>	51
3.2.4	<i>RonBrown (RB).....</i>	54
3.3	RESULTADOS ENTRE OZONO Y LOS RELAMPAGOS (Datos IONS-06).....	57
3.4	CORRELACION OZONO- RELAMPAGOS (Ozono Climatológico).....	64
3.4.1	<i>Correlación Datos IONS-06 y Ozono Climatológico.....</i>	65
3.4.2	<i>Resultados con Ozono climatológico.....</i>	68
4	CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	74
	APENDICE I.....	79
	APENDICE II.....	91
	APENDICE III.....	99
	APENDICE IV.....	110
	APENDICE V.....	127

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotos de descargas eléctricas entre nube- tierra y nube- nube.....	15
Figura 1.2. Ilustración de las cargas dentro de las nubes y entre nube-tierra.....	17
Figura 1.3. Intensidades de las descargas eléctricas en todo el mundo.....	18
Figura 2.1. Esquema de la ozono sonda	23
Figura 2.2. Ozono sonda lista para ser lanzada.....	24
Figura 2.3 Marwin 15.....	25
Figura 2.4 Antena UHF.....	25
Figura 2.5 Calibrador de ozono.....	25
Figura 2.6 Lanzamiento del globo con la ozono sonda.....	27
Figura 2.7. Lugares donde se realizo la campaña IONS-06 y lugares donde se llevo a cabo este estudio.....	30
Figura 2.8 Antena de detección de relámpagos del CCA.....	32
Figura 2.9 Mapa de la ubicación de las estaciones de medición de la WWLLN.....	32
Figura 3.1 Perfiles de ozono para cada uno de los 4 lugares de medición durante los días de estudio.....	39
Figura 3.2 Perfiles de ozono promedio para cada uno de los 4 lugares de medición durante los meses de Agosto y Septiembre respecto a la altura.....	42
Figura 3.3 Perfiles de ozono promedio con sus respectivas desviaciones estándar.....	43

Figura 3.4. Frecuencia de las descargas eléctricas en los alrededores de los 4 puntos de medición durante el periodo de estudio.....	44
Figura 3.5. Trayectoria de los vientos a 3 alturas diferentes, tomada de Hysplit para México el día 01 de septiembre del 2006, 18 horas antes iniciando a las 19UTC.....	46
Figura 3.6 Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.). Ejemplo para el Caso (a) tipo (i).....	58
Figura 3.7 Perfiles de ozono promedio para el día 18 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.). Ejemplo el caso (a) tipo (iii).....	59
Figura 3.8. Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.)Ejemplo para el caso (b) tipo (iv).....	60
Figura 3.9 Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.)Ejemplo para el caso (b) tipo (ii).....	61
Figura 3.10 Ubicación Geográfica de los relámpagos que influenciaron los niveles de ozono	63
Figura 3.11 Numero de eventos en cada estación separados entre el lugar de detección (tierra- mar).....	64
Figura 3.12 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 10-20 °N y los datos de la campaña IONS-06 en BB.....	65

Figura 3.13. Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 20-30 °N y los datos de la campaña IONS-06 en HO	66
Figura 3.14 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 10-20 °N y los datos de la campaña IONS-06 en MX.....	67
Figura 3.15 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 20-30 °N y los datos de la campaña IONS-06 en RB	68
Figura I-1. Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	79
Figura I-2. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	79
Figura I-3. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	80
Figura I-4. Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	80
Figura I-5. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	81
Figura I-6. Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	81

Figura I-7. Perfiles de ozono promedio para el día 09 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....82

Figura I-8. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....82

Figura I-9. Perfiles de ozono promedio para el día 12 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....83

Figura I-10. Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....82

Figura I-11. Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....84

Figura I-12. Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....84

Figura I-13. Perfiles de ozono promedio para el día 16 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....85

Figura I-14. Perfiles de ozono promedio para el día 19 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....85

Figura I-15. Perfiles de ozono promedio para el día 20 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....86

Figura I-16. Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....86

Figura I-17. Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....87

Figura I-18. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....87

Figura I-19. Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....88

Figura I-20. Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....88

Figura I-21. Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....89

Figura I-22. Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....99

Figura I-23. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	90
Figura II-1. Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	91
Figura II-2. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	91
Figura II-3. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	92
Figura II-4. Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	92
Figura II-5. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	93
Figura II-6. Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	93
Figura II-7. Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	94

Figura II-8. Perfiles de ozono promedio para el día 19 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	94
Figura II-9. Perfiles de ozono promedio para el día 20 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	95
Figura II-10. Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	95
Figura II-11. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	96
Figura II-12. Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.).....	96
Figura II-13. Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	97
Figura II-14. Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	97
Figura II-15. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	98

Figura II-16. Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	98
Figura III-1. Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	99
Figura III-2. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	99
Figura III-3. Perfiles de ozono promedio para el día 24 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	100
Figura III-4. Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	100
Figura III-5. Perfiles de ozono promedio para el día 26 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	101
Figura III-6. Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	101
Figura III-7. Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	102

Figura III-8. Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	102
Figura III-9. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	103
Figura III-10. Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	103
Figura III-11. Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	104
Figura III-12. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	104
Figura III-13. Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	105
Figura III-14. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	105
Figura III-15. Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	106

Figura III-16. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	106
Figura III-17. Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	107
Figura III-18. Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	107
Figura III-19. Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	108
Figura III-20. Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	108
Figura III-21. Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	109
Figura IV-1. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	110
Figura IV-2. Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	110

Figura IV-3. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)111

Figura IV-4. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)111

Figura IV-5. Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)112

Figura IV-6. Perfiles de ozono promedio para el día 09 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)112

Figura IV-7. Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)113

Figura IV-8. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)113

Figura IV-9. Perfiles de ozono promedio para el día 12 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)114

Figura IV-10. Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)114

Figura IV-11. Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	115
Figura IV-12. Perfiles de ozono promedio para el día 16 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	115
Figura IV-13. Perfiles de ozono promedio para el día 17 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	116
Figura IV-14. Perfiles de ozono promedio para el día 18 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	116
Figura IV-15. Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	117
Figura IV-16. Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	117
Figura IV-17. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	118
Figura IV-18. Perfiles de ozono promedio para el día 24 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	118

Figura IV-19. Perfiles de ozono promedio para el día 26 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	119
Figura IV-20. Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	119
Figura IV-21. Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	120
Figura IV-22. Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	120
Figura IV-23. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	121
Figura IV-24. Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	121
Figura IV-25. Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	122
Figura IV-26. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	122

Figura IV-27. Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	123
Figura IV-28. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	123
Figura IV-29. Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	124
Figura IV-30. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	124
Figura IV-31. Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	125
Figura IV-32. Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	125
Figura IV-33. Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	126
Figura IV-34. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)	126

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades físicas del ozono	7
Tabla 2.1 Descripción de los sitios de medición.....	29
Tabla 2.2 Ubicación de las antenas de la red WWLL.....	33
Tabla 2.3 Resumen de las desviaciones estándar en las ozono sondas.....	37
Tabla 3.1. Resumen de las alturas promedio de la capa limite y Tropopausa en cada estación.....	41
Tabla 3.2 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en Barbados (BB) día por día.....	47
Tabla 3.3. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en HO día por día.....	49
Tabla 3.4 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en MX día por día.....	52
Tabla 3.5. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en RB día por día.....	54
Tabla 3.6 Caso (a) con datos IONS-06.....	58
Tabla 3.7 Caso (b) con datos IONS-06.....	60
Tabla 3.8 Caso (c) con datos IONS-06.....	62
Tabla 3.9 Caso (a) con datos de Ozono Climatológico.....	69
Tabla 3.10 Caso (b) con datos de Ozono Climatológico.....	69
Tabla 3.13 Caso(c) con datos de Ozono Climatológico.....	87
Tabla V-1. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en BB día por día con el ozono climatológico.....	127

Tabla V-2. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en HO día por día con el ozono climatológico.....	128
Tabla V-3. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en MX día por día con el ozono climatológico.....	129
Tabla V-4. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en RB día por día con el ozono climatológico.....	130

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades físicas del ozono	7
Tabla 2.1 Descripción de los sitios de medición.....	29
Tabla 2.2 Ubicación de las antenas de la red WWLL.....	33
Tabla 2.3 Resumen de las desviaciones estándar en las ozono sondas.....	37
Tabla 3.1. Resumen de las alturas promedio de la capa limite y Tropopausa en cada estación.....	41
Tabla 3.2 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en Barbados (BB) día por día.....	47
Tabla 3.3. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en HO día por día.....	49
Tabla 3.4 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en MX día por día.....	52
Tabla 3.5. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en RB día por día.....	54
Tabla 3.6 Caso (a) con datos IONS-06.....	58
Tabla 3.7 Caso (b) con datos IONS-06.....	60
Tabla 3.8 Caso (c) con datos IONS-06.....	62
Tabla 3.9 Caso (a) con datos de Ozono Climatológico.....	69
Tabla 3.10 Caso (b) con datos de Ozono Climatológico.....	69
Tabla 3.13 Caso(c) con datos de Ozono Climatológico.....	87
Tabla V-1. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en BB día por día con el ozono climatológico.....	127

Tabla V-2. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en HO día por día con el ozono climatológico.....	128
Tabla V-3. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en MX día por día con el ozono climatológico.....	129
Tabla V-4. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en RB día por día con el ozono climatológico.....	130

ACRONIMOS

- BB: Barbados
- CFC: Clorofluorcarbonados
- CL: Capa Limite
- CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- COV's: compuesto orgánicos volátiles
- DBO: Demanda Biológica de Oxígeno
- DQO: Demanda Química de Oxígeno
- ECC: Electrochemical Concentration Cell
- EPA: Agencia de Protección Ambiental
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global
- HBFC: hidrobromofluorocarbonos
- HCFC: hidroclorofluorocarbonos
- HFC: hidrofluorocarbonos
- Hidritec: Tecnología y Gestión de Recursos Hídricos
- HO: Houston
- HYSPLIT: Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory
- IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
- IONS-06: Intex Ozonesonde Network Study 2006
- IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático
- MCLF: cloroformo de metilo
- MX: México
- NAVSTAR: NAVigation System Time and Ranging
- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- NCEP: National Centers for Environmental Prediction
- NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration

- NOM: Normal Oficial Mexicana.
- NOx: NO + NO₂
- OMS: Organización Mundial para la Salud
- OTD: Optical Transient Detector
- O₃ – PM / DE: (Concentración de ozono diaria- Concentración Promedio) /
Desviación Estandar
- PAN: peroxiacetil nitrato
- PCB's: Bifenilos policlorados
- PFC: perfluorocarbonos
- PNUMA: [Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente](#)
- ppm: partes por millón
- RB: Ron Brown
- SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico
- SF₆: hexafluoruro de azufre
- SMA: Secretaria del Medio Ambiente
- TRMM: Misión de Medición de la Lluvia Tropical
- TCC: tetracloruro de carbono
- TP: Tropopausa
- UNFCCC: United Nations Framework Convection on Climate change
- VAFTAD: Volcanic Ash Forecast Transport and Dispersion
- WWLLN: World Wide Lightning Location Network

RESUMEN

En vista de la gran actividad de relámpagos que se experimenta en algunas zonas del mundo, una de ellas el Caribe y que estos relámpagos generan moléculas de NO_x , las cuales a su vez intervienen en el ciclo del ozono; en este trabajo se llevó a cabo un estudio de la correlación existente entre los relámpagos y el ozono troposférico.

Tomando como base las mediciones de la campaña IONS-06 llevada a cabo en los meses de Agosto y Septiembre del 2006, en la cual se realizaron lanzamientos de sondas de ozono en 23 localidades de Canadá, USA, México y el Caribe, así como los datos obtenidos de la red mundial de relámpagos WWLLN, se realizó un análisis entre las concentraciones de ozono, las trayectorias de las masas de aire y la ubicación donde se registró la caída de las descargas eléctricas.

En este trabajo se utilizaron datos de ozono sondas lanzadas desde la Ciudad de México, Barbados, Houston y sobre el Golfo de México.

Aparte de la correlación entre relámpagos y ozono, también se llevo a cabo la determinación de la profundidad de la capa limite (CL) y la altura de la tropopausa en cada uno de los cuatro sitios de estudio, encontrando que México es el lugar con la mayor profundidad de la CL y la menor tropopausa, mientras que Barbados reportó el valor más pequeño de CL y Houston la mayor altura de tropopausa.

Como complemento al estudio realizado, se llevo a cabo una comparación entre los promedios de ozono obtenidos con las mediciones de la campaña IONS-06 y los datos de ozono climatológico realizados por *McPeters (2007)*, para los años 1988 y 2002.

Como resultado de la correlación, se encontró que cuando las descargas eléctricas ocurren a una distancia no muy grande (< 100 km) desde el punto de medición y pocas horas antes del lanzamiento de la ozono sonda (~ 4 horas), la concentración de los niveles de ozono troposférico que se transporta por la masa de aire al lugar de mediciones, reporta incrementos y genera picos positivos en los perfiles trazados.

Se plantearon tres casos con cuatro posibilidades cada uno tanto para los datos de la campaña IONS-06 como para los de ozono climatológico con el ánimo de estudiar detalladamente la correlación entre relámpagos y ozono; encontrando que en los tres casos en cerca del 65% del total de los días de estudio, se presentó el tipo “iii” (cuando no hubo relámpagos sobre las trayectorias y si aumentos de ozono). Sin embargo, en un 20% del total de los días se presentó el tipo “i” (cuando hubo coincidencias entre los relámpagos y las trayectorias de las masas de aire y simultáneamente se experimentaron aumentos en los niveles de ozono). Lo cual confirma que bajo ciertas condiciones climatológicas y meteorológicas, los relámpagos pueden ser una fuente importante de ozono troposférico.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente por N_2 y O_2 (concentración estable) otros gases, y partículas en concentraciones variables. Los gases se distinguen de las partículas en que estas últimas se encuentran en fase líquida o sólida.

Entre los múltiples gases presentes en la atmósfera se encuentran los gases traza, aquellos con concentraciones del orden de partes por millón o menores. Uno de ellos y de gran importancia para la vida, así como para el desarrollo y sostenibilidad de la tierra, es el ozono; gas azulado y de olor fuerte, tóxico para los organismos vivos a concentraciones >0.11 ppm (en una hora), debido a su fuerte reactividad, pero necesario a alturas mayores, ya que absorbe la componente ultravioleta de la luz solar que es peligrosa para la vida (UMSA, 2007).

El ozono es un gas traza importante para la química y el equilibrio radiativo de la troposfera, ya que además de determinar la capacidad oxidante de la atmósfera es el principal agente asociado al smog fotoquímico. Su presencia en la troposfera baja, tiene implicaciones grandes para los estudios de la calidad del aire (Cooper; et al, 2006). Alrededor de un 10% del ozono total se encuentra en la troposfera, sin embargo es considerado el gas troposférico más importante debido a sus propiedades físicas y químicas. El restante 90% se localiza en la estratosfera. (Krzyscin, 2007).

Los ciclos de los gases atmosféricos involucran un gran número de procesos físicos y químicos. Los gases son producidos por procesos químicos dentro de la atmósfera misma, por actividad biológica, exhalación volcánica, decaimiento radiativo de algunos elementos y actividades industriales humanas. Pueden ser removidos de la atmósfera por reacciones químicas, por actividad biológica, por procesos físicos (como la formación de partículas), así como por la depositación en los océanos y la tierra. La vida media de una molécula de

gas en la atmósfera puede extenderse desde segundos hasta millones de años, dependiendo de la eficacia de los procesos de remoción.

Otro proceso importante en la química atmosférica (remoción de gases y partículas) es la convección profunda, fenómeno con el cual pueden removerse los contaminantes de la atmósfera baja y ocasionalmente pasar a la estratósfera (*Thompson, et al, 1997*).

La mayor parte de las especies atmosféricas consideradas, ventilan los agentes contaminantes en una región en la cual sus concentraciones exceden substancialmente los niveles normales y tienen fuentes naturales así como antropogénicas. Por lo tanto, para determinar en su totalidad el efecto que las emisiones no naturales pueden tener en la atmósfera, es esencial entender los ciclos atmosféricos de los gases traza, incluyendo sus fuentes naturales y antropogénicas así como sus mecanismos predominantes de eliminación (*Seinfeld and Pandis, 1998*).

Desde los años 70 el estudio del ozono atmosférico ha concentrado la atención del mundo científico, debido al fenómeno del adelgazamiento de la capa de ozono (4% por década), provocado principalmente por causas antropogénicas, como la emisión de Clorofluorcarbonos, halones, etc.; dicho fenómeno ha asumido formas dramáticas con el llamado "agujero antártico de ozono". Asimismo, ha adquirido importancia el monitoreo del ozono superficial como indicador del grado de contaminación ambiental en las grandes ciudades cuyo origen se puede asociar con la quema de hidrocarburos.

El estudio realizado por *Fortuin y Kelder (1998)* muestra que el ozono presenta una alta variabilidad, tanto en espacio como en tiempo, y se hace mucho más marcado en la troposfera, donde el tiempo de residencia del ozono es corto; por lo tanto se asume su distribución a las fuentes y a los sumideros locales del ozono.

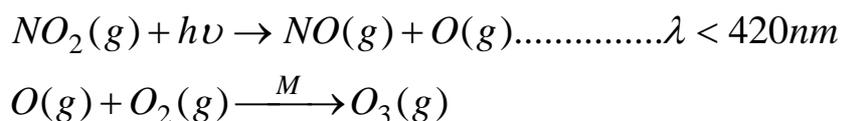
Los componentes que están íntimamente ligados a la creación y destrucción de ozono son los compuestos nitrogenados (NO, NO₂, PAN, NO_y, etc.), hidrocarburos diferentes al metano (como pentano, butano, etano, etc.), compuestos orgánicos volátiles (COV'S)

oxigenados y monóxido de carbono (CO). También cabe destacar la acción de la radiación solar en la parte del espectro visible (UV-Visible), permitiendo las diferentes fotodisociaciones del ozono y los compuestos relacionados con él (*Sancho, et al, 2001*).

Las moléculas de ozono se forman y destruyen de forma natural; esto ocurre cuando las moléculas de oxígeno interaccionan con la radiación ultravioleta proveniente del sol, generando radicales oxígeno, quienes forman o destruyen las moléculas de ozono; de esta manera se da el ciclo natural de esta molécula. Pero asimismo, debido a las grandes cantidades de contaminantes que diariamente emitimos a la atmósfera como CO, CO₂, CH₄, orgánicos, entre otros, este ciclo se ve alterado y tanto la formación como la destrucción del ozono toma múltiples caminos según el tipo de compuesto químico y la cantidad o concentración que éste contenga.

El ozono superficial ocupa hoy en día un papel muy importante en los programas de vigilancia atmosférica del mundo por varias razones: la primera y más importante es la motivación de estudiar el impacto en la salud (principalmente como irritante de las mucosas); en segundo lugar porque el ozono es un potente regulador de la capacidad oxidante de la troposfera. (*Thompson and Kenneth, 1992*), pudiendo llegar a causar graves daños en la vegetación e importantes problemas en la salud pública, como sucedió por ejemplo en los episodios de “smog” fotoquímico de Los Angeles o como está ocurriendo actualmente en la ciudad de México. En tercer lugar, porque en los últimos años se ha demostrado que juega un papel muy importante como gas de efecto invernadero (*IPCC, 2001*) debido a su fuerte absorción en el infrarrojo, provocando un forzamiento radiativo muy importante. (*Sancho; et al, 2001*).

El dióxido de nitrógeno gaseoso (NO₂) es uno de los precursores para la formación de ozono:



Cuando ocurre una descarga eléctrica de tipo nube a tierra (relámpago), se libera una gran cantidad de energía de tal manera que se genera una ruptura de los enlaces químicos N-N y O-O de las moléculas de nitrógeno y oxígeno presentes en la atmósfera, formando óxido nítrico el cual promueve la formación de ozono. *Cooper, et al, (2006)* demostraron que la afectación *in situ* de la producción del ozono en Houston tiene una contribución fuerte por los NO_x originados por los relámpagos, una suposición razonable dado que la investigación sobre los últimos 30 años ha establecido que los relámpagos son la fuente global más grande de NO_x en la troposfera superior. Estimaciones recientes de NO_x producidos por relámpagos indican que son del orden de 5 Tg [N] por año, con una incertidumbre de un orden de magnitud (*Beirle; et al, 2005*).

En nuestro estudio estudiaremos las trayectorias de los vientos en Barbados, Houston, México y el Golfo de México, 18 horas antes de los lanzamientos de las ozono sondas con el ánimo de establecer la frecuencia de las descargas a lo largo de estas trayectorias, y de esta manera poder determinar en que proporción influyen en la concentración de ozono troposférico. De los 23 lugares de mediciones en la campaña IONS-06 se seleccionaron los cuatro lugares mencionados anteriormente debido a que estos se encontraban en latitudes tropicales y tres de ellos en el área del Caribe, de gran interés para México. En vista que la mayor frecuencia de relámpagos en nuestra área de estudio fue en horas de la noche, las trayectorias de retroceso se trazaron a un tiempo de 18 horas para poder estudiar los relámpagos desde las 19 hasta las 13 horas (hora local).

Además de lo anteriormente mencionado, las descargas eléctricas son una evidencia llamativa de los procesos microfísicos y de electrificación que ocurren en las nubes. Se relacionan directamente al granizo, gotitas y cristales de hielo dentro de la nube y la intensificación de la precipitación en la superficie. La distribución espacial y temporal de las descargas eléctricas proporciona evidencia de la evolución de la actividad convectiva de la atmósfera (*Rodríguez, 2007*).

1.1 LA ATMOSFERA

1.1.1 Generalidades

Se sabe que antes de la aparición de los organismos vivos, la atmósfera tenía efecto un medianamente reductor, debido a que estaba compuesta de dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂), vapor de agua (H₂O) y unas pequeñas cantidades de hidrogeno (H₂). En la actualidad la atmósfera tiene un carácter oxidante y esta constituida por N₂, O₂, CO, gases nobles y agua. El O₂ surgió como subproducto de la actividad fotosintética.

La distribución de radiación solar en el planeta es el resultado de la ubicación en el sistema solar, la orientación del eje de rotación y las trayectorias alrededor del sol; asimismo, la distribución de temperatura en el planeta es el resultado del balance radiativo de la radiación solar mas la terrestre. La radiación solar, las nubes, las corrientes oceánicas y la circulación atmosférica juntas contribuyen de una manera compleja a producir nuestro clima. Por otro lado, los gases de efecto invernadero están jugando un rol en el clima de la tierra, debido a que estos generan un aumento en la temperatura en superficie a medida que aumentan su concentración año tras año.

La atmósfera terrestre se compone principalmente de los gases nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y argón (1%); el otro 1% lo conforman los gases traza, los cuales son de gran importancia para el balance radiativo de la tierra, así, como de las propiedades físicas de la atmósfera. De todas las moléculas gaseosas en el aire, más del 99% son moléculas de nitrógeno y oxígeno, los cuales son responsables de la presión, temperatura y estructura de la densidad de la atmósfera terrestre.

1.1.2 Estructura Vertical

La atmósfera se puede dividir de varias maneras, una de ella es en una alta y baja región; la atmósfera baja es generalmente considerada hasta el límite de la estratósfera a una altitud

cercana a los 50 km. Estudios de la atmósfera baja son conocidos como meteorología y los de la atmósfera alta que se extiende hasta >500 km le competen a la aeronomía. La atmósfera terrestre presenta variaciones de temperatura y presión con la altura, siendo los perfiles de temperatura con la altura, la base para distinguir las capas de la atmósfera.

Tropósfera: es la capa mas baja de la atmósfera y se extiende desde la superficie terrestre hasta la tropopausa, más o menos entre 10 y 15 km. dependiendo de la latitud y de la época del año. Se caracteriza porque la temperatura disminuye con la altura. Se divide en la capa límite y en la troposfera libre; la primera es la capa más cercana a la superficie terrestre, en la cual la acumulación de contaminación es muy preocupante.

Cuando los contaminantes escapan de la capa límite, pueden viajar horizontalmente grandes distancias antes de ser removidos del aire, debido a que en esta región se puede presentar el fenómeno de advección. La capa límite difiere de la troposfera libre en que su perfil de temperatura responde a los cambios de la temperatura terrestre en menos de una hora, mientras que el perfil de temperatura de la troposfera libre responde a cambios en la temperatura terrestre en periodos mas largos (*Jacobson, 2002*).

Estratósfera: se extiende desde la tropopausa hasta la estratopausa a más o menos 45 o 50 km., la temperatura aumenta con la altura y la mezcla vertical es lenta. El ozono desempeña el papel principal en la regulación del régimen térmico de la estratosfera, pues el contenido de vapor de agua dentro de la capa es muy bajo. La energía solar se convierte en energía cinética cuando las moléculas del ozono absorben la radiación ultravioleta, generando turbulencias locales, dando como resultado el calentamiento de la estratosfera. Las condiciones meteorológicas afectan fuertemente la distribución del ozono; la mayoría de la producción y de la destrucción del ozono ocurre en la estratosfera superior tropical, donde están presentes las cantidades más grandes de radiación ultravioleta.

Las demás capas de la atmósfera son Mesosfera, Termosfera, Ionosfera y Exosfera, las cuales en este estudio no tienen mucha relevancia.

1.2. OZONO

1.2.1 Generalidades

El ozono fue descubierto en el año 1785 por Von Marum quien apreció su olor característico. Hubo de pasar un tiempo para ser clasificado y ya en el año 1840, Shümbein lo llamó “OZONO”, nombre que proviene del griego que significa “olor”. Pero a pesar de esto, hasta el año 1863 no se descubrió su verdadera naturaleza, ya que se creía que se trataba de un peróxido de hidrógeno. Ese año, Soret confirmó que se trataba de un compuesto formado por tres átomos de oxígeno

El ozono no es emitido directamente a la atmósfera sino que se forma en ella. La única fuente en el aire es mediante reacciones químicas y los sumideros incluyen reacciones, transferencia a las capas de suelo y hielo, además de disolución en agua oceánica. Debido a que el ozono es relativamente insoluble en agua la tasa de disolución es relativamente lenta. Las propiedades del ozono se enumeran en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Propiedades físicas del ozono (Hidritec, 2007)

Variable	Valor
Peso Molecular	48 gmol ⁻¹
Temperatura de condensación	-112°C
Temperatura de fusión	-192.5°C
Presión crítica	54 atm
Densidad (gas)	1.32 gmL ⁻¹
Densidad (liquido a -182°C)	1.572 gmL ⁻¹
Peso del litro de gas (a 0°C y 1 atm)	2.144 g

En condiciones normales de presión y temperatura, el ozono es químicamente inestable (se descompone fácilmente). Dicha inestabilidad aumenta con la temperatura y la humedad, llegando a ser totalmente inestable por encima de los 200° C. Su grado de mayor

estabilidad lo alcanza a los -50°C , 38 mmHg, es decir, 0.05% de la presión atmosférica a nivel de superficie.

A temperatura ambiente, reacciona lentamente con los compuestos orgánicos saturados aumentando dicho ataque a temperaturas de alrededor de 78°C . Frente a los compuestos orgánicos no saturados, forma ozónidos, compuestos muy inestables y que dan lugar a aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, etc.

Otra característica importante del ozono es que después del flúor, es el compuesto más oxidante en la atmósfera, debido a su facilidad para captar electrones; además, se descompone fácilmente. En estado gaseoso es ligeramente azul, azul oscuro en fase líquida y rojo oscuro en fase sólida. Presenta estructura molecular angular entre los tres átomos de oxígeno que componen su molécula y en igualdad de condiciones es más estable en el agua que en el aire. (*Hidritec, 2007*).

Como es bien conocido el ozono es más abundante en la estratosfera, aunque en proporciones extremadamente pequeñas: si todo el ozono presente en la atmósfera se llevara a nivel del mar el espesor de esa capa no pasaría de los 3 mm (= 300 unidades Dobson). La máxima concentración del ozono se observa entre 15 y 30 km. de altura, dependiendo de la latitud.

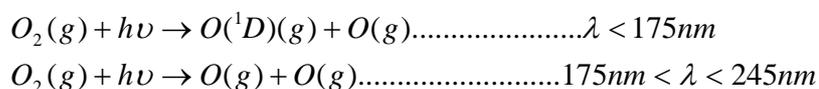
En la troposfera el cociente de mezcla del ozono ($m_{\text{O}_3}/m_{\text{aire}}$) está entre 20 y 40 ppbv a nivel del mar y de 30 a 70 ppbv a altitudes mayores. En la estratósfera, el máximo del cociente de mezcla es de 10 ppmv. Los dolores de cabeza causados por ozono, ocurren a cocientes de mezcla mayores que 0.15 ppmv, dolores de pecho a 0.25 ppmv y los dolores de garganta y tos a 0.30 ppmv.

1.2.2 Formación y destrucción de ozono

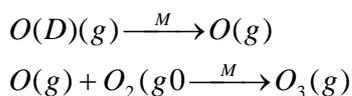
El ozono es creado de forma natural por efecto de los rayos solares sobre las moléculas de oxígeno en la propia troposfera y, sobre todo, en la estratosfera, de donde pasa en gran parte a la troposfera gracias al intercambio de aire que se produce en la tropopausa. Sin embargo existen múltiples formas y mecanismos de producirlo y destruirlo como se muestra a continuación:

a) Ciclo de Chapman (Jacobson, 2002)

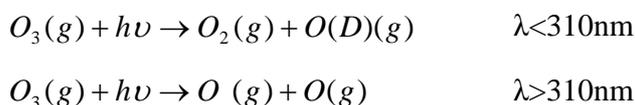
En la estratosfera, las longitudes de onda en el UV-lejano (menores que 245 nm) rompen el oxígeno molecular formando la molécula de ozono de la siguiente manera:



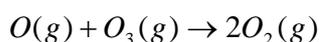
La primera reacción es importante solo en el tope de la estratosfera debido a que las longitudes de onda son menores que 175nm y no penetran mas abajo. El átomo de oxígeno excitado en la reacción anterior rápidamente reacciona así:



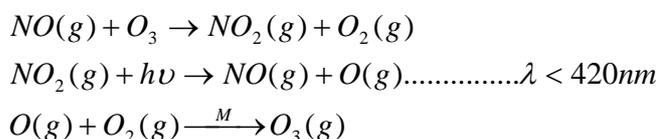
El ozono es destruido naturalmente en la estratosfera y troposfera por:



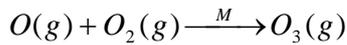
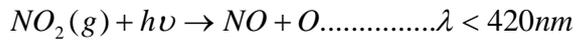
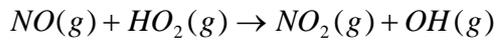
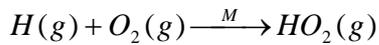
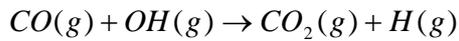
Y también el ozono estratosférico es destruido por:



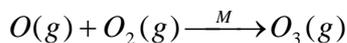
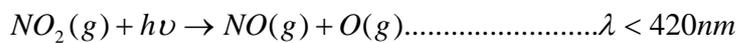
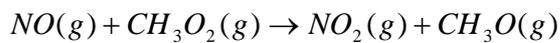
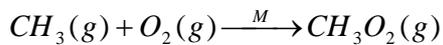
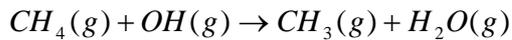
b) Concentración de ozono en estado foto estacionario



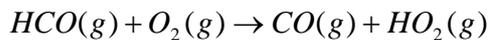
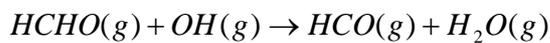
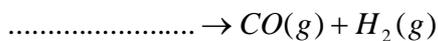
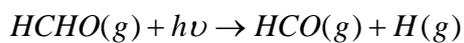
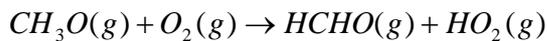
c) Producción de ozono a partir de monóxido de carbono



d) *Producción de ozono a partir del metano*

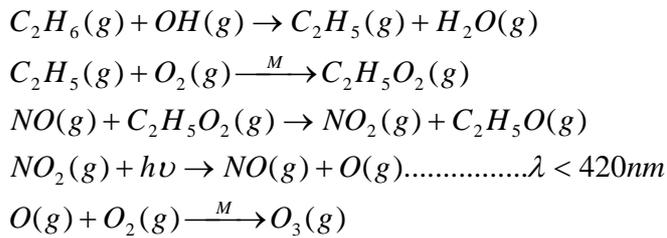


e) *Producción de Ozono a partir de compuestos orgánicos oxigenados*

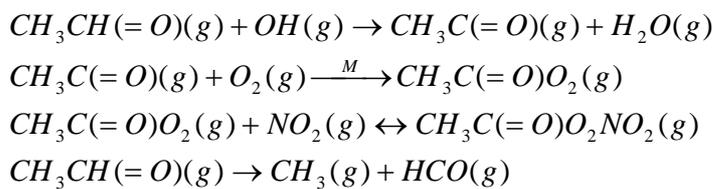


A partir de CO (g) se siguen los pasos indicados en (c) para obtener O₃.

f) *Producción de Ozono a partir de Etano*

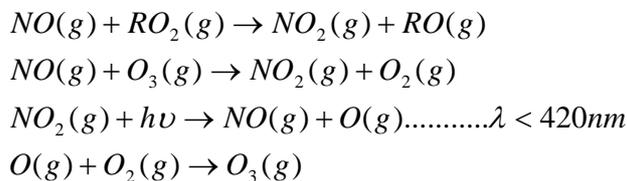


g) Producción de ozono a partir de PAN (peroxiacetil nitrato) y acetaldehído



A partir de los productos de la reacción anterior se forma ozono, siguiendo las reacciones indicadas en (d).

h) Producción y destrucción de ozono a partir de compuestos orgánicos



i) Otros tipos de producción de ozono

También existe producción de ozono a menor escala, a partir de alcanos, alquenos, aromáticos, alcoholes y terpenos.

De todas las formas de producción de O₃ mencionadas anteriormente las más probables en la troposfera son los casos b, c y d, debido a que en la atmósfera se encuentran concentraciones significativas tanto de NO_x como de CO y CH₄. Sin embargo los demás casos no se pueden descartar ya que ocurren pero a menor escala. En vista de lo

mencionado anteriormente es muy difícil poder definir cual es la fuente o el precursor del ozono que medimos en los ozono sondeos.

Como se menciona anteriormente las ciudades de Houston y México son dos lugares muy poblados y con gran actividad industrial en su interior, lo cual hace más difícil aislar la contribución a los niveles de ozono a los NO_x producidos por relámpagos, ya que existen en sus alrededores múltiples precursores de ozono emitidos por fuentes antropogénicas.

1.2.3 Usos del Ozono

Aparte de la protección que nos brindan las moléculas de ozono en la estratosfera, estas a su vez presenta múltiples aplicaciones según el tipo de reacción y sistema en el que estén presentes; algunas de ellas son:

- En vista de que el ozono es un agente oxidante muy fuerte con una vida notablemente corta (vida media de 30 minutos), cuando este entra en contacto con las bacterias o los virus, el átomo de oxígeno adicional las rompe directamente, por medio de la oxidación. El tercer átomo de oxígeno de las moléculas del ozono es el que se pierde y solamente permanecerá el oxígeno.

Los desinfectantes se utilizan en varias industrias. El ozono se utiliza en la industria farmacéutica, para potabilizar el agua, para el tratamiento de aguas procesadas, reduce los niveles de DBO/DQO (demanda biológica de oxígeno/ demanda química de oxígeno), para la preparación del agua ultra-pura y para la desinfección superficial. El sistema del ozono puede quitar hasta veinticinco contaminantes del agua. Los productos químicos que se pueden oxidar con ozono son: halógenos orgánicos absorbibles; nitritos; hierro; manganeso; cianuro; pesticidas; óxidos de nitrógeno; hidrocarburos clorados; bifenilos policlorados (PCB's) (*King-ozono, 2007*).

- El oxígeno está presente en casi todos los procesos químicos que se producen en un acuario, ya sea en forma de gas libre, disuelto o mezclado con otros elementos. La relación entre las pérdidas y las ganancias de oxígeno en los procesos químicos es lo que se conoce como potencial Redox. En el acuario la demanda de oxígeno es constante, tanto para permitir la vida de los seres vivos (animales y bacterias) como para los procesos presentes en la transformación de compuestos químicos. Un nivel bajo de oxígeno afecta gravemente a los dos sistemas anteriores, pero puede ser corregido fácilmente a través de la instalación de un equipo de ozono en la entrada de aire del skimer. Estos aparatos llevan medidores de nivel para mantener el Potencial Redox entre 300 y 350 mv. Este controlador es totalmente necesario para que la cantidad de ozono aportada sea justo la necesaria. Ya que de otra manera sería letal para los animales.
- El ozono tiene diversas aplicaciones en el campo de la medicina, constituyendo la ozonoterapia. Los efectos del ozono sobre el organismo se pueden resumir en los siguientes puntos (*Ilzarbe, 2000*):
 - a) Tonifica y refuerza las paredes estomacales, previniendo úlceras y otros trastornos digestivos.
 - b) Actúa sobre los agentes causantes de la acidez y mal aliento, neutralizándolos con rapidez: facilita la digestión.
 - c) Alto poder cicatrizante, reduciendo considerablemente el tiempo de curación de llagas, heridas y úlceras, así como el riesgo de infección.
 - d) Elimina las bacterias productoras de las caries, sin afectar al esmalte, contribuyendo de esta forma a una mejor higiene dental.
 - e) Disuelve la prácticamente la totalidad de los cálculos renales.
 - f) Disuelve totalmente el ácido úrico.

g) Actúa sobre centros nerviosos disminuyendo las tensiones y la sensación de angustia.

1.3. DESCARGAS ELECTRICAS

1.3.1 Generalidades y Clasificación

Las descargas eléctricas son fenómenos meteorológicos que se producen por el choque o unión entre cargas positivas y negativas dentro de una nube, o entre ellas y la tierra. Estas descargas se propagan a través de un dieléctrico como es el aire (un dieléctrico es una sustancia que es mala conductora de la electricidad y que amortigua la fuerza de un campo eléctrico que la atraviese).

Cuando los cristales de hielo dentro de una nube chocan con el granizo, se produce una transferencia de carga, quedando el granizo con carga negativa y el cristal con carga positiva. Este tipo de choques ocurren porque existe turbulencia dentro de la nube, así como corrientes verticales ascendientes y descendientes, sin dejar un lado el efecto de gravedad, debido a que el granizo tiene una mayor masa, cae con una mayor velocidad ($T < 0$). Las partículas más pequeñas tienden a adquirir la carga positiva, mientras que las partículas más grandes adquieren una carga más negativa. Estas partículas tienden a separarse bajo influencias de corrientes aéreas ascendentes y de la gravedad hasta que la porción superior de la nube adquiere una carga positiva neta y la porción más baja de la nube se carga negativamente. Esta separación de la carga produce un potencial eléctrico enorme dentro de la nube y entre la nube y la tierra. Esto puede ascender a millones de voltios, y junto con la resistencia eléctrica en el aire se genera un rayo. El relámpago, entonces, es una descarga eléctrica entre las regiones positivas y negativas dentro de la nube. Un destello (flash) del relámpago se compone de una serie de movimientos con un promedio cercano a cuatro. La longitud y la duración de cada movimiento del relámpago varían, pero típicamente es cerca de 30 microsegundos. (La energía máxima media por movimiento es cerca de 1012 Watts)

Según el origen y destino de estas descargas en la atmósfera terrestre, se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. Descargas entre nube y tierra
2. Descargas dentro de una misma nube (intranubes)
3. Descargas entre una nube y otra nube (internubes)
4. Descargas entre una nube y la ionosfera

Obviamente, las primeras son las que suelen causar un daño o pérdida más frecuente en las vidas humanas por lo que suponen una situación de riesgo. Los tres tipos restantes circunscriben su peligrosidad a los aviones, (Olcina; Ayala, 2002), aunque es poco probable, podrían. Las descargas entre nubes son del 80% mayor que las de nube a tierra.



Figura 1.1. Fotos de descargas eléctricas entre nube- tierra y nube- nube. (Aparicio, 2007)

1.3.2 Historia y Fundamentos Teóricos

Desde la antigüedad, el rayo se ha asociado en muchas culturas a la intervención divina y siempre como una forma de castigo de ésta hacia el hombre. Sin embargo, ya los etruscos empezaron a sospechar que era el choque entre nubes la fuente generadora del rayo. Pero no fue hasta 1752, con Benjamín Franklin, famoso inventor del pararrayos, cuando se logra

establecer científicamente la relación existente entre las formaciones nubosas y las descargas eléctricas que se originan en su seno. Así, por medio de experimentos se descubrió que las tormentas (en cuyo interior se produce una gran liberación de energía que se manifiesta en forma de fuertes precipitaciones, intensas rachas de viento y abundante aparato eléctrico) se cargan eléctricamente como si se tratara de una enorme pila, esto es, con el polo negativo en su base (T entre -5°C y -10°C , generalmente) y el polo positivo en su cúpula ($T < 30^{\circ}\text{C}$). El proceso completo se describe a continuación:

a) El aire caliente de las capas inferiores de la atmósfera tiende a subir y a medida que lo hace, al encontrarse con otras masas de aire más frío se va enfriando y condensando en forma de minúsculas gotas de agua, convectividad, humedad, temperatura y disparo orográfico da lugar a enormes formaciones nubosas denominadas cumulonimbos, con forma de castillo (de ahí también el nombre de *cumulus castellanus*) o yunque (al expandirse horizontalmente la parte superior de la nube al aproximarse a la tropopausa).

b) Al exponerse al umbral de los 0°C (aunque se puede encontrar agua líquida a temperaturas menores) y por debajo de esta temperatura de congelación, las gotas de agua comienzan a cristalizarse en hielo al tiempo que empiezan a darse las condiciones para que se puedan generar distintos fenómenos naturales ligados a los cumulonimbos tales como precipitaciones intensas, tornados, granizadas, rayos, relámpagos y, por supuesto, los truenos que acompañan a los destellos luminosos. En el núcleo del cumulonimbo granizo y cristales de hielo empiezan a golpearse y colisionar entre sí y contra otras gotas de agua que, a pesar de estar sometidas a temperaturas de varios grados bajo cero no llegan a cristalizar, provocando que los hidrometeoros se carguen eléctricamente: las partículas más grandes se precipitan por gravedad hacia la base de la nube, cargándose negativamente, mientras que las más pequeñas (menos de 100 micrómetros) continúan ascendiendo hasta la cúpula del cumulonimbo, cargándose positivamente. Así es como adopta esa forma de pila eléctrica, donde el polo negativo se sitúa en la parte central y baja de la nube y el polo positivo en la parte más alta (dipolo tormentoso) como se muestra en la figura 1.2. (Aparicio, 2007).

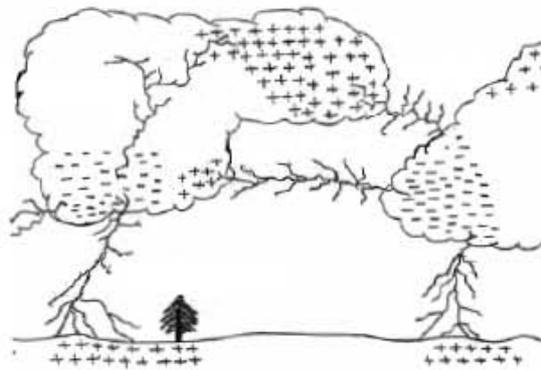


Figura 1.2. Ilustración de las cargas dentro de las nubes y entre nube-tierra (NASA, 2007)

c) A continuación el granizo precipitado se carga positivamente en su caída al llegar a la misma base de la nube, creando una pequeña zona de carga positiva sin neutralizar en la parte más inferior de la célula tormentosa, que da lugar al tripolo tormentoso, estructura fundamental para que se produzcan las descargas eléctricas. Un núcleo tormentoso típico tiene tres regiones distintivas de carga: una región superior cargada positivamente de -30° C, una negativa intermedia de unos -10° C y una mixta positiva y negativa en torno a la isoterma de 0° C. En esta zona del cumulonimbo, entre esa pequeña carga positiva subyacente y la carga negativa inferior se produce una pequeña chispa que desencadena una descarga-guía que va progresando a través del aire de forma escalonada y con múltiples ramificaciones, que le dan al destello luminoso ese aspecto dentado y nérveo que nosotros podemos contemplar, rasgando el aire por la parte que ofrece menor resistencia. Por inducción eléctrica de la carga negativa de la nube, la superficie de la tierra neutra aunque con cargas de ambas polaridades, invierte su polaridad convirtiéndose en positiva, y esto hace que la descarga eléctrica que se dirige hacia el suelo bajo determinadas condiciones sea atraída por éste, dando lugar al rayo.

Pero no todos los rayos nacen necesariamente del seno de una tormenta. Las erupciones volcánicas, por ejemplo, provocan una importante fuente de calor atípica que al elevarse en el aire se expone a una rápida condensación, iniciando con ello el proceso generador del rayo (Anagnostou, 2006).

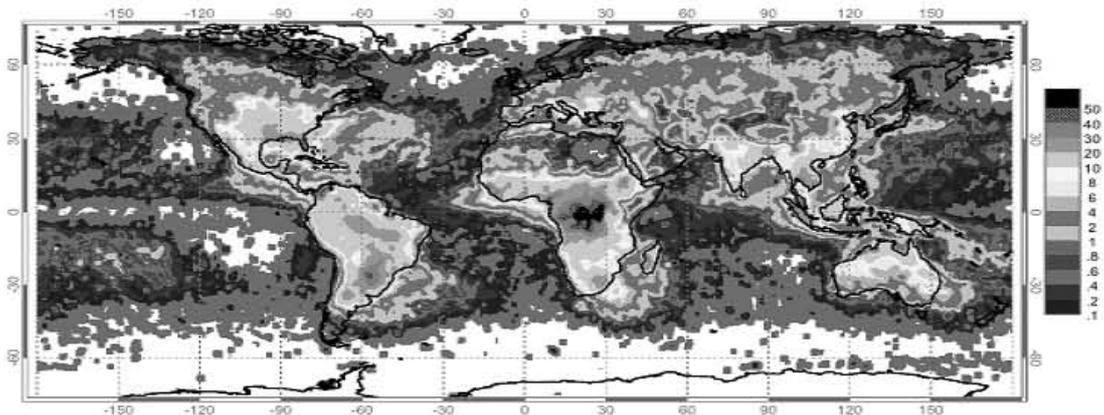


Figura 1.3. Intensidades de las descargas eléctricas en todo el mundo (Wallance, 2007)

La figura 1.3 nos muestra las zonas de mayor y menor intensidad de relámpagos en todo el globo terráqueo, resaltando la parte de África central, Indonesia y la Florida (Golfo de México), como las de mayor intensidad y frecuencia de este tipo de fenómenos.

Como se mostró en la sección 1.2.2 los NO_x participan en la formación y destrucción química del ozono. Existen dos formas de emitir NO_x a la atmósfera: emisiones desde la superficie y producción de NO_x por relámpagos. Grewe; et al, (2001) encontraron que el impacto de los relámpagos en la troposfera superior no varía fuertemente con la altitud, mientras que el impacto de las emisiones superficiales disminuye con la altitud. Entre todas las fuentes, el relámpago contribuye a la mayor variabilidad de NO_x en la troposfera superior a latitudes medias durante el verano.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y la gran cantidad de relámpagos que se producen diariamente (25 millones al año en solo Estados Unidos), podemos interpretar la

relación directa que hay entre los relámpagos y la producción de NO_x , e inferir que dicha producción de NO_x provenientes de los relámpagos afectan el ciclo natural del ozono, alterando de esta manera no solo su concentración a nivel local sino también a nivel global, debido al transporte de los NO_x por las diferentes masas de aire. Por otro lado también debemos tener en cuenta el transporte de ozono por los vientos verticales, el cual es generado por la convección profunda y genera el transporte de masas de aire y sus componentes de alturas superficiales a otras mucho más altas (estos fenómenos son más frecuentes cerca del ecuador que de los polos, donde predominan movimientos de divergencia). Nuestro estudio consiste en localizar las variaciones de la concentración de ozono y observar si esta variación o aumento es debido a los NO_x provenientes de relámpagos.

1.4 MOTIVACION Y JUSTIFICACION

En vista que en la troposfera los NO_x actúan como un catalizador para la producción de ozono (Liu, 1977.; Jaeglé et al., 1999), y que a lo largo de ella la adición de moléculas de NO_x provenientes de relámpagos generan alteraciones en el clima y la temperatura en esta capa y la superficie terrestre, es necesario realizar estudios detallados sobre dichas contribuciones y las consecuencias a futuro. El impacto de NO_x adicionales es particularmente grande en la alta troposfera debido a que en ésta área el tiempo de vida de las moléculas ozono es más grande (del orden de días) que en la capa límite (del orden de horas) (Ehhalt et al., 1992; Davis et al., 1996; Jaeglé et al., 1998).

Cálculos globales con modelos, sugieren que la mayoría de los NO_x en la troposfera tropical provienen de relámpagos (Lamarque et al., 1996), pero hasta la fecha no hay observaciones claras de gran escala sobre O_3 asociados a las emisiones de NO_x de los relámpagos. Esto contrasta con el gran incremento de ozono en la primavera en el trópico sur causada por las emisiones de NO_x de la combustión de biomasa (Thompson et al., 1996; Schultz et al. 1999).

Con el ánimo de poder aportar al estudio de esta temática se llevo acabo este trabajo, en el cual se seleccionaron cuatro sitios de los 23 lugares de la campaña IONS-06 debido a que eran los únicos dentro del trópico, además de abarcar varias latitudes en el mismo, siendo favorable para estudiar el comportamiento de los NO_x provenientes de relámpagos. Las fechas en las cuales fueron realizados los ozono sondeos fueron los meses de Agosto y Septiembre del 2006; de igual manera se trazaron las trayectorias de las masas de aire con el Hysplit y se tomaron los datos de la red mundial de descargas de ultra baja frecuencia (WWLLN por sus siglas en ingles) para estos mismos días.

El ozono troposférico, alcanza altas concentraciones en la atmósfera de las grandes ciudades a través de reacciones fotoquímicas complejas, por ello con este trabajo se aporta el estudio del comportamiento del ozono en la Ciudad de México y de Houston, así como en dos lugares marítimos como Barbados y el Golfo de México.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

El objetivo general consiste en estudiar y evaluar la correlación existente entre el número de relámpagos y los niveles de ozono troposférico en cuatro lugares: Barbados, Houston, México y Golfo de México.

1.5.2 Objetivos Específicos

- I) Trazar los perfiles de ozono para cada uno de los 4 puntos de estudio en cada uno de los días de medición y observar las variaciones significativas en la vertical.
- II) Realizar las corridas de las masas de aire para cada ozono sondeo, 18 horas antes de cada lanzamiento con el programa Hysplit.
- III) Encontrar las coordenadas y tiempos exactos en los cuales los relámpagos coinciden con las trayectorias de las masas de aire.

- IV) Determinar la proporción en la que los relámpagos alteran la concentración del ozono troposférico.

1.6 HIPOTESIS

Como se mencionó anteriormente, en la atmósfera los dos gases presentes en mayor porcentaje son el nitrógeno y el oxígeno, las descargas eléctricas que ocurren entre nube-Tierra (relámpagos) vienen acompañadas de grandes cantidades de energía, y a la vez estas provocan la ruptura de los enlaces covalentes N-O en las moléculas de NO_x, liberando un radical oxígeno, este a su vez interactúa químicamente con las moléculas de oxígeno de sus alrededores, formando nuevas moléculas de ozono.

Ho (Hipótesis Nula): Los relámpagos generan NO_x dentro de las nubes y hay alteración en la concentración de los niveles de ozono a nivel troposférico en los alrededores de las descargas; sin embargo, no se puede observar un incremento del ozono algunas horas después del evento del relámpago.

H1 (Hipótesis alterna): Cuando ocurre una descarga eléctrica y esta coincide con las trayectorias de las masas de aire a una distancia y tiempo no muy grandes, ocurre una producción de NO_x y un aumento significativo en los niveles de ozono que se pueden ser observados varias horas después en los ozono sondeos.

CAPITULO II

METODOS E INSTRUMENTACION

2.1. MEDICION DE LOS PERFILES DE OZONO

Una de las técnicas más precisas para obtener perfiles verticales de ozono a lo largo de la troposfera y estratosfera es el ozono sondeo. Este consiste en el ascenso vertical de unos sensores, con la ayuda de un globo lleno de helio, el cual asciende verticalmente a lo largo de la atmósfera, hasta llegar a su máxima expansión (presión atmosférica ~3 hPa), donde estalla (explota) y todo el sistema regresa a Tierra (*Sancho, et al 2001*).

La ozono sonda (Figura 2.1) consiste en un sensor de ozono conectado con una interfase (OIF11) unida a una radiosonda RS80 modificada (RS80-15G), por lo tanto la humedad, presión, temperatura, altura, dirección e intensidad del viento pueden ser medidas simultáneamente con el ozono. El sistema es capaz de medir la distribución vertical del ozono hasta una presión de 3 hPa (dependiendo de las condiciones atmosféricas y meteorológicas).

A medida que la ozono sonda asciende el aire atmosférico es aspirado a través de un tubo de plástico por medio de una bomba de teflón. El flujo de aire es enviado a una cámara (sensor de ozono) donde se produce una reacción química al entrar en contacto con la solución sensitiva que allí se encuentra. Cada molécula de ozono genera una corriente eléctrica de dos electrones. Los valores de corriente generados por esta reacción son digitalizados a través de la interfase OIF11 y enviados a la radiosonda.

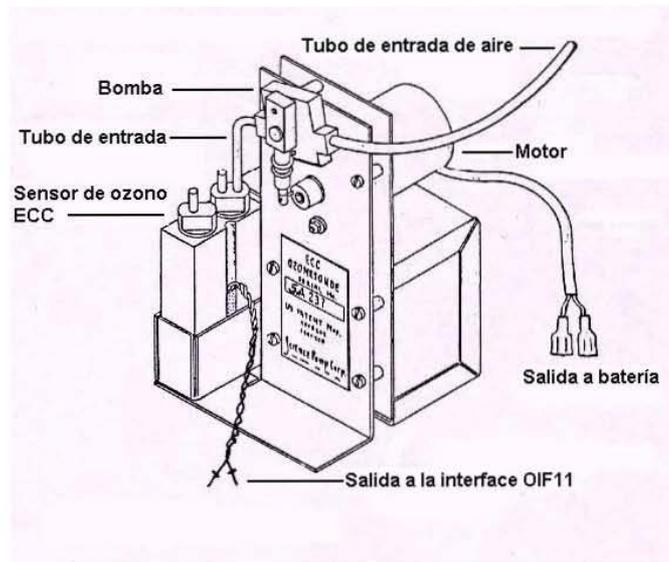


Figura 2.1. Esquema de la ozono sonda (Sancho; et al, 2001)

La ozono sonda cuenta con un sensor que es una celda de concentración electroquímica. Esta celda de concentración está formada por una cámara anódica y una cámara catódica con electrodos de platino. Ambas cámaras se encuentran unidas por un puente de iones. Una bomba de vacío envía un flujo de aire hasta la solución electrolítica catódica provocando una reacción química. Al ser los electrodos de platino químicamente inertes no participan de esta reacción, solo actúan como conductores de los electrones.

La evaporación de la solución sensitiva limita el tiempo de operación del sensor de 2 a 3 horas. La temperatura en el interior de la caja de vuelo debe estar por encima de 0 °C. Resulta necesario destacar que la reacción química en la cámara del sensor se ve afectada por las dimensiones del sensor, el aire burbujeante, el total del volumen líquido del sensor y por la temperatura de la solución del sensor.

La interfase es la tarjeta electrónica encargada de transferir los datos de intensidad de corriente y de temperatura del sensor para el cálculo de la densidad de ozono, enviando esta información a través de la radiosonda con la que está conectada, a tierra vía radio.

La radiosonda dispone de su propia batería, también húmeda, pero sensiblemente mayor a la del motor de la bomba de la sonda. La radiosonda lleva incorporados unos sensores de temperatura, humedad y presión con las siguientes características:

- Presión: Barómetro aneroide capacitivo de rango de medida de 1060 a 3 hPa
- Temperatura: Termistor con rango de medida de +60 a -90 °C
- Humedad: Capacitor de película fina, denominado HUMICAP, que mide la humedad relativa en la escala de 0 a 100 %

La radiosonda se conecta a la interfase y se sujeta a la caja de poliestireno, teniendo mucho cuidado con el tubo u orificio de entrada de aire y con la parte superior de la antena de la radiosonda. Esta es la encargada de enviar la información a tierra para su posterior análisis. (Figura 2.2)



Figura 2.2. Ozono sonda lista para ser lanzada (Sancho, et al. 2001)

En Tierra se necesitan otros equipos para poder recibir y procesar las señales enviadas por la sonda de ozono. El equipo receptor utilizado en la actualidad es un DigiCora Marwin-15 de la empresa Väisälä (Figura 2.3).

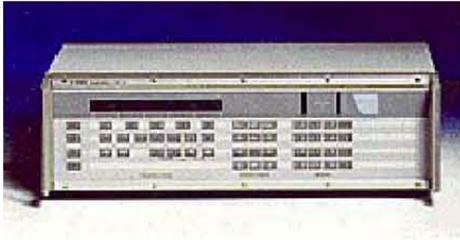


Figura 2.3 Marwin 15

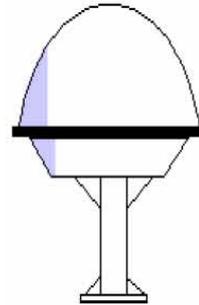


Figura 2.4 Antena UHF

Este equipo de recepción, está conectado a una antena multipolar de UHF de telemetría (Figura 2.4) que se utiliza para recibir los datos enviados por la radiosonda (presión, temperatura y humedad (PTU)). El equipo de recepción DigiCora está conectado también a un ordenador tipo PC vía RS-232 en el que se encuentra instalado un programa de adquisición de radio sondeos, bajo Windows, y que realiza además el filtrado de datos, las depuraciones preliminares y las presentaciones gráficas con datos brutos.

Se utiliza además otro equipo auxiliar que es necesario para calibrar la ozono sonda y los sensores meteorológicos antes del lanzamiento (figura 2.5). Como parte de este equipo cabe destacar:

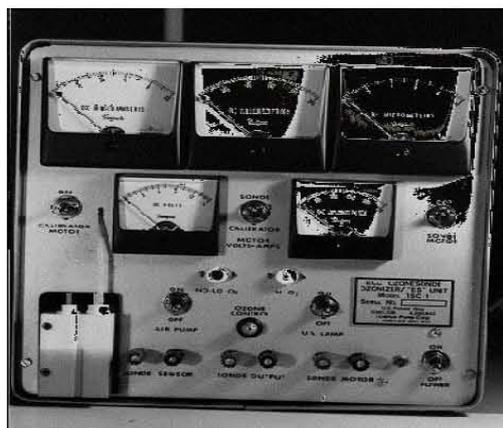


Figura 2.5 Calibrador de ozono

- La unidad ozonizadora y de comprobación TSC-1 que es utilizada para comprobar la corriente de fondo de la sonda y para el acondicionamiento de los sensores de ozono del tipo 6A ECC. Básicamente, la unidad ozonizadora consta de una fuente de generación de ozono, un sensor de ozono ECC (calibrador) y varios amperímetros para medir las corrientes de salida de los sensores de ozono, tanto del calibrador, como del que va a realizar el ozono sondeo (Figura 2.5).

- Un flujómetro para el cálculo del flujo de aire que aspira la bomba de la sonda.

- Un polímetro de alta precisión para medir la corriente de fondo de la sonda ECC.

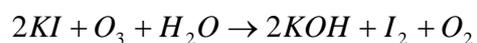
Los globos (Fig. 2.6) utilizados para ozono sondeos son de goma natural (de 1200 gramos), resistentes al frío y con gran capacidad de expansión, son de la marca TOTEX y se utilizan los especiales para bajas temperaturas (TX). El espesor normal del globo una vez inflado es de 0.05 a 0.1 mm, disminuyendo a 0.003 mm en la altitud donde se estalla. El diámetro del globo es de 1.8 metros durante el lanzamiento y de 5 a 10 metros antes de producirse la explosión. Debido a las bajas temperaturas que tienen que soportar son sometidos a un tratamiento de calentamiento especial a fin de formar una fina película protectora que cubra el globo contra los efectos de las bajas temperaturas. Esto se logra sumergiendo el globo en una mezcla de gasoil y aceite.

El posterior inflado de los globos se realiza con helio (99% de pureza) y se sujetan las demás partes del sistema para luego disponerse a ser enviado, teniendo las precauciones necesarias a la hora de inflar el globo y de llevar a cabo el lanzamiento (figura 2.6).



Figura 2.6 Lanzamiento del globo con la ozono sonda.

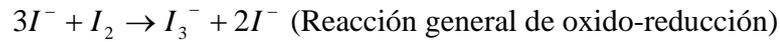
La ozono sonda ECC (Electrochemical Concentration Cell) consiste en dos cámaras de resina de teflón (material que no reacciona con el Ozono) en las que se introduce una solución de yoduro de potasio (KI) en distintas concentraciones. Las dos cámaras están unidas por un puente de iones y en cada una de ellas se halla sumergido un electrodo de platino. Durante el ascenso del globo sonda, una pequeña bomba movida por un motor alimentado por una batería introduce aire ambiental en el interior de la cámara con menor concentración de solución de KI. Tan pronto como el aire con contenido en ozono entra en esta cámara se produce la siguiente reacción química:



Dando lugar a las siguientes reacciones de oxido reducción así:

Cátodo: $3I^- \rightarrow I_3^- + 2e^-$ (oxidación de los iones I)

Ánodo: $I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$ (reducción del yodo)



Como resultado de esta cadena de reacciones se observa que por cada molécula de Ozono en el aire se produce un transporte de dos electrones del cátodo al ánodo.

$$k = \frac{(a)_{I_3^-} (a)_{I^-}^2}{(a)_{I_2} (a)_{I^-}^3} \quad \text{(Constante de equilibrio de la reacción de oxido-reducción)}$$

En el equilibrio $k=1$, pero en el momento en que moléculas de ozono comienzan a reaccionar con el yoduro de potasio, el equilibrio se rompe debido a la formación de I_2 y aparece una fuerza electromotriz (E) que provoca una corriente eléctrica entre el cátodo y el ánodo. Esta diferencia de potencial se puede deducir a partir de la ecuación de Nernst:

$$E \approx 0.02955 * \log \frac{(a)_{I_3^-} (a)_{I^-}^2}{(a)_{I_2} (a)_{I^-}^3}$$

La medida de la intensidad de la corriente en microamperios, nos permite conocer la cantidad de moléculas de ozono contenidas en el aire (Cuevas, et al, 1996).

Tomando en cuenta los datos arrojados por las ozono sondas y con base al método de medición explicado anteriormente, se trazaran los perfiles de ozono para cada día de medición en las cuatro estaciones con la intención de analizar las variaciones con respecto al promedio (todas las mediciones) y de esta manera encontrar los lugares a analizar y encontrar una posible influencia de los NOx provenientes de los relámpagos.

2.1.1 FUENTES DE DATOS IONS-06

La campaña *Intex Ozonesonde Network Study* (IONS-06), liderada por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y el Departamento de Meteorología de la Universidad de Pennsylvania, se llevo a cabo durante los meses de Agosto y Septiembre del 2006 en 23 localidades de Canadá, Estados Unidos, México y el Caribe, como se describe en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Descripción de los sitios de medición.

Sitio de Medición	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Elevación (m)	Persona Encargada
Barbados	13.16	-59.43	30	Sam Oltmans
México	19.42	-98.59	2272	Anne Thompson, Luis Ladino, Andres Hernandez
Ron Brown (Golfo de México)	29.24	-95.01	Nivel del mar	Daniel Wolf
Kelowna	49.94	-119.4	456	David Tarasick
Stony plain	53.55	-114.11	766	David Tarasick
Bratts Lake	50.2	-104.7	580	David Tarasick
Egbert	44.23	-79.78	251	David Tarasick
Sable	43.93	-60	4	David Tarasick
Walsingham	42.60	80.60	200	Trevor Carey-Smith
Yarmouth	43.87	-66.1	9	David Tarasick
Beltsville	39.0	76.5	24	Everette Joseph
Boulder	39.95	-105.20	1743	Bryan J. Johnson
Richland	46.00	119.00	124	Anne Thompson
Holtville	32.8	-115.4	-19	Robert Chatfield
Houston	29.70	-95.30	11	Gary A. Morris
Huntsville	34.72	-86.64	196	Mike Newchurch
Socorro	36.6	106.9	1402	Mavendra Dubey
Paradox	43.92	-73.64	284	Shermane Austin
Table Mountain	34.38	-117.68	2285	Thierry Leblanc
Narragansett	41.49	-71.42	21	John T. Merrill
Trinidad Head	40.80	-124.16	20	Bryan J. Johnson
Valparaíso	41.5	-87.0	248	Gary A. Morris
Wallops	37.93	-75.47	13	Francis J. Schmidlin

La figura 2.7, muestra la ubicación de cada uno de los lugares en círculos rojos y en círculos azules, los cuatros lugares de este estudio: (Barbados, Houston, México y Ron Brown), aunque cabe mencionar que el Barco Ron Brown tuvo varias coordenadas y en el mapa se ubicó las coordenadas promedio de los 34 días de mediciones en este punto.

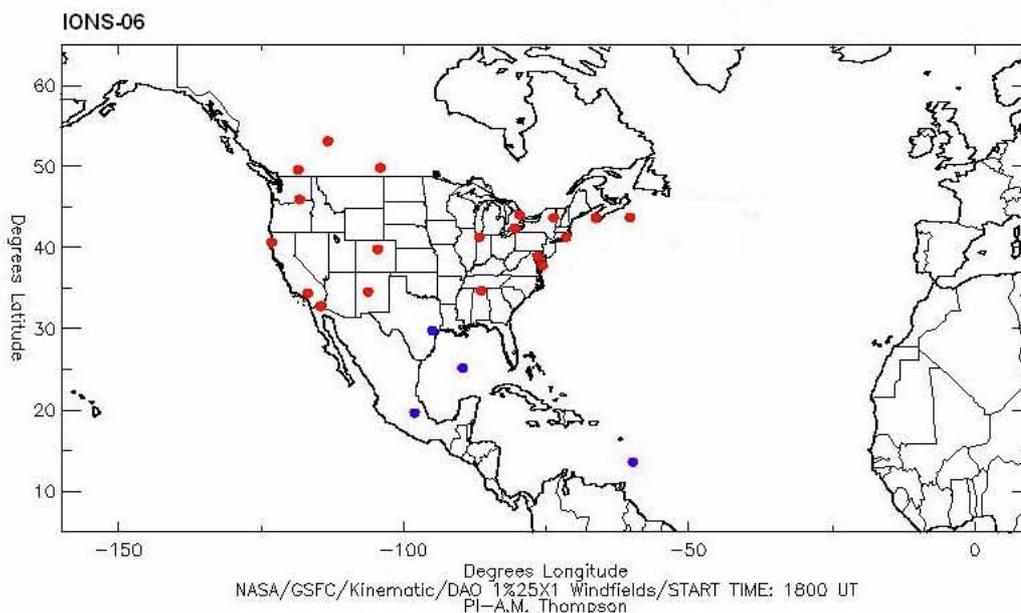


Figura 2.7. Lugares donde se realizo la campaña IONS-06 y lugares donde se llevo a cabo este estudio.

Durante los meses de Agosto y Septiembre se realizaron ozono sondeos en cada una de las ubicaciones; en México estos lanzamientos se realizaron por 21 días, mientras que en Barbados, Houston y Ron Brown, durante 23, 16 y 34 días respectivamente. Casi todos los lanzamientos se realizaron entre las 17 y 20 horas UT.

Cada lanzamiento generó un archivo con los siguientes datos: Tiempo (s), Presión (hPa), Altura (km), Temperatura (°C), Humedad Relativa (%), Concentración de O₃ (mPa), Concentración de O₃ (ppmv), Dirección del Viento (grados), Velocidad del Viento (m/s) y

Temperatura de la Bomba (°C), como se muestra en la figura 3.2 (Tanto la dirección y velocidad del viento solo se midieron en algunos lugares).

2.2. MEDICION DE LOS RELAMPAGOS

En la actualidad existen dos entidades a nivel mundial encargadas de la detección de relámpagos o descargas eléctricas y cada una posee su metodología e instrumentos. Los detectores del relámpago se pueden clasificar según tamaño, capacidad y localización y los métodos de la instalación. Hay cuatro categorías importantes de los detectores del relámpago y son los siguientes: Sistemas terrestres, sistemas móviles, sistemas espaciales y sistemas personales.

2.2.1 WWLLN (World Wide Lightning Location Network)

Las detecciones de relámpagos de la WWLLN se basan en el sistema terrestre. Esta variante utiliza antenas múltiples separadas por miles de kilómetros para detectar los pulsos de la radiofrecuencia que son producidos por un relámpago. Por esta razón, a menudo se llaman los detectores de RF (radiofrecuencia o ultra baja frecuencia, VLF).

Cuando un destello de relámpago ocurre, es detectado por las antenas en tierra. Puesto que las antenas se extienden por un área grande en la tierra, estas antenas se convierten en la base para la triangulación. Este sistema se asegura de que la posición exacta del flash del relámpago pueda ser establecida claramente. Los protocolos de radio de la goniometría dan al sistema la capacidad para determinar la severidad del flash del relámpago.

En este tipo de metodología las exactitudes de la localización son del orden de 1 km (variable según el lugar y número de estación que detecten la descarga) y la eficacia posible de la detección se acerca a 90 %. (*Harkov and Uman, 2003*).



Figura 2.8 Antena de detección de relámpagos del CCA

La Universidad de Washington en Seattle es quien administra esta red de sensores de localización de relámpagos con sensores en VLF (3-30 kilohertz). La mayoría de las observaciones terrestres en la banda VLF, son dominadas por señales impulsivas de descargas de relámpagos, llamadas “sferics”. La energía electromagnética irradiada va desde algunos pocos hertz a varios cientos de MHz, con un pico en el espectro de frecuencia entre 5 y 10 kHz.

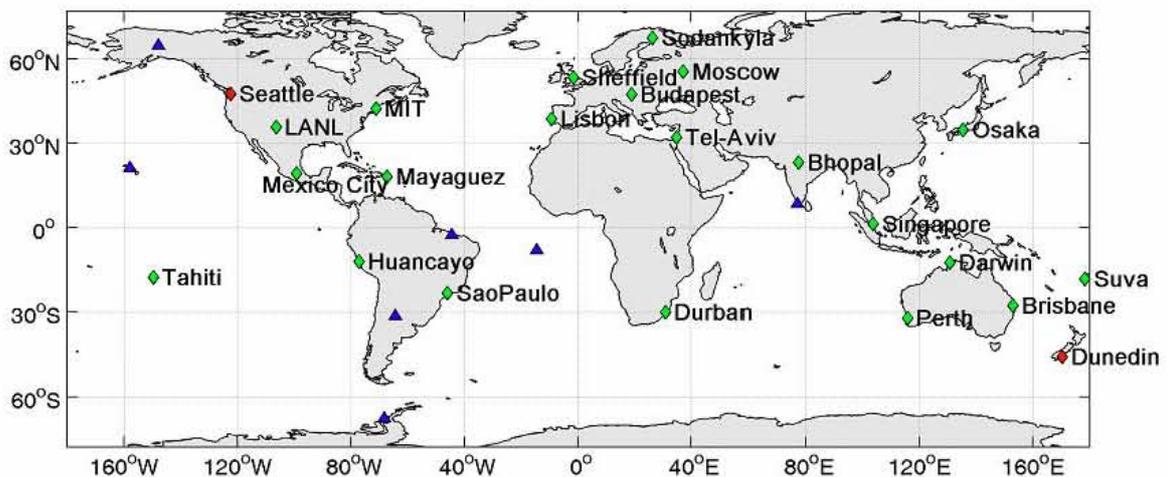


Figura 2.9 Mapa de la ubicación de las estaciones de medición de la WWLLN (WWLLN, 2007)

El profesor Robert Holzworth de la Universidad de Washington y el profesor Richard L. Dowden (de LF*M & Associations), producen los datos de la red con la cooperación de las universidades y de los institutos que reciben las señales (ver Tabla 2.2).

2.2.2 Fuentes de Datos de la WWLLN

Las coordenadas e intensidad de los relámpagos son detectadas por estaciones a nivel mundial, las cuales envían esta información a la WWLLN quien colecta toda esta información y la distribuye mes por mes. Esta red esta conformada por 30 estaciones receptoras; su lugar de ubicación y coordenadas se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ubicación de las antenas de la red WWLL

Antena	Ubicación		Lugar
	Latitud (N)	Longitud (E)	
Ascensión Is.	-8.0	-14.4	British Geological Survey and BAS
Boston	42.4	-71.1	Massachusetts Institute of Technology
Brisbane	-27.6	153.1	Griffith University, Brisbane
Budapest	47.5	19.1	Eotvos Lorand University
Cordoba	-31.4	-64.2	Universidad Nacional de Cordoba (Argentina)
Darwin	13.4	130.9	Charles Darwin University (Australia)
Dunedin	-45.9	170.5	University of Otago/Te Whare Wānanga o Otāgo (New Zealand)
Durban	-29.9	31.0	University of KwaZulu-Natal (South Africa)
Finland	67.4	26.4	SodankylÄ Geophysical Observatorya, SodankylÄ, Finland

Hermanus	-29.4	30.3	Hermanus Magnetic Observatory and University of KwaZulu-Natal (South Africa)
Honolulu	21.3	-157.8	University of Hawaii at Manoa
Huancayo	-12.1	-75.3	Instituto de Geofísica del Perú
Kingston and Davis	-43.0	147.3	Australian Antarctic Division
Lanzhou	36.0	103.9	Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Insitute, Chinese Academy of Sciences
Lisboa	38.8	-9.1	Portugal Meteorological Institute
Los Alamos	35.9	-106.3	Los Alamos National Laboratory
México	19.3	-99.2	Universidad Nacional Autónoma de México
Moscu	55.5	37.3	Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation (ISMIRAN)
Osaka	34.8	135.5	Ōsaka University
Perth	-32.1	115.8	Murdoch University, Perth
Puerto Rico	18.2	-67.1	University of Puerto Rico, Mayaguez
Rothera	-67.6	-68.1	British Antarctic Survey
Sao Paulo	-23.2	-45.9	INPE (Brazilian National Institute for Space Research)
Seattle	47.7	-122.3	University of Washington
Sheffield	53.4	-1.5	University of Sheffield
Singapore	1.3	103.8	National University of Singapore
Suva	-18.1	178.4	University of the South Pacific (Fiji)
Tahiti	-17.6	-149.6	Universite de la Polynesie Francaise
Tel Aviv	32.1	34.8	Tel Aviv University
Trivandrum	8.3	76.5	Centre for Earth Science Studies (India)

La recepción de la señal se lleva acabo por medio de una antena ubicada en los sitios mencionados anteriormente, la cual cuenta con un receptor relativamente sencillo, el cual

detecta descargas tan lejanas como 10.000 kilómetros. Para que la ubicación de una descarga sea precisa y confiable, es necesaria que sea detectada por mínimo 5 estaciones de las 30 existentes. (Dowden, et al. 2002).

Debido a que la Universidad Nacional Autónoma de México pertenece a la WWLLN, cada mes el Centro de Ciencias de la Atmósfera a través de la Dra. Graciela Binimelis de Raga recibe un CD con la información sobre las localizaciones de las descargas eléctricas en el mundo entero. Cada CD contiene la ubicación de la descarga (latitud, longitud), tiempo (hora, minutos y segundos) e intensidad de la descarga, así el como número de estaciones que la detectaron.

2.3 TRAYECTORIA DE LAS MASAS DE AIRE

En nuestro estudio las trayectorias de las masas de aire fueron estimadas con el modelo *Hysplit* de Nacional *Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA). Las corridas se llevaron a cabo para las fechas, hora y coordenadas de cada ozono sondeo en el sitio Web de la NOAA.

Estas corridas se efectuaron para cada lanzamiento a tres diferentes alturas, 18 horas antes de cada uno de los lanzamientos de las ozono sondas. Las tres alturas fueron definidas según cada uno de los perfiles de ozono mostrados en la figura 3.4; para cada perfil diario se realizó un mínimo de una corrida y un máximo de 3 con el *Hysplit*.

En 1997 se desarrolló un sistema basado en la WWW denominado READY (*Real-time Environmental Applications and Display*) con objeto de acceder a datos meteorológicos y ejecutar modelos de trayectorias y dispersión en el servidor ARL (*Air Resource Laboratory*) del NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). En la actualidad hay dos modelos de dispersión en línea dentro de READY:

- a) HYSPLIT: *Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*.

b) VAFTAD: *Volcanic Ash Forecast Transport and Dispersion*.

Ambos modelos se pueden ejecutar para cualquier localización del mundo usando pronósticos y datos meteorológicos archivados, los cuales han sido recuperados del NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) de NOAA. El modelo HYSPLIT es un sistema complejo que ejecuta trayectorias de sectores de aire simples y simulaciones de depósito y dispersión complejas. Entre las últimas novedades en relación al modelo original se encuentran:

- Algoritmos de advección.
- Ecuaciones de dispersión y estabilidad actualizadas.
- Nuevo interfase gráfico y módulo de transformaciones químicas.

HYSPLIT sin los módulos de dispersión adicional, computa la advección de una partícula simple o bien su trayectoria. En la versión inicial de 1982 se usó solamente observaciones de radiosonda, y la dispersión fue asumida como una mezcla uniforme durante el día y sin mezcla durante la noche. En 1988 se introdujo una extensión variable de la mezcla basada en perfiles de difusividad variando tanto espacial como temporalmente.

HYSPLIT3 fue introducido en 1992. En este modelo la radiosonda fue modificada por una red meteorológica con pronósticos a corto tiempo a partir de modelos de predicción numérico en rutina.

HYSPLIT4 actualiza los algoritmos para estabilidad y mezcla y es capaz de manejar múltiples datos meteorológicos y medidas de concentración de aire. El modelo de cálculo es híbrido entre aproximaciones Eulerianas y Langragianas. Los cálculos de advección y difusión se hacen bajo un entorno langragiano mientras que las concentraciones se calculan sobre una retícula fija.

La última versión de HYSPLIT realiza un amplio rango de simulaciones relacionada con el transporte a gran escala, dispersión y depósito de contaminantes.

Las aplicaciones de HYSPLIT4 son varias, desde responder a emergencias atmosféricas (accidentes radiológicos, erupciones volcánicas, etc.), o rutinarias como controles ambientales asociados a emisiones de contaminantes atmosféricos (por ejemplo partículas atmosféricas). Las simulaciones pueden variar desde trayectorias simples a patrones de contorno de concentración de aire.

2.4 INCERTIDUMBRES

A continuación se describen cada uno de los posibles errores e incertidumbres en las mediciones de los datos utilizados en este estudio.

2.4.1 Mediciones con las ozono sondas

En las mediciones de ozono, las incertidumbres se generaron a partir de los datos de cada una de las ozono sondas, calculando las desviaciones estándar en dichas mediciones.

Tabla 2.3 Resumen de las desviaciones estándar en las ozono sondas

Variable	Rango de Medida	Resolución	Desviación Estándar
Presión	1060- 3 hPa	0.1 hPa	± 0.5 hPa
Temperatura	+ 60 a -90 °C	0.1 °C	± 0.2 °C
Humedad	0 a 100%	1 %	± 2%

Estudios realizados por *Thompson, et al (2007)* indican que las ozono sondas tienen una precisión entre 5-10% en la troposfera, con una reproducibilidad de los ozono sondeos entre 5-7% y una frecuencia de 1.2 segundos⁻¹.

2.4.2 Medición de los relámpagos

- Rango de frecuencia de detección (VLF): 0 a 24 kHz

- Exactitud de la localización de los relámpagos: 01 a 15 km, es decir con una precisión entre el 80- 90% (Berile, 2005)
- Exactitud del tiempo del relámpago: < 30 μ s
- Umbral de la detección: 5 al 10% de todos los relámpagos con picos de corriente mayores a aproximadamente 45 kA

Rodge; et al (2006) encontró que la eficacia promedio máxima de detección de la WWLLN es del 23%, extendiéndose al 50% en sectores del continente marítimo (80 - 180 E) y puede reducirse hasta el 7% en los sectores con longitudes en América (130 - 40 W). También encontró que las eficacias de las detecciones en América son más bajas de lo que se esperaba, debido a la poca densidad de estaciones en esta área, aunque debido al incremento de estaciones en los últimos años ha mejorado.

2.4.3 Trayectorias del aire

Una trayectoria es la integración en el tiempo de la posición de una parcela de aire que es transportada por el viento. El transporte pasivo de la parcela por los vientos se computa del promedio de los vectores tridimensionales de la velocidad en la posición inicial $P(t)$ de la partícula y su primera suposición de la posición $P'(t+dt)$. Los vectores de la velocidad se interpolan en espacio y tiempo.

La primera posición de la suposición es

$$P'(t + dt) = P(t) + V(P,t) dt,$$

y la posición final es:

$$P(t + dt) = P(t) + 0.5 [V(P,t) + V(P',t+dt)] dt$$

La trayectoria se puede integrar adelante y al revés en el tiempo. Una medida del error de la integración puede ser obtenida computando una trayectoria posterior y luego trazando esta misma trayectoria hacia delante. La diferencia entre el punto de inicio y el final, representa un error cercano al 2%.

CAPITULO III

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 MANEJO DE DATOS

Después de tratar los datos obtenidos de la campaña IONS-06 para los cuatro sitios de estudio: Barbados, Houston, México y Golfo de México, se trazaron los perfiles de ozono día por día para cada una de las estaciones mencionadas anteriormente como se muestra en la figura 3.1:

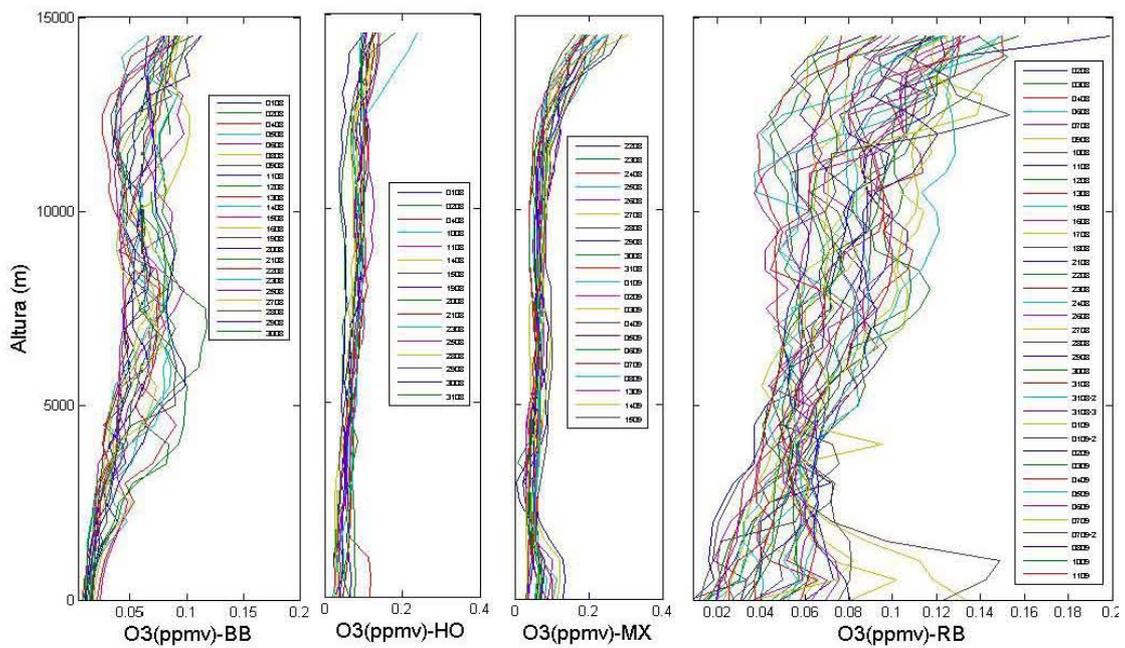


Figura 3.1 Perfiles de ozono para cada uno de los cuatro lugares de medición durante los días de estudio.

Tomando en cuenta las temperaturas, presiones y humedades relativas obtenidas por la ozono sonda para cada lanzamiento, se calculó la humedad específica y la temperatura potencial para determinar la profundidad de la capa límite (CL) y la altura de la tropopausa (TP) en cada una de las estaciones.

$$\text{Temperatura Potencial} = \theta = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \left(\frac{1013}{P(\text{hPa})} \right)^{0.286}$$

$$\text{Humedad Especifica} = q_v = (HR) \cdot (q_{sv}) = (HR) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{P} e_s T \right)$$

$$\text{Donde, } e_s = (611.2) \cdot \exp \left[\frac{(16.76)T}{T + 243.5} \right]$$

$$\varepsilon = 0.6222$$

Como se mostró en la tabla 2.1, los cuatro lugares poseen elevaciones diferentes sobre el nivel del mar; en todos los cálculos y determinaciones de este estudio, a las alturas utilizadas se les restó la elevación que poseen para que todas iniciaran a la misma altura y de esta manera poder ser comparables. Tomando los datos calculados de θ y q_v , se trazaron las gráficas de θ vs. Altura y de q_v vs. Altura, con el ánimo de determinar las profundidades de la CL. Los gráficos de Temperatura vs. Altura permiten determinar la altura de la tropopausa.

Cabe mencionar que la altura promedio a la que se sitúa la tropopausa es variable, desde los 16Km en el ecuador a los 8Km en los polos; además, existen variaciones de altura ligadas a la temperatura y presión en superficie. La tropopausa está más alta cuanto más baja es la presión en superficie y/o cuanto más alta es la temperatura en superficie, climatológicamente hablando.

Realizados estos cálculos y trazados los gráficos encontramos la profundidad de la capa límite, así como la altura de la tropopausa para cada día de medición en cada una de las cuatro estaciones. La tabla 3.1 nos muestra los resultados promedios obtenidos:

Tabla 3.1. Resumen de las alturas promedio de la capa limite y Tropopausa en cada estación.

<i>Lugar / Variable</i>	<i>Profundidad Promedio Capa Limite (m)</i>	<i>Altura Promedio Tropopausa (m)</i>
BARBADOS	425 ± 147	16931 ± 363
HOUSTON	829 ± 346	16570 ± 896
MEXICO	876 ± 314	16263 ± 628
RONBROWN	632 ± 249	16520 ± 638

En la anterior tabla, encontramos que México y Houston tiene los mayores valores de profundidad de CL, mientras que Barbados y Ron Brown los de menor magnitud. Esto se puede atribuir a la geografía de cada lugar y la turbulencia generada en cada uno de ellos. Tanto Barbados como Ron Brown son lugares muy cercanos al mar, lo cual no es muy apto para la generación de turbulencia debido a la menor capacidad calorífica que sobre los continentes.

Por el contrario, México al poseer una geografía montañosa y múltiples edificaciones dentro de la ciudad es muy propensa a la generación de turbulencia. Asimismo, la ciudad se encuentra a una elevación de 2272m y una ubicación continental, por lo cual esta expuesta a percibir una mayor radiación solar comparado con los otros tres lugares que están muy cerca al nivel de mar.

Houston presenta la segunda mayor profundidad de la capa de mezcla; la geografía de esta ciudad no es tan montañosa como en la ciudad de México, pero si posee una cantidad significativa de edificaciones de gran tamaño, las cuales también ayudan al calentamiento del aire y generación de turbulencia.

Posterior a ello, se trazaron los perfiles de ozono promedio con el fin de ver las variaciones y tendencia en cada una de las estaciones y encontrar las posibles ubicaciones o lugares que pudieron ser afectados por las descargas eléctricas, debido a su intensidad o frecuencia en los alrededores de estas estaciones. Teniendo en cuenta la hipótesis planteada en el Capítulo I, en caso de encontrar algún aumento significativo o alguna pequeña variación positiva en la concentración de ozono, se determinará si esta es debida a los NOx provenientes de los relámpagos o de alguna fuente diferente a esta.

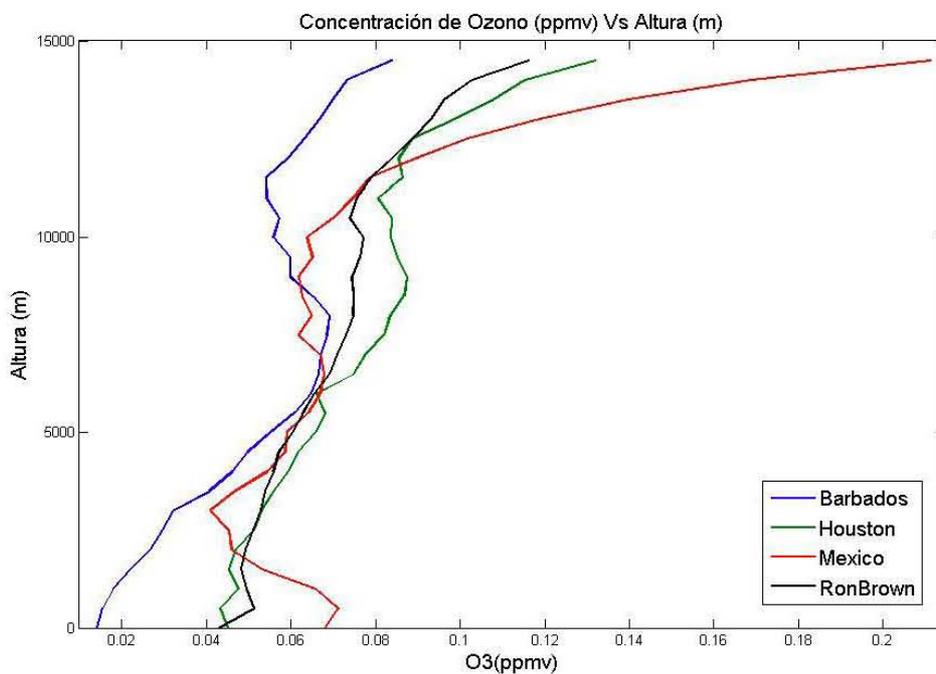


Figura 3.2 *Perfiles de ozono promedio para cada uno de los cuatro lugares de medición durante los meses de Agosto y Septiembre del 2006 respecto a la altura*

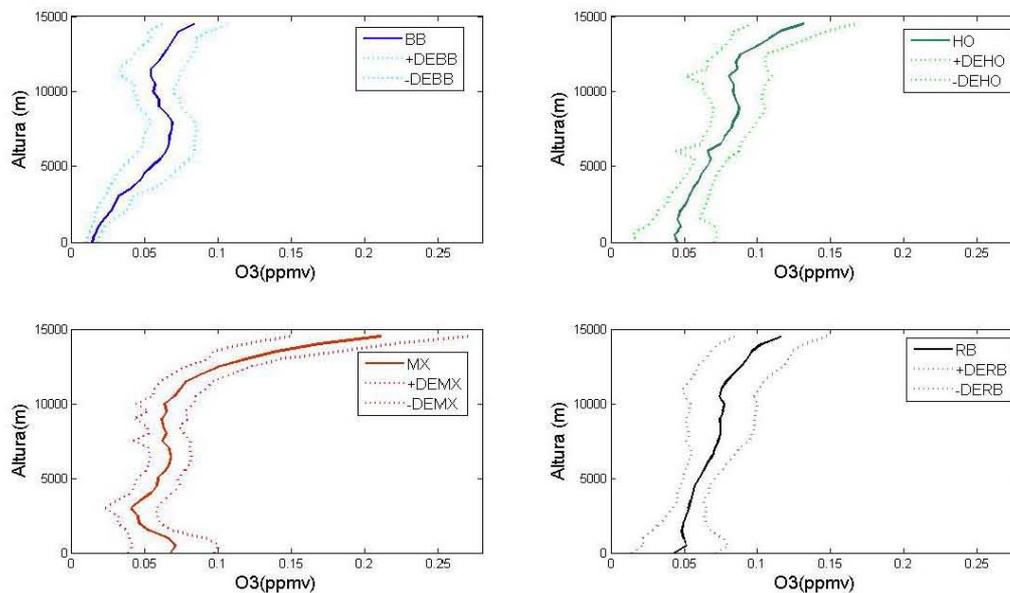


Figura 3.3 *Perfiles de ozono promedio con sus respectivas desviaciones estándar*

Observando las figuras 3.2 y 3.3, encontramos que México posee las mayores concentraciones de ozono a nivel superficial respecto a los demás lugares, lo cual muestra los grandes niveles de contaminación que allí se experimentan. Cerca de la tropopausa, la concentración de ozono aumenta drásticamente mostrando que a esa altura ya se está entrando en la baja estratosfera, siendo esto ratificado por los valores mostrados en la tabla 3.1.

Las alturas promedio de la tropopausa registradas en la tabla 3.1 incluyen la elevación de cada uno de los lugares de medición, mientras que las figuras 3.2 y 3.3 no, ya que se encuentran normalizadas a la superficie.

Barbados es la estación que presenta menores concentraciones de ozono a lo largo de toda la vertical excepto a la altura de 8000 m, donde experimenta un aumento de ozono y tan solo es sobrepasado por México quien presenta concentraciones más bajas.

Tanto Houston como Ron Brown, muestran valores similares en algunas alturas, quizá debido a la cercanía a la cual se realizaron los lanzamientos de las sondas de ozono, pero a medida que se avanza en la vertical los perfiles toman diferentes rumbos. Entre los 7000 y 10.000 m Houston tiene un gran incremento en el perfil, alejándose de Ron Brown y por encima de los 13.000 m mantienen un comportamiento muy similar.

Con los datos obtenidos de la WWLL para los meses de medición y después de hacer una depuración para el área de estudio (Latitud: desde 8° hasta 38°, Longitud: desde -50° hasta -110°), se trazó un gráfico con el objetivo de ver la frecuencia de relámpagos alrededor de los cuatro sitios de estudio. La figura 3.4 nos muestra que México es el lugar con mayor actividad de relámpagos en sus alrededores en esta época del año, seguido por Houston y Ron Brown (Golfo de México), mientras que Barbados experimenta la menor actividad.

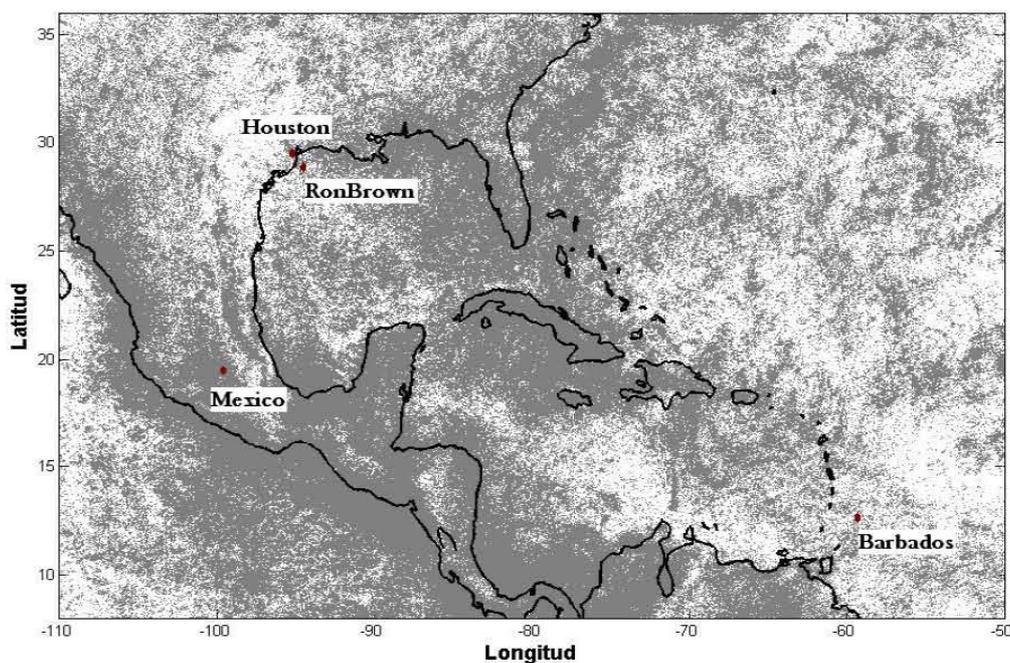


Figura 3.4 Frecuencia de las descargas eléctricas en los alrededores de los cuatro puntos de medición durante el periodo de estudio.

La frecuencia en cada uno de los alrededores de los cuatro sitios de estudio es directamente proporcional al número de puntos grises (cada uno es un relámpago).

3.2 COMPARACIÓN OZONO – RELAMPAGOS (Datos IONS-06)

Algunos estudios realizados muestran que NO_x producidos por los relámpagos tiene una gran correlación con el ozono troposférico (*Beirle, et al, 2003*). *Beirle (2005)*, encontró que la producción de NO_x de los relámpagos es del orden de 1.5 [N] Tg /año , y *Bacher; et al. (2005)* que la correlación entre NO_2 y ozono están entre el 15 y el 20% dependiendo de la altitud.

Como se mencionó en el capítulo II, en nuestro estudio las trayectorias de las masas de aire se calcularon con el modelo Hysplit. La figura 3.5 muestra un ejemplo del trazo de las trayectorias 18 horas antes del lanzamiento de la ozono sonda, y como a lo largo de ella, pudieron coincidir sus coordenadas con las de los relámpagos.

Con todos los archivos del Hysplit y de la WWLL, se trazaron unos índices de tiempo, latitud y longitud, con el fin de poder tener datos comparables o de dimensiones y magnitudes semejantes, para luego poder realizar comparaciones directas entre estas dos componentes y de esta manera encontrar en que punto coincidían ambos.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 19 UTC 27 Aug 06
 FNL Meteorological Data

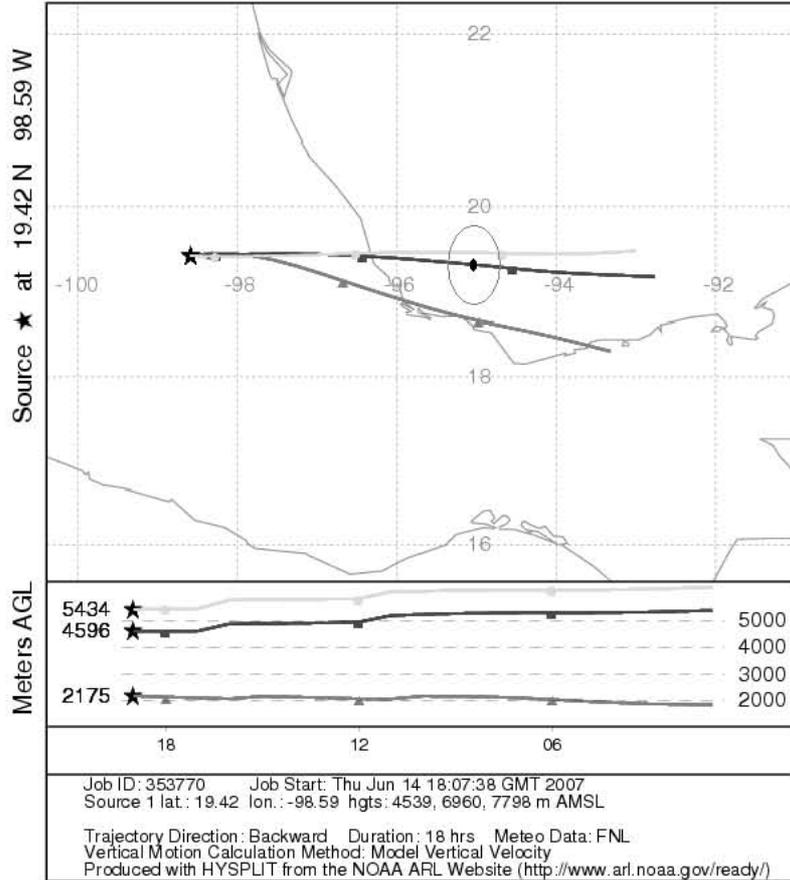


Figura 3.5. Trayectoria de los vientos a tres alturas diferentes, tomada de Hysplit para México el día 01 de septiembre del 2006, 18 horas antes iniciando a las 19UTC.

La figura 3.5 muestra como para ese día en México, hubo la coincidencia de dos relámpagos sobre las trayectorias trazadas con el Hysplit. Estos dos puntos son de color negro y se encuentran en las coordenadas aproximadas de: (19, -96) y (19.5, -95.6), las coincidencias están encerradas por la elipse roja.

3.2.1 Barbados (BB)

En cada punto se determinó el incremento o disminución de la diferencia entre las mediciones diarias de ozono y el ozono promedio para cada estación, sobre la desviación estándar para ese mismo punto ($\Delta O_3 / DE$), con el objetivo de observar en que proporción variaba la diferencia entre las mediciones de ozono diario y el promedio todos los días de medición en cada estación; este valor es dividido sobre las desviación estándar con el fin de incluir las variaciones al momento de determinar los promedios.

La tabla 3.2 muestra los días en los que ocurrieron relámpagos, así como la distancia, ubicación y hora de detección de los mismos. Además de lo anteriormente mencionado, también se registran los picos de ozono que se encontraron en los perfiles trazados y los valores de $\Delta O_3 / DE$ para cada uno de ellos.

En los casos que coincidieron los relámpagos con las masas de aire, se determinó a cuantos kilómetros de distancia ocurrió, así como si el relámpago cayó sobre mar o tierra y el número de horas antes del lanzamiento de la ozono sonda en que se detectó (H.A.L.)

Tabla 3.2 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en Barbados (BB) día por día.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico (m)	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
01	1.183	2000	0				
	0.2474	9000					
	0.2853	10000					
02	0.3951	7000	0				
	0.8184	8000					
	0.4064	10000					
04	2.208	1000	0				
	2.156	2500					
05	1.181	2000	0				
	2.022	5500					
06	0.6876	7500	0				

	0.9762	11500						
08	0.05701	8000	13	5	13	0	260 (4)	
	0.2930	9000		13				
	0.7807	13500		11			205 (6)	
				18			39 (1)	
							303 (2)	
09	0.2851	2000	7	6	7	0	50 (4)	
	0.1782	3000		5			103 (3)	
11	0.6049	1000	0					
	0.6853	11500						
12	2.660	3500	0					
	2.823	7500						
13	-0.1554	14000	12	13	12	0	269 (10)	
							322 (2)	
14	1.28	11000	0					
	1.324	13000						
15	1.894	8000	0					
	2.341	10000						
16	1.527	8500	0					
	1.757	10500						
19	0.5858	1500	0					
	1.018	13000						
20	0.2311	9000	0					
	2.082	13500						
21	0.01881	4500	3	5	3	0	161 (3)	
	1.421	8500		18				
22	0.7585	4500	6	1	1	5	1033 (1)	
	0.3862	8000		18			19 (5)	
23	1.126	5000	0					
	1.063	6500						
25	2.646	500	0					
	1.719	2500						
27	2.01	2500	0					
	2.053	12000						
28	0.3667	500	0					
	1.722	5000						
29	1.821	5500	0					
	1.91	9000						
30	2.613	3000	0					

De los 23 días de mediciones en Barbados encontramos que los relámpagos y las trayectorias de las masas de aire coincidieron en cinco de ellos. El total de eventos (relámpagos) detectados fue de 41, con una cercanía de 19 km (1 hora antes de los ozono sondeo) para el más próximo y de 1033 km (18 horas antes del ozono sondeo) el más lejano; 36 de los relámpagos cayeron en el mar, mientras que los cinco restantes cayeron en el área continental de BB.

Para cada uno de los días de medición se trazaron los perfiles verticales de ozono, además del perfil promedio y la diferencia entre ellos, así como los *back-trajectory* tomados del Hysplit y los relámpagos en sus alrededores (Ver Apéndice I).

3.2.2 Houston (HO)

Al igual que en Barbados se realizó un estudio para cada uno de los días de medición en esta estación, encontrando que de los 16 días de mediciones en Houston, en cuatro de ellos encontramos que los relámpagos coincidieron con las trayectorias de las masas de aire. A continuación en la tabla 3.3 se muestran los resultados del análisis diario entre los relámpagos y las variaciones de ozono.

Tabla 3.3 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en Houston (HO) día por día.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
01	0.2348	6500	5	1	0	5	30 (4)

	0.4505	7500						84 (1)
	0.7894	8500						
	1.929	11500						
02	1.174	3000	0					
	0.7824	6500						
	0.4975	9500						
04	2.853	1000	0					
	0.9296	6000						
	1.051	8500						
	1.135	11500						
10	0.3815	3500	19	18	0	19		438 (1)
	0.5956	6500						416 (12)
	0.6511	12000		17				452 (6)
11	0.1778	2500	0					
	0.5554	6000						
	0.5392	7500						
	0.5018	11000						
14	0.09488	6000	0					
	0.1168	11000						
	0.5162	14000						
15	0.321	4500	0					
	0.354	6000						
	0.3196	7500						
	0.8199	13500						
19	0.5469	5000	12	8	9	3		136 (4)
								38 (3)
	0.5669	8500		5				86 (1)
								188 (3)
	0.4912	11500		2				343 (1)
20	2.073	2000	0					
	1.207	6500						
	1.089	12000						
21	1.297	2000	0					
	1.388	5500						
	1.729	8000						

	1.008	12500					
23	1.239	3000	13	18	0	13	350 (1)
	1.613	5000		3			46 (8)
	0.8351	8000		2			38 (4)
25	0.9349	3500	0				
	2.133	10000					
	1.583	12000					
28	0.4668	13500	0				
29	0.7043	10000	0				
30	1.037	2000	0				
31	1.143	1500	0				
	2.171	4000					

Como se mencionó anteriormente en sólo cuatro días de las mediciones en HO los relámpagos cayeron sobre las trayectorias de las masas de aire, encontrando un total de 49 eventos comparado con los 41 en BB en cinco días. Contrario a BB, en HO 40 de los 49 relámpagos cayeron en tierra, mientras que tan solo nueve en el mar. El relámpago mas cercano cayo a 30 km (una hora antes del lanzamiento de la ozono sonda) de la estación de medición, mientras que el más lejano fue detectado a 452km (18 horas antes del ozono sondeo). En el apéndice II se muestran los soportes gráficos de los resultados mostrados en la tabla anterior.

3.2.3 México (MX)

La tabla 3.4 resume las estadísticas de la estación de México de la misma manera como se realizó anteriormente en BB y HO.

Tabla 3.4 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en México (MX) día por día.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)		
					Mar	Tierra			
22	2.804	1500	0						
	1.778	4500							
	0.9218	8000							
	1.822	11000							
	1.720	14000							
23	0.3252	9500	0						
	1.352	14000							
24	0.749	2500	0						
	0.5928	10000							
	1.656	13000							
25	0.8028	4000	1	2	0	1	90(1)		
	0.5826	7000							
	0.7907	11000							
	1.928	13000							
26	0.07447	3000	0						
	0.1254	12500							
27	2.166	1000	2	12	2	0	337 (2)		
	2.206	6500							
	1.366	12000							
28	2.281	4000	50	12	31	19	283(18)		
	2.468	6000						17	337 (16)
	2.791	8000						10	613 (1)
	1.484	13000							333 (15)
29	0.5728	1000	9	13	0	9	283 (9)		
	0.746	4000						12	
	1.727	7000							
	1.081	12500							
30	0.01659	500	0						
31	-0.1913	13500	0						
901	1.24	3500	0						
	0.6746	7500							
902	1.346	1000	0						

	1.471	8500						
	2.095	11500						
903	0.4772	3000	13	18	0	13	283 (9)	
	1.098	8000		15			178 (1)	
	1.525	11000		14			230 (3)	
904	0.2385	1500	0					
	0.2707	13500						
905	0.797	2000	0					
	0.3821	12000						
906	0.7361	3000	1	18	0	1	134 (1)	
	0.8131	5000						
	1.282	9500						
907	1.123	2500	0					
	0.9636	4500						
	0.2117	10000						
908	1.407	500	0					
	1.032	3500						
913	0.656	9500	0					
914	0.486	10000	0					
915	0.29	9000	18	18	0	18	200 (14)	
	0.4237	10000		16			178 (2)	
				15			225 (1)	
							168 (1)	

En México se realizaron 21 lanzamientos de ozono sondas (uno diario) y en siete de ellos hubo coincidencias entre las trayectorias trazadas mediante el Hysplit y los relámpagos, los cuales se ven claramente en los gráficos ilustrados en el Apéndice III; con un total de 94 eventos de los cuales 61 cayeron en tierra y los otros 33 en el mar. Como se puede ver claramente MX tuvo mucha más actividad que BB y HO. En la tabla 3.6 encontramos que el relámpago que más cerca cayó de MX se detectó dos horas antes del lanzamiento de la ozono sonda a 90km y a 17 horas el más lejano a 613km.

3.2.4 Ron Brown (RB)

De las cuatro estaciones de estudio, RB fue en la que mas lanzamientos de ozono sondas se realizaron. Estos 34 lanzamientos se llevaron a cabo en diferentes ubicaciones del Golfo de México. En la tabla 3.5 se muestra un resumen de los datos encontrados para este punto y en el Apéndice IV se observan los gráficos diarios.

Tabla 3.5 Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en Ron Brown (RB) día por día.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
02	1.579	3000	0				
	1.71	6000					
	1.371	9000					
03	2.087	5000	0				
	1.58	8000					
	1.282	10500					
04	1.683	6500	0				
	1.497	9000					
	1.45	11000					
06	1.247	3500	98	18	51	47	267(10)
				17			78(4)
	2.145	5000		14			531 (4)
				7			557 (11)
	0.544	12500		6			492 (2)
		5	120 (37)				
							417 (26)
							455 (4)
07	0.2435	6000	1	13	1	0	238 (1)
	0.5849	7500					
	0.4661	9500					
	0.607	13500					
09	2.046	7000	0				

	1.597	10000						
	1.511	11500						
10	1.304	10500	0					
11	0.9896	6000	0					
	0.7909	11000						
12	2.004	8000	0					
	1.655	14000						
13	0.9123	10000	0					
	1.596	14000						
15	0.7508	4500	0					
	0.7361	7500						
	1.266	11000						
16	1.007	7000	0					
	1.021	9000						
	0.7925	14000						
17	1.746	500	0					
	1.565	10500						
18	1.749	3000	0					
	0.9783	10000						
21	1.2	3500	0					
	1.953	6500						
	0.9264	12500						
22	0.8973	5000	0					
	0.8596	11500						
	0.9512	13000						
23	1.64	5500	34	18	28	6	265 (18)	
	1.081	8500		8			329 (2)	
	0.9619	10000		7			281(8)	
							599(6)	
24	1.945	9500	0					
	1.937	11500						
26	0.2957	3500	4	11	3	1	208 (1)	
				9			133 (2)	
				8			29 (1)	
	0.5345	12500		5				

27	0.402	9000	1	3	0	1	29 (1)
28	0.8685	13000	0				
29	1.399	11500	0				
30	0.77	2000	0				
31	1.169	2500	0				
901	3.613	3000	0				
	0.5698	10500					
902	1.091	2000	0				
	0.3363	10500					
903	0.4003	1500	0				
	0.08302	9000					
904	0.8997	1500	0				
	0.2924	7000					
905	0.7089	2500	0				
906	0.7652	4500	0				
	0.8087	12000					
907	1.188	1000	0				
	0.6449	5500					
	1.672	13000					
908	1.161	2500	0				
	1.154	3500					
910	-0.1523	15000	5	18	0	5	778 (1)
				17			726 (4)
911	-0.229	2000	12	18	9	3	27 (9)
				5			607(3)

Como se mencionó anteriormente en MX coincidieron 94 relámpagos, mientras que en RB este número fue más elevado, llegando a un total de 155 eventos en siete días; de los cuales 92 se cayeron en el mar y los demás en tierra. Con lo anterior se conforma la gran actividad de fenómenos eléctricos en el Golfo de México y como las descargas que allí ocurren pueden afectar a la Ciudad de México en los niveles de ozono y algunas grandes ciudades de Estados Unidos, según las trayectorias de las masas de aire.

3.3 RESULTADOS ENTRE OZONO Y LOS RELAMPAGOS (Datos IONS-06)

Con el fin de interpretar directamente si existe o no una correlación entre los relámpagos y el ozono troposférico, se propusieron tres posibles casos y en cada uno de ellos cuatro posibilidades.

En el caso (a) se analizaron los datos cuando los valores ($\Delta O_3 / DE$) fueron mayores o menores que cero y si hubo o no coincidencias con los relámpagos, teniendo una probabilidad de un 50% que un evento cayera dentro del área bajo la curva de la distribución Gaussiana. El caso (b) fue para valores de ($\Delta O_3 / DE$) mayores o menores que 0.5 con una probabilidad del 62% y para el caso (c) se considero una probabilidad de 32% con los valores de ($\Delta O_3 / DE$) mayores o menores a 1.0.

En la tabla 3.6 se resumen los valores para el caso (a), mostrando en cuantos de los 94 días de estudio los valores de $\Delta O_3 / DE$ son mayores o menores que cero y su relación con los relámpagos.

Tabla 3.6 Caso (a) con datos IONS-06

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0$	$\Delta O_3 / DE < 0$
4, 4, 7, 5,	1, 2
Total= 20 días	Total = 3 días
(iii) No relámpagos	(iv) No relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0$	$\Delta O_3 / DE < 0$
18, 12, 13, 27	1
Total= 70 días	Total = 1 días
Barbados Houston	Mexico Ron Brown

En el caso (a) se encontró que en 20 de los 94 días de estudio hubo un aumento en los niveles de ozono y al mismo tiempo hubo coincidencia de los relámpagos con las trayectorias de las masas de aire, siendo MX el lugar con mayor número de días tipo (i). La figura 3.6 muestra un ejemplo de un día tipo (i) para el caso (a).

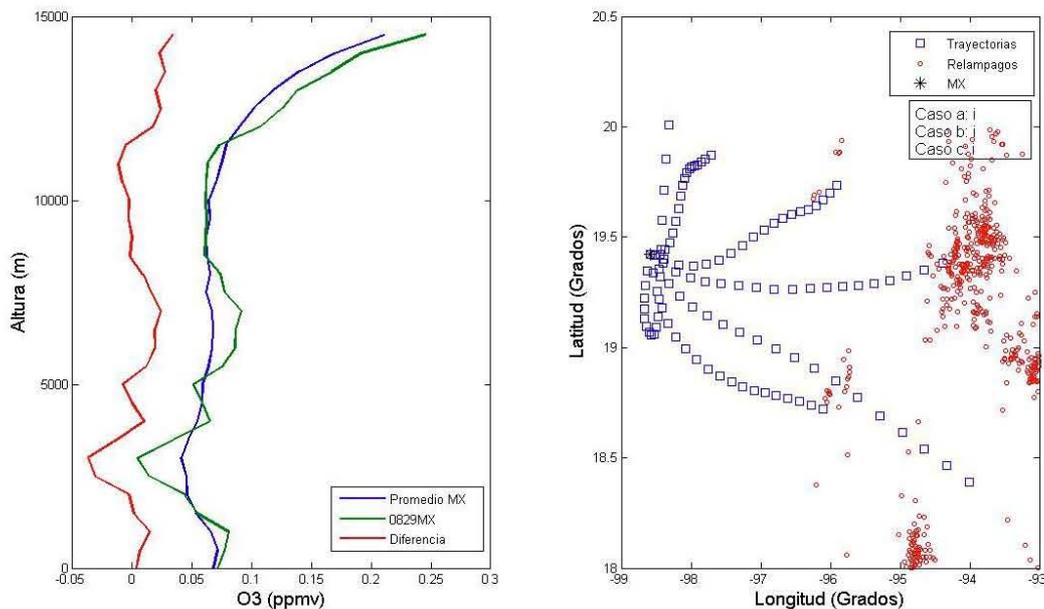


Figura 3.6 *Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.). Ejemplo para el Caso (a) tipo (i)*

Claramente podemos observar en el gráfico de la derecha de la Figura 3.6 como los relámpagos coincidieron con las trayectorias de las masas de aire y en el gráfico de la izquierda aumentos positivos en los perfiles de ozono a mitad de la troposfera (6-7 km). Estos aumentos de ozono se atribuyen al transporte de ozono de un lugar a otro o transporte de ozono por advección.

En contraste se encontraron 70 días donde también hubo aumentos de ozono, pero no hubo relámpagos, (ver figura 3.7), los cual se atribuye a que existen diferentes fuentes de ozono

tales como quema de biomasa, transporte de ozono de otros lados, diferentes reacciones fotoquímicas, sin dejar a un lado la posibilidad de que el análisis de la intersección entre las trayectorias y relámpagos contiene una incertidumbre de tal manera que tal vez hubo relámpagos cerca de la trayectoria pero justo fuera; RB fue la estación que registró mayor número de días tipo (iii).

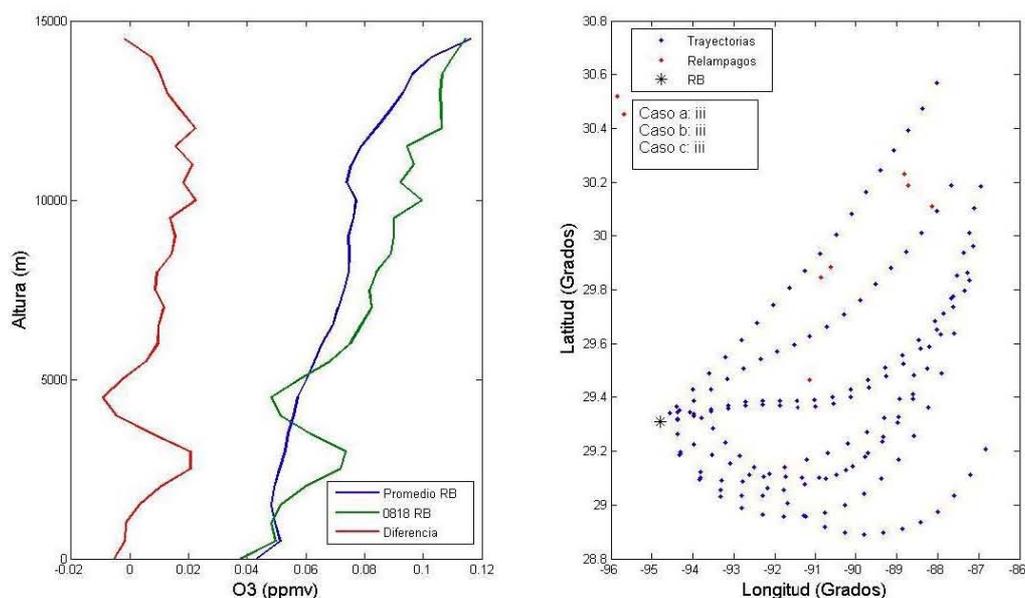


Figura 3.7. Perfiles de ozono promedio para el día 18 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.). Ejemplo el caso (a) tipo (iii).

De los tipos (ii) y (iv), tan solo hubo cuatro días del total de los 94, de tal manera que en muy pocos días se encontraron valores de $\Delta O_3 / DE < 0$. Los demás gráficos día por día para cada caso y cada tipo se pueden ver en los apéndices del I al IV.

Tabla 3.7 Caso (b) con datos IONS-06

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0.5$	$\Delta O_3 / DE < 0.5$
3, 4, 6, 4	2, 1, 3
Total= 17 días	Total = 6 días

(iii) No relámpagos

$\Delta O_3 / DE > 0.5$

18, 11, 9, 26

Total= 64 días

Barbados

(iv) No relámpagos

$\Delta O_3 / DE < 0.5$

1, 5, 1

Total = 7 días

Houston

Mexico

Ron Brown

La tabla 3.7 al igual que la 3.6 muestra el resumen de la correlación entre relámpagos y ozono, pero para el caso (b), en el cual se determinó en cuantos días los niveles de ozono tuvieron aumentos superiores a 0.5, encontrando que al comparar el caso (a) con el (b) la tendencia fue muy similar a la del caso (a), predominado nuevamente los eventos tipo (iii), pero en esta ocasión se encontraron mas días del tipo (iv).

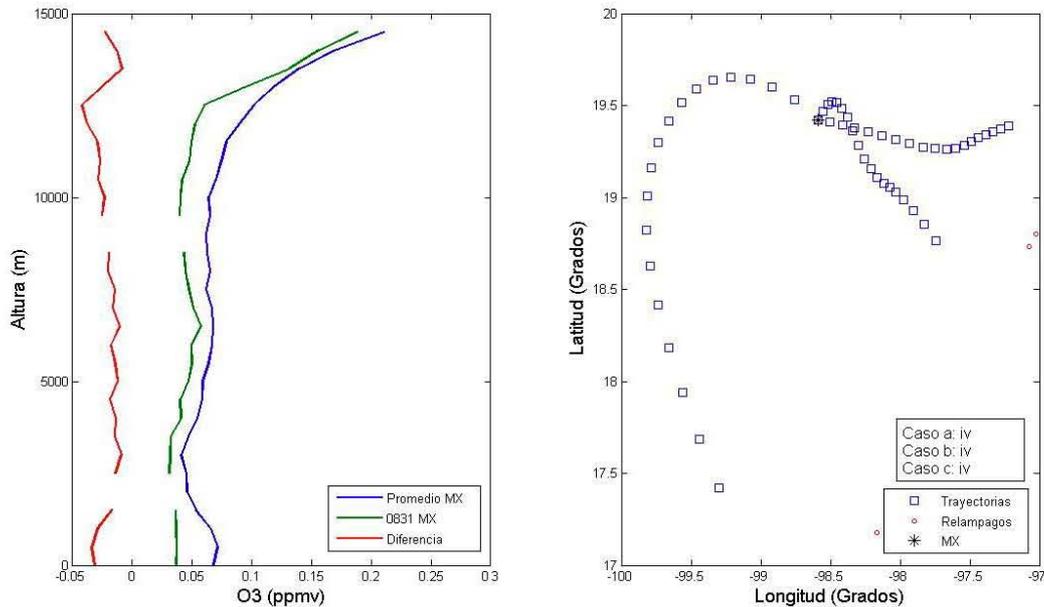


Figura 3.8. Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.) Ejemplo para el caso (b) tipo (iv).

La figura 3.8 muestra un claro ejemplo para el caso (b) tipo (iv) donde los perfiles de ozono son casi uniformes en la vertical o poco variables y los relámpagos cayeron a unas distancias y horas muy lejanas de las trayectorias de aire.

Los valores de tipo (ii) corresponden a que las descargas eléctricas en estos días ocurrieron a una distancia muy grande o a un tiempo antes del lanzamiento de la ozono sonda no adecuado (muchas horas de diferencia). Es posible que el ozono se diluya o tenga reacciones con otras moléculas o compuestos químicos presentes en sus alrededores. Un ejemplo para este caso se observa en la figura 3.9.

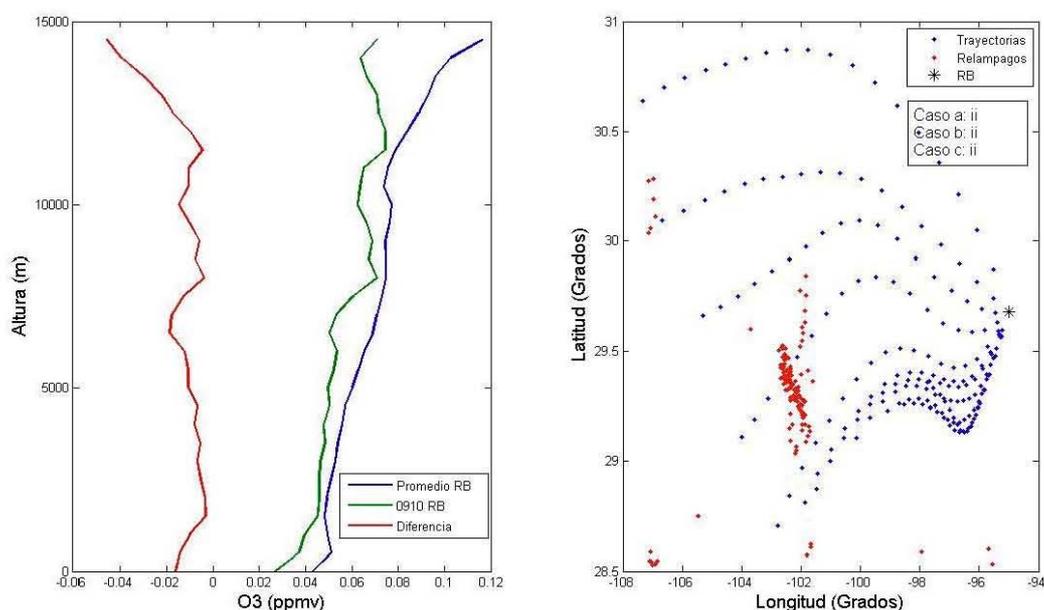


Figura 3.9 Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.) Ejemplo para el caso (b) tipo (ii).

En la tabla 3.8 se muestra el caso (c), donde a diferencia de los dos anteriores, hubo muchos mas días donde no hubo coincidencias entre los relámpagos y tampoco hubo aumentos

superiores a 1.0 del factor de $\Delta O_3 / DE$, mientras que la relación del número de días entre los tipos (i) y (ii) se mantuvieron poco variables.

Tabla 3.8 Caso (c) con datos IONS-06

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 1.0$	$\Delta O_3 / DE < 1.0$
1, 2, 6, 2	4, 2, 1, 5
Total= 11 días	Total = 12 días
(iii) No relámpagos	(iv) No relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 1.0$	$\Delta O_3 / DE < 1.0$
15, 7, 7, 19	3, 5, 7, 8
Total= 48 días	Total = 23 días
Barbados Houston	Mexico Ron Brown

En este último caso se encontraron 11 días tipo (i), en los cuales corroboramos que si existe una relación entre los picos de ozono $\Delta O_3 / DE > 1.0$ y los relámpagos a lo largo de las trayectorias.

En algunos de los perfiles de ozono mostrados en los apéndices, se observan algunos picos o variaciones en la parte alta (encima de los 13 km). Es posible que el O_3 de la estratosfera pase a la alta troposfera, aunque es una situación poco probable, se encontraron algunas evidencias de que si existe como se puede ver en las figuras I-15 y II-6.

Luego de realizados los análisis estación por estación y día por día, se realizó una separación de la localización de los relámpagos entre mar y tierra. El siguiente mapa (figura 3.10) nos muestra con asteriscos los cuatro sitios de medición y en puntitos azules las coordenadas de los relámpagos que coincidieron con las trayectorias de las masas de aire durante el periodo de estudio.

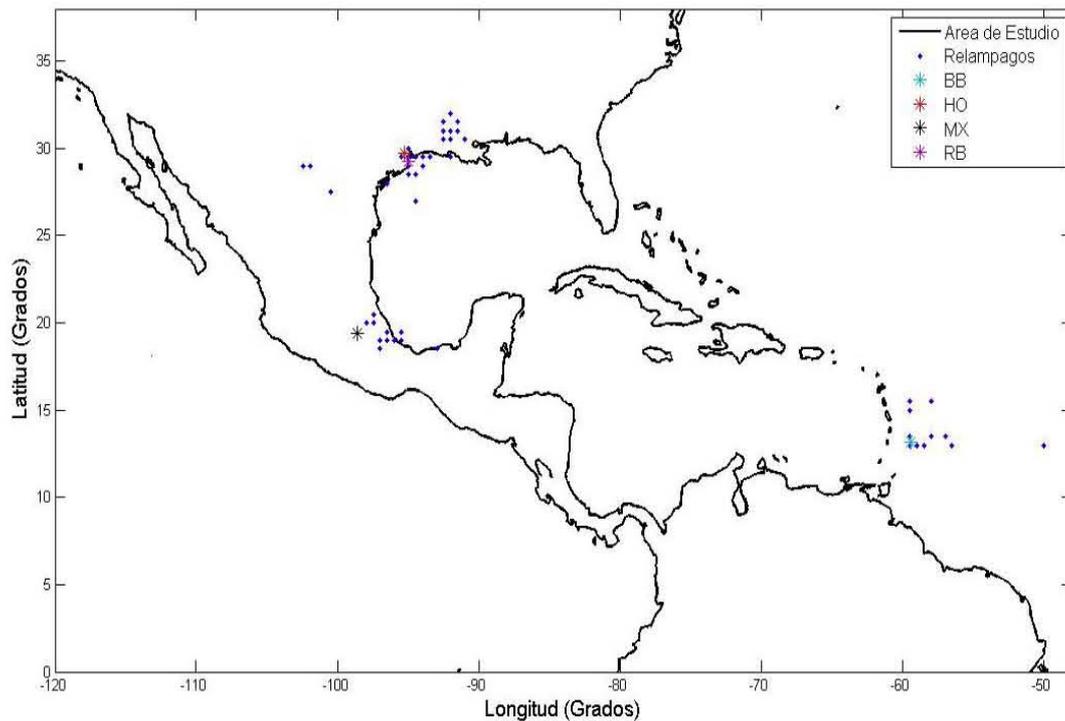


Figura 3.10 Ubicación Geográfica de los relámpagos que influenciaron los niveles de ozono

Después de analizar los 94 días de estudio en las cuatro estaciones encontramos que un total de 339 relámpagos coincidieron con las trayectorias de las masas de aire, de los cuales 170 se detectaron en mar y casi la misma cantidad (169) en tierra.

Con el fin de poder determinar las diferencias en la influencia de los relámpagos según su ubicación geográfica (mar-tierra), se realizó la gráfica 3.11, en la cual se encontró que tanto BB como RB al poseer una ubicación cercana o dentro del mar, la mayoría de descargas que influenciaron los niveles de ozono en estas dos estaciones provenían del mar, siendo mucho más marcada la influencia, la actividad, así como el número de eventos en RB.

México posee una ubicación continental, pero en vista de la cercanía al Golfo de México, muchos de los vientos y de los eventos meteorológicos que allí ocurren tienen una gran

influencia sobre este punto. En la grafica 3.11 encontramos que la mayor parte de los eventos que influyeron en el sitio de medición MX cayeron en terreno continental al igual que en HO.

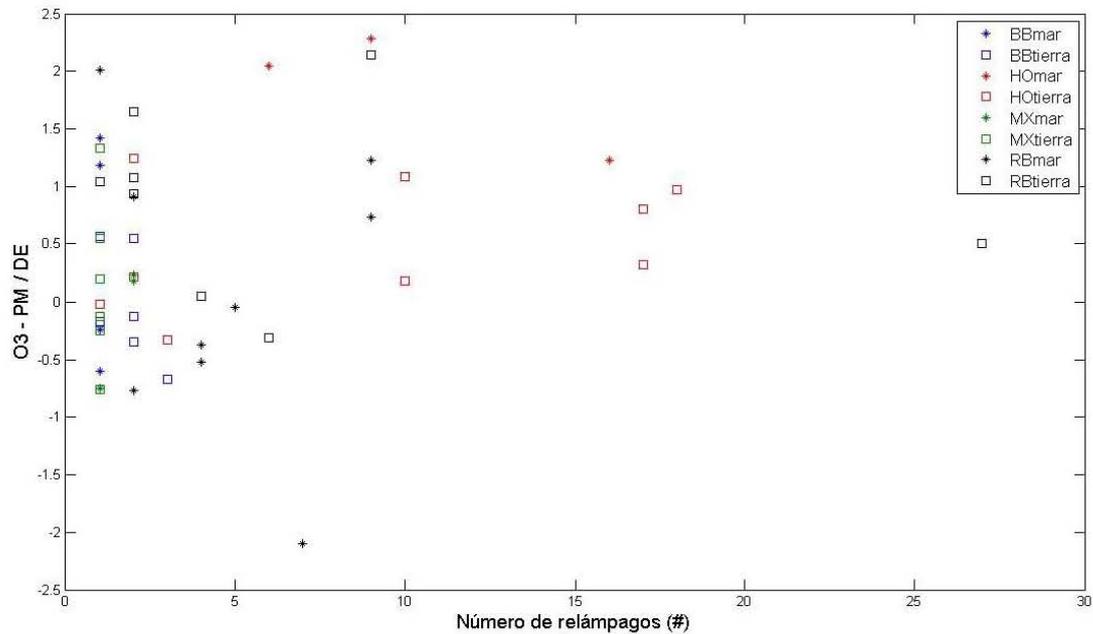


Figura 3.11 Numero de eventos en cada estación separados entre el lugar de detección (tierra- mar)

Se determinó la distancia a la cual fueron detectados cada uno de los relámpagos que coincidieron con las trayectorias de las masas de aire. A pesar que todos los *back-trajectory* se trazaron 18 horas antes de realizar el lanzamiento de cada ozono sonda, no existe una correlación entre la distancia de detección del relámpago y el número de horas antes del ozono sondeo a la cual esta fue detectada, debido a que las trayectorias tomaban diferentes formas, lo cual hizo muy variables las distancias en kilómetros.

3.4 CORRELACION OZONO- RELAMPAGOS (Ozono Climatológico)

La influencia del ozono en la estructura térmica de la atmósfera a través de la absorción en longitud de onda corta y larga, implica que en los modelos climáticos es necesaria una distribución realista del ozono con el ánimo de modelar correctamente el clima (*Fourtin*

and Kelder, 1998). Por ello tomando como base las mediciones del estudio realizado por McPeters (2007), los cuales muestran el comportamiento a lo largo de los años del ozono a diferentes latitudes, se realizó un análisis paralelo al mostrado anteriormente, con el fin de observar cual fue el comportamiento de nuestros datos utilizados y los promedios del ozono climatológico entre 1988 y 2002. Los datos de ozono climatológico mensuales para el periodo mencionado anteriormente, son mucho mas aproximados al comportamiento anual y a lo largo de algunas décadas atrás, sin embargo, los resultados obtenidos en la sección 3.3 son de gran importancia y muy aproximados a la realidad.

3.4.1 Correlación Datos IONS-06 y Ozono Climatológico

En vista de que la simulación más crucial para el clima es la distribución del ozono cerca de la tropopausa y dentro de la troposfera, en esta sección se muestra la correlación existente entre ambas fuentes de datos con las que se compararon los perfiles diarios de ozono en los cuatro sitios de estudio. Como se muestra en la figura 3.12, para BB el factor de correlación es de 0.75, siendo es un valor aceptable, entre ambas fuentes de datos a esta latitud para esta estación.

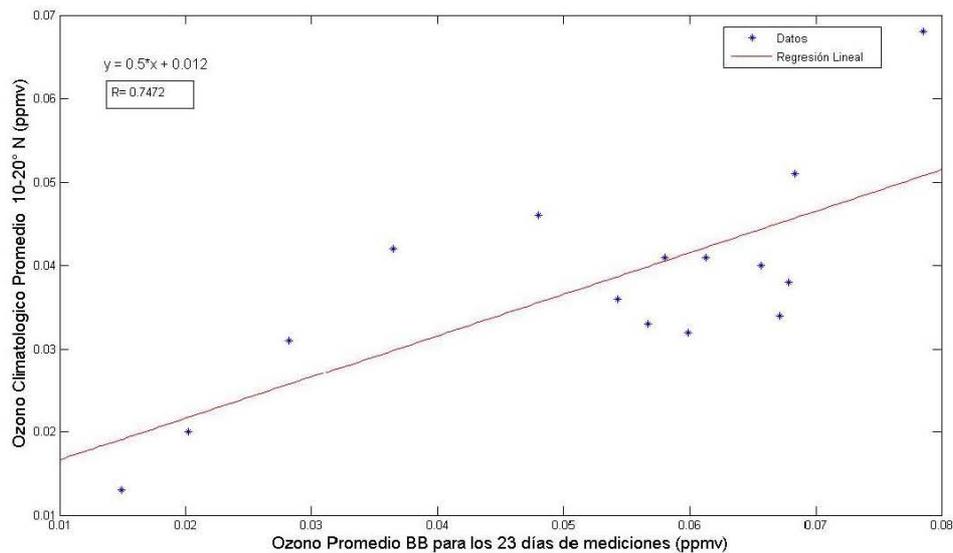


Figura 3.12 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 10-20 °N y los datos de la campaña IONS-06 en BB

Con los datos de HO y los obtenidos del estudio de *McPeters (2007)* para las latitudes entre 20-30 °N, se trazo el grafico 3.13 encontrado un coeficiente de correlación lineal de 0.95.

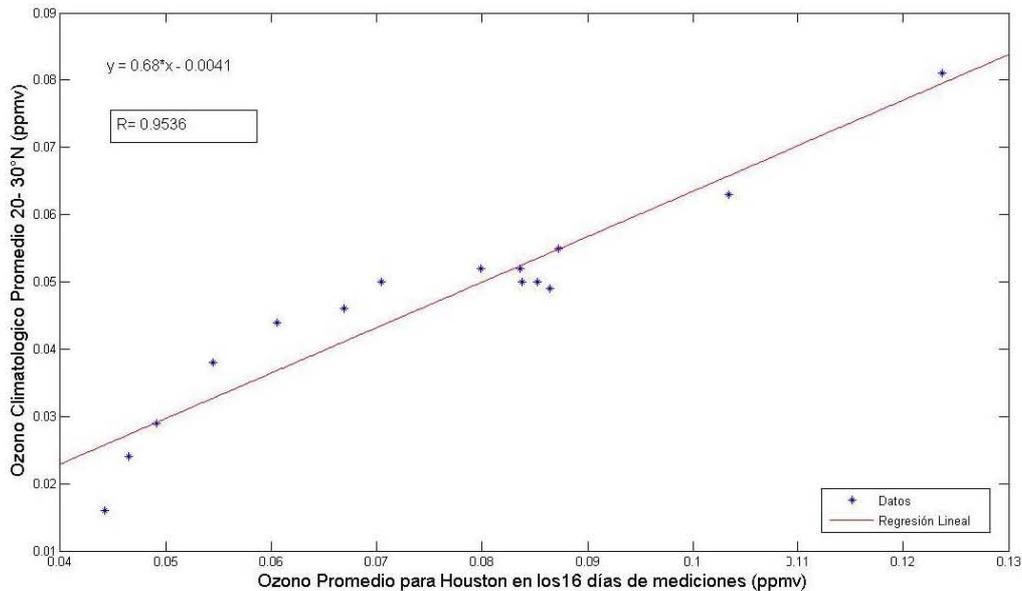


Figura 3.13 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 20-30 °N y los datos de la campaña IONS-06 en HO

Al igual que en BB, con los datos de MX, la correlación es menor que la encontrada para HO, sin embargo con el coeficiente de correlación de 0.75 demuestra que la correlación entre las dos fuentes de datos es buena, como se observa en la figura 3.14. Por otro lado también se encontró que hay más variación en las concentraciones mas bajas. Este es diferente de BB donde vemos que hay más variación en las concentraciones más altas.

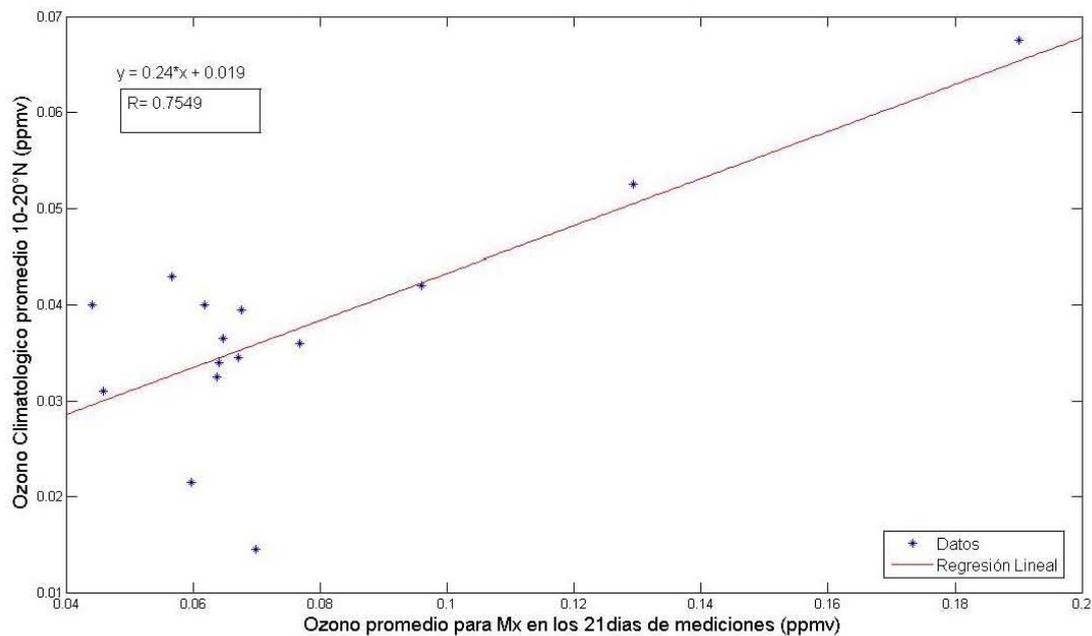


Figura 3.14 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 10-20 °N y los datos de la campaña IONS-06 en MX

En RB encontramos que el coeficiente de correlación es igual a 0.95, como se observa en la figura 3.15, valor muy similar al obtenido para HO en este mismo intervalo de latitudes.

En conclusión, en cada una de las cuatro estaciones se encontraron coeficientes de correlación suficientemente altos, de tal manera que podemos decir que las mediciones en cada estación no varían de los valores climatológicos fuera del nivel de probabilidad esperado. Sin embargo, son mucho más marcadas para las dos estaciones ubicadas entre las latitudes de 20-30°, con valores superiores a 0.95, mientras que las dos estaciones entre las altitudes 10-20° reportaron coeficientes mayores a 0.75.

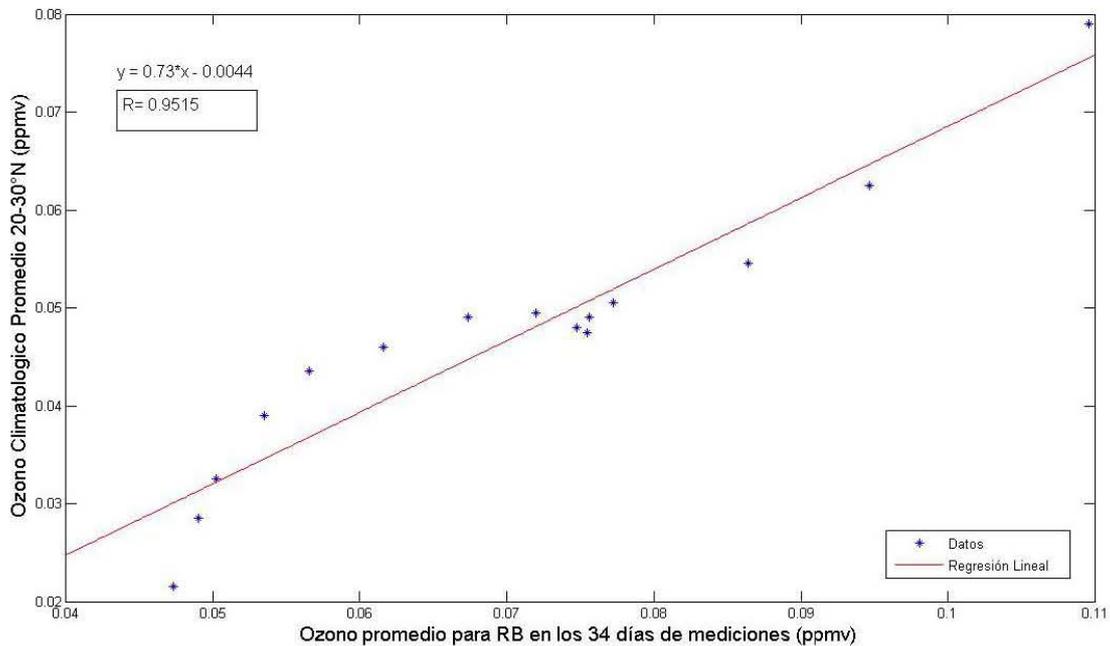


Figura 3.15 Correlación entre el Ozono Climatológico promedio entre 20-30 °N y los datos de la campaña IONS-06 en RB

3.4.2 Resultados con Ozono Climatológico

En las tablas del Apéndice V se muestran los valores de la relación encontrada entre el Ozono Climatológico y las mediciones diarias en BB (tabla 1), HO (tabla 2), MX (tabla 3) y RB (tabla IV) así como la altura a la cual se localizó cada uno de ellos. Los valores de los relámpagos reportados en estas tablas son los mismos que se encuentran en la tabla 3.5.

Al igual que en la sección 3.3 se plantearon tres casos para el estudio con los datos del ozono climatológico, y cada uno de ellos con cuatro posibilidades.

Tomando como base los datos de la tabla 1 del Apéndice V, se determinó el número de días de tipo (i, ii, iii o iv) en el caso (a), encontrando al igual que en la tabla 3.8 un máximo de días tipo (iii), el cual triplica el número de días encontrados tipo (i), con un aumento de tres días tipo (i), y una disminución de días tipo (ii).

Al analizar el número de días en cada tipo por estación, no hubo mucha variación entre las tablas 3.6 y 3.9, encontrando unos pequeños aumentos o disminuciones de ± 2 días.

Tabla 3.9 Caso (a) con datos de Ozono Climatológico

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0$	$\Delta O_3 / DE < 0$
5, 4, 7, 7,	
Total= 23 días	Total = 0 días
(iii) No relámpagos	(iv) No relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0$	$\Delta O_3 / DE < 0$
15, 12, 14, 27	3
Total= 68 días	Total = 3 días
Barbados	Houston
	Mexico
	Ron Brown

La tabla 3.10 nos muestra el resumen de los datos de la tabla 2 del Apéndice V para el caso (b), encontrando un aumento de días tipo (i) y una disminución del tipo (ii) y (iii) comparado con la tabla 3.7.

Tabla 3.10 Caso (b) con datos de Ozono Climatológico

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0.5$	$\Delta O_3 / DE < 0.5$
4, 4, 7, 7	1
Total= 22 días	Total = 1 día
(iii) No relámpagos	(iv) No relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 0.5$	$\Delta O_3 / DE < 0.5$
13, 11, 14, 27	5, 1
Total= 65 días	Total = 6 días
Barbados	Houston
	Mexico
	Ron Brown

Por ultimo se llevó a cabo el análisis de la tabla 4 del Apéndice V, viendo el resumen de sus datos en la tabla 3.11, encontrando una gran disminución en el número de días para los tipos (ii) y (iv), y un fuerte aumento en (i) y (iii).

Tabla 3.11 Caso(c) con datos de Ozono Climatológico

(i) Relámpagos	(ii) Relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 1.0$	$\Delta O_3 / DE < 1.0$
2, 4, 7, 7	3
Total= 20 días	Total = 3 días
(iii) No relámpagos	(iv) No relámpagos
$\Delta O_3 / DE > 1.0$	$\Delta O_3 / DE < 1.0$
4, 11, 14, 27	14, 1
Total= 56 días	Total = 15 días
Barbados	Houston
Mexico	Ron Brown

Teniendo en cuenta las Tablas 3.9, 3.10 y 3.11, se observa que en los 3 casos hubo aumento en el número de días donde se registraba un incremento de los niveles de ozono en presencia y ausencia de relámpagos; esto se debe a que los valores diarios de ozono encontrados comparados con los perfiles de ozono climatológico fueron mucho mayores, por tanto al determinar el factor $\Delta O_3 / DE$ para cada día y cada estación, se registraron valores con una magnitud mucho mayor que los obtenidos en la sección 3.3.

El fenómeno mencionado anteriormente se debe a que los promedios tomados en la sección 3.3, se determinaron al obtener el promedio con los mismos datos arrojados de los ozono sondeos de la campaña IOS-06, mientras que el ozono climatológico es tomado de mediciones satelitales y de ozono sondeos realizados a los largos de varios años.

Al finalizar todo el estudio se encontró que los NOx provenientes de los relámpagos generan un incremento en los niveles de ozono troposférico, aunque este aumento se encuentra limitado a la distancia y al número de eventos que se registran a lo largo de la trayectoria. En vista que la cantidad de eventos localizado en tierra y en mar fueron muy similares, no se logró obtener una tendencia muy clara entre ambas componentes.

Si bien los perfiles promedios obtenidos de los ozono sondeos son mucho mas confiables y reflejan el comportamiento real del ozono a diferentes latitudes, los perfiles de ozono trazados únicamente con los datos de la campaña IONS-06, tienen un comportamiento similar a los del ozono climatológico: mayor número de días tipo (iii) y una tercera parte de estos son de tipo (i).

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En la determinación de la profundidad de la Capa Limite, se encontró que los dos lugares cerca o dentro del mar (Barbados y Golfo de México) poseen unos valores pequeños debido a la presencia de flujos laminares, mientras que los lugares montañosos o con presencia de grandes edificaciones (México y Houston) y propensos a la generación de turbulencia, reportaron las mayores profundidades, encabezados por México.
- Se encontró que México posee una altura de tropopausa pequeña para lo planteado teóricamente, en vista de que debería poseer una mayor tropopausa que los lugares de latitudes mayores como Houston y Ron Brown; los demás lugares de medición si coincidieron con la variabilidad general del sistema.
- Basados en los perfiles verticales de ozono, encontramos que México es el lugar que reporta los mayores valores de ozono superficial en casi todos los días de medición, lo cual corrobora los grandes niveles de contaminación que existen en esta ciudad debido a las grandes emisiones de contaminantes de fuentes antropogénicas que se emiten diariamente.
- De los cuatro sitios de medición, Barbados fue el lugar que tuvo una menor frecuencia de fenómenos eléctricos, como se muestra gráficamente en la figura 3.4 donde se evidencia que en sus alrededores no se localizan muchos relámpagos durante el periodo de estudio y luego fue demostrado al analizar los 21 días de medición día por día.
- México y Ron Brown fueron los dos lugares con mayor actividad de relámpagos, como se observa en la figura 3.4, sin embargo, MX y HO tuvieron actividad y coincidencia con las trayectorias de las masas de aire en un 33.3 y 25.0 % de sus días respectivamente.
- Cuando las descargas eléctricas ocurren a una distancia no muy grande (< 100 km) y pocas horas antes del lanzamiento de la ozono sonda (~ 4 horas), la concentración

de ozono troposférico que se transporta por la masa de aire al lugar de mediciones, reporta incrementos y genera picos positivos en los perfiles trazados.

- Al comparar los perfiles de ozono climatológico de mediciones realizadas entre los años 1988-2002 realizado por McPeters (2007) con los perfiles promedios de los datos de la Campaña IONS-06, los valores encontrados de $\Delta O_3 / DE$, fueron mucho mayores para el ozono climatológico. Sin embargo al estudiar los tres casos planteados a, b y c las tendencias fueron similares.
- En los tres casos de la sección 3.3 se encontró que en un 17 % del total de los días de mediciones se registró el tipo (i), comparado con el 23% para el ozono climatológico. Estos dos porcentajes nos indican la proporción del total de los días en los cuales hubo una correlación entre los relámpagos y el aumento de los niveles de ozono.
- El número de días en los cuales hubo relámpagos, pero no hubo aumento de los niveles de ozono fueron de 7.4% y 1.4% en las secciones 3.3 y 3.4 respectivamente, en estos días los relámpagos cayeron a una distancia muy lejana o a un número de horas muy anticipado del ozono sondeo, por tanto este ozono generado por los relámpagos sufrió múltiples transformaciones físicas y químicas antes de llegar al lugar de medición.
- Como es bien conocido, los relámpagos no son la única fuente de precursores de ozono en la troposfera, lo cual se evidenció y se confirmó claramente al cuantificar el porcentaje del número de días tipo (iii) en ambas secciones, con un total de 64.5% y 67% para los datos de la campaña IONS-06 y de ozono climatológico respectivamente.
- La evidencia que en muy pocos días se presentó la situación donde no hubo relámpagos ni aumentos de ozono, se evidencia en los resultados obtenidos en las tablas de la 3.6 a la 3.11, donde se encontró que tan solo el 11 y 8.5 % de los días hubo el tipo (iv) de estudio.

Con el ánimo de poder realizar un mejor trabajo a futuro, se sugiere que sería de gran utilidad el poder contar no solo con los datos en tierra de la WWLLN, sino también con los

datos satelitales manejados por la NASA con el objetivo de hacer una comparación entre ambas formas de medición y poder trabajar con la mejor técnica.

Como se mencionó en el capítulo III, las ozono sondas se lanzaron entre las 17 y 20 UT, por tanto se estudió el efecto de los relámpagos nocturnos, pero sería muy bueno estudiar que tanto afectan los relámpagos durante el día y para ello se necesitarían realizar ozono sondeos en horas de la noche.

Sería muy importante poder estudiar la formación de relámpagos teniendo en cuenta la microfísica de las nubes y dinámica de la atmósfera, siendo muy importante realizar estudios o análisis meteorológicos basados en información satelital y de esta manera poder discernir profundamente sobre la formación y afectaciones en los niveles de ozono, así como datos de los demás contaminantes.

Con el ánimo de hacer un análisis más detallado de que tanto afectan los relámpagos a los niveles de ozono, sería muy bueno poder contar con información en más sitios a diferentes latitudes tanto en el hemisferio norte como en el sur, para poder hacer una comparación entre ellos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anagnostou, E. 2006. "ZEUS Long-Range Lightning Detection System". University of Connecticut: Civil and Environmental Engineering. 1-15pp.
- Aparicio, J. Protección Civil Española. Andalucía.2007
- Beirle, S. U. Platt, M. Wenig , T. Wagner. 2003. "NO_x production by lightning estimated with GOME". Advances in Space Research. 34: 793–797 pp.
- Beirle, S. N. Spichtinger, A. Stohl, K. L. Cummins, T. Turner, D. Boccippio, O. R. Cooper, M. Wenig, M. Grzegorski, U. Platt, and T. Wagner.2005. "Estimating the NO_x Produced by Lightning from GOME and NLDN data: a case study in the Gulf of Mexico". Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 5, 11295–11329.
- Bracher, A. H. Bovensmann, K. Bramstedt, J.P. Burrows, T. von Clarmann, K.-U. Eichmann, H. Fischer, B. Funke, S. Gil-Lo´pez, N. Glatthor, U. Grabowski, M. Ho´pfner, M. Kaufmann, S. Kellmann, M. Kiefer, M.E. Koukouli, A. Linden, M. Lo´pez-Puertas, G. Mengistu Tsidu, M. Milz, S. Noel, G. Rohen, A. Rozanov, V.V. Rozanov, C. von Savigny, M. Sinnhuber, J. Skupin , T. Steck , G.P. Stiller , D.-Y. Wang, M. Weber, M.W. Wuttke. 2005. "Cross Comparisons of O₃ and NO₂ Measured by the Atmospheric ENVISAT Instruments GOMOS, MIPAS, and SCIAMACHY". Advances in Space Research 36: 855–867.
- Cooper, O. A. Stohl, M. Trainer, A. M. Thompson, J. C. Witte, S. J. Oltmans, G. Morris, K. E. Pickering, J. H. Crawford, G. Chen, R. C. Cohen, T. H. Bertram, P. Wooldridge, A. Perring, W. H. Brune, J. Merrill, J. L. Moody, D. Tarasick, P. Ne´de´lec, G. Forbes, M. J. Newchurch, F. J. Schmidlin, B. J. Johnson, S. Turquety, S. L. Baughcum, X. Ren, F. C. Fehsenfeld, J. F. Meagher, N. Spichtinger, C. C. Brown, S. A. McKeen, I. S. McDermid, and T. Leblanc. 2006. "Large Upper Tropospheric Ozone Enhancements above Midlatitude North America During Summer: In situ evidence from the IONS and MOZAIC ozone measurement network". Journal of Geophysical Research, 11: p1-19.

- Cuevas, E.; Rondas, A. 1996. “Investigación y programa de medidas del ozono troposférico en el observatorio de vigilancia atmosférica de Izaña (INM)”. *Física de la Tierra*.9:67-106 pp.
- Dowden, R. L.; Brundell, J. B.; Rodger, C. J. 2002.“ VLF Lightning Location by Time of Group Arrival (TOGA) at Multiples Sites. *Journal of Atmospheric Solar Terrestrial Physics*. 64: 817-830.
- EcoPortal; Ambiente y Sociedad. Sitio web: <http://www.ecoport.net>. 2007.
- Ehhalt, D. H., F. Rohrer, and A. Wahner, Sources and distribution of NO_x in the upper troposphere at northern midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, 97, 3725–3738, 1992.
- Fortuin, J.; Kelder, H. 1998. “An ozone climatology based on ozonesonde and satellite measurements”. *Journal of Geophysical Research*. 31 (709-734).
- Grewe, V. D. Brunner, M. Dameris, J.L. Grenfell, R. Hein, D. Shindell, J. Staehelin. 2001. “Origin and variability of upper tropospheric nitrogen oxides and ozone at northern mid-latitudes”. *Atmospheric Environment* 35: 3421–3433.
- HIDRITEC: tecnología y gestión de recursos hídricos. Sitio web consultado: <http://www.hidritec.com>. 2007.
- Ilzarbe, L.; 2000. “Nuevo Método para Blanqueamiento de Dientes Vitales Mediante Gases Hiperoxidantes Naturales”. *Revista Maxilaris*. Nº. 25 / Año III.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis—Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J. T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, NewYork.
- Jacobson, M. *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*. Cambridge University Press. 2002. pg 35.
- Jaegle, L., D. J. Jacob, Y. Wang, A. J. Weinheimer, B. A. Ridley, T. L. Campos, G. W. Sachse, and D. E. Hagen, Sources and chemistry of NO_x in the upper troposphere over the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1705– 1708, 1998

- Jaegle, L., et al., Ozone production in the upper troposphere and the influence of aircraft during SONEX: Approach of NO_x-saturated conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3081– 3084, 1999.
- King Ozono. Sitio web: <http://www.kingozono.com/home.html>. 2007.
- Krzyscin, J.; Krizan, P.; Jaroslowski, J. 2007. “Long-term changes in the tropospheric column ozone from the ozone soundings over Europe”. *Atmospheric Environment*. 41: 606–616 pp.
- Lamarque, J.-F., G. P. Brasseur, P. G. Hess, and J.-F. Müller, Threedimensional study of the relative contributions of the different nitrogen sources in the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 101, 22,955 – 22,968, 1996.
- Liu, S. C., Possible effects on tropospheric O₃ and OH due to NO emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 325– 328, 1977.
- McPeters, R; Labow, G. Logan, J. 2007. “Ozone climatological profiles for satellite retrieval algorithms”. *Journal of Geophysical Research*. 112: D05308 pp.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Sitio web: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. 2007.
- Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Sitio Web: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2001/ast05dec_1.htm. 2007.
- Olcina, C. J.; Ayala, C.F. 2002. “Impacto social y económico de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-2000”.
- Petersen, W.; Boccippio, D. “Variability of convective structure and lightning’s activity in tropical easterly waves”. University of Alabama-Huntsville. 5B-1.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: Secretaría del Ozono. “Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono”. 2000.
- Rakov, V.; Uman, M. LIGHTNING: Physics and Effects. Cambridge University Press. 2003. 555-573 pp.

- Rodger, C.; Werner, S.; Brundell, J.; Lay, E.; Thomson, N.; Holzworth, R.; Dowden, R.. 2006. "Detection efficiency of the VLFWorld-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study" *Annales Geophysicae*. 24, 3197–3214.
- Rodríguez, O. "Descargas eléctricas de nube a tierra en México y áreas oceánicas adyacentes". un estudio preliminar usando datos de la red mundial WWLL". Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría. 2007.
- Sancho J.; Gomez, S.; Cuevas, E. Instituto Nacional de Meteorología: Programa de ozono sondeos del observatorio atmosférico de Izaña. Grupo de ozono y Ultravioleta. España. 2001.
- Schultz, M., et al., On the origin of tropospheric ozone and NO_x over the tropical Pacific, *J. Geophys. Res.*, 104, 5829{5844, 1999.
- Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA), Sitio Web: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php>. 2007.
- Seinfeld, J.; Pandis, S. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons.1998.
- Steinbrecher, R. Notas de clase: "Interacción Biosfera Atmósfera". Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. 2005
- Thompson, A.; Kenneth, E. 1992. "Ozone Production Potential Following Convective Redistribution of Biomass Burning Emissions". *Journal of Atmospheric Chemistry*.1-2 pp.
- Thompson, A. M., et al., Where did tropospheric ozone over southern Africa and the tropical Atlantic come from in October 1992 - insights from TOMS, GTE TRACE A, and SAFARI 1992, *J. Geophys. Res.*, 101, 24251-24278, 1996.
- Thompson, A.; Tao, W.; Pickering, K.; Scala, J.; Simpson, J. 1997. "Tropical Deep Convection and Ozone Formation". *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol 78, No 6.
- Thompson, A. Jesse B. Stone, Jacquelyn C. Witte, Sonya K. Miller, R. Bradley Pierce,Robert B. Chatfield,Samuel J. Oltmans, Owen R. Cooper, Amber L. Loucks, Brett F. Taubman, Bryan J. Johnson, Everette Joseph, Tom L. Kucsera,John T.

Merrill, Gary A. Morris, Scott Hersey, Gerry Forbes, Michael J. Newchurch, F. J. Schmidlin, David W. Tarasick, Valérie Thouret, and Jean-Pierre Cammas. 2007. "Intercontinental Chemical Transport Experiment Ozone Sonde Network Study (IONS) 2004: 1. Summertime upper troposphere/lower stratosphere ozone over northeastern North America". *Journal of Geophysical Research*. 112: D12S12 pp.

- Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Laboratorio de Física de la Atmósfera. La Paz. Bolivia. 2007. http://www.megalink.com/ozono/index_c.htm.
- Wallace, J.; Hobbs, P. *Atmospheric Science: An introductory survey*. Academic Press. 2006. 258p.
- World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Sitio web: <http://webflash.ess.washington.edu>. 2007.

APENDICE I

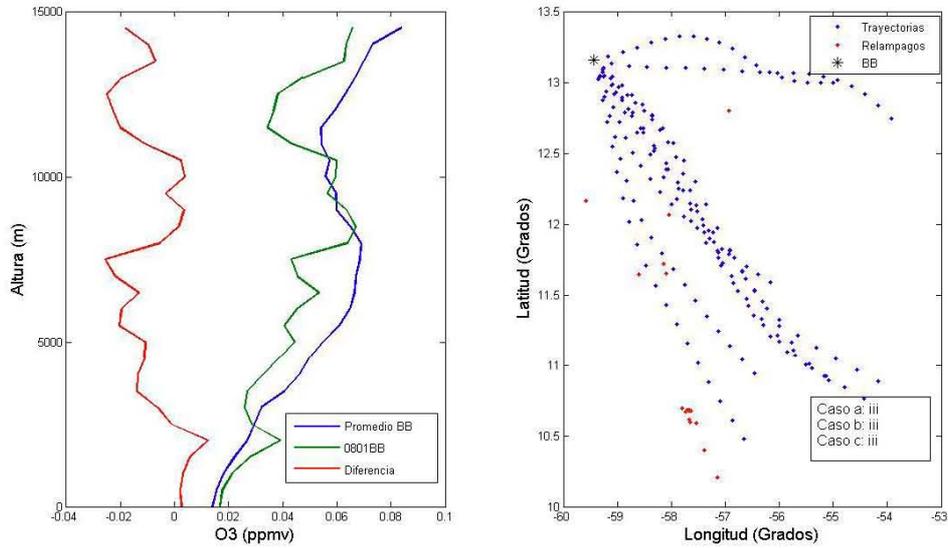


Figura I-1. *Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

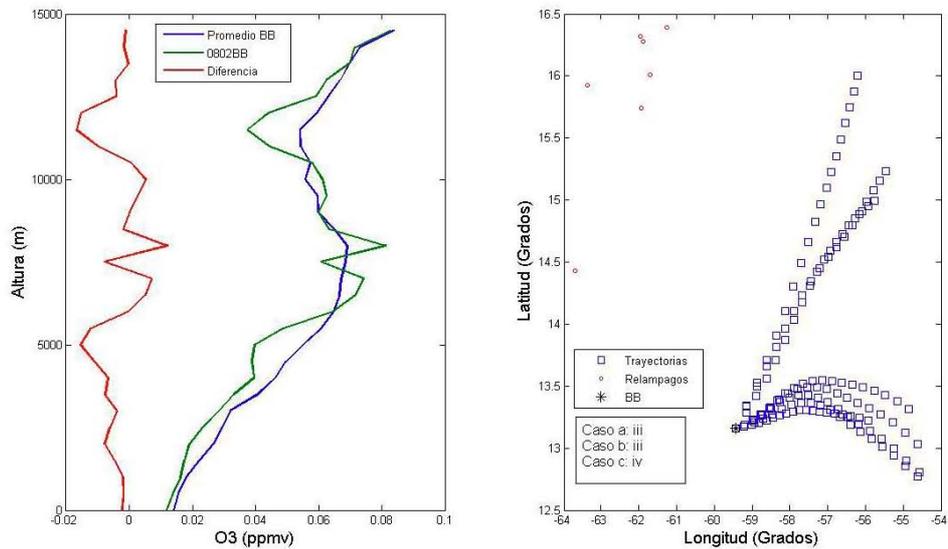


Figura I-2. *Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

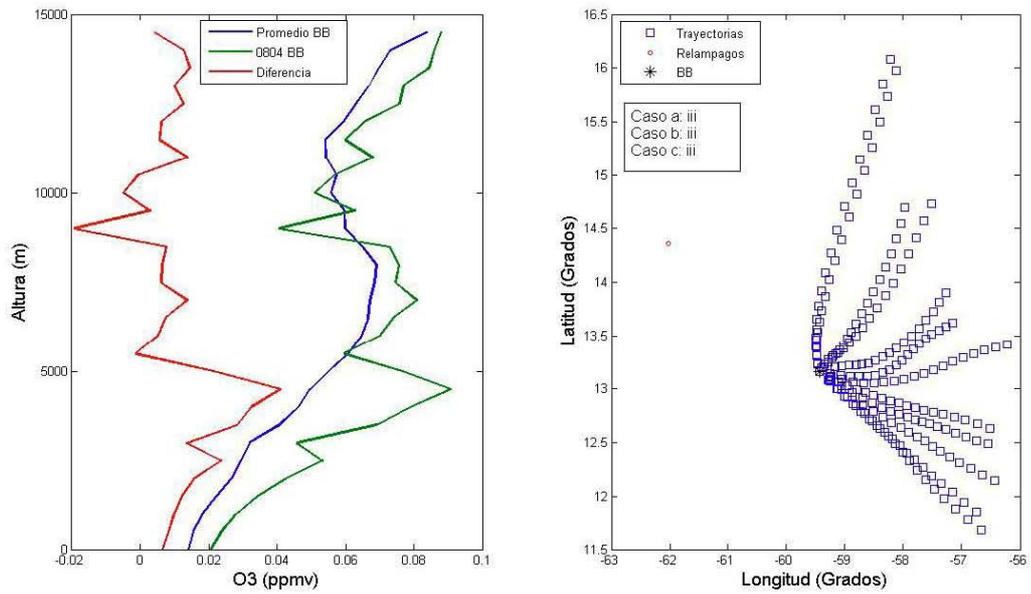


Figura I-3. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

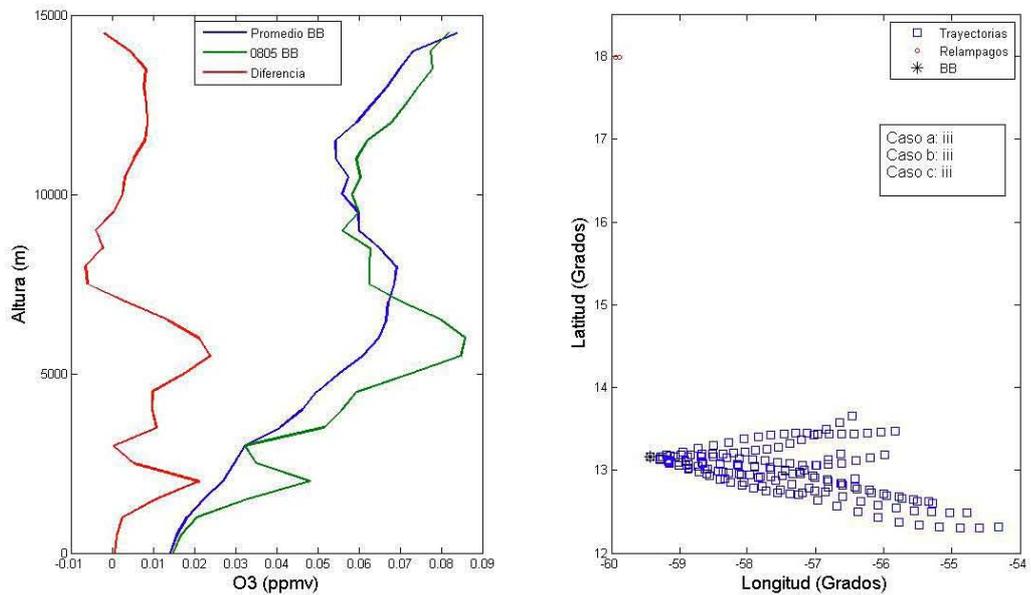


Figura I-4. Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

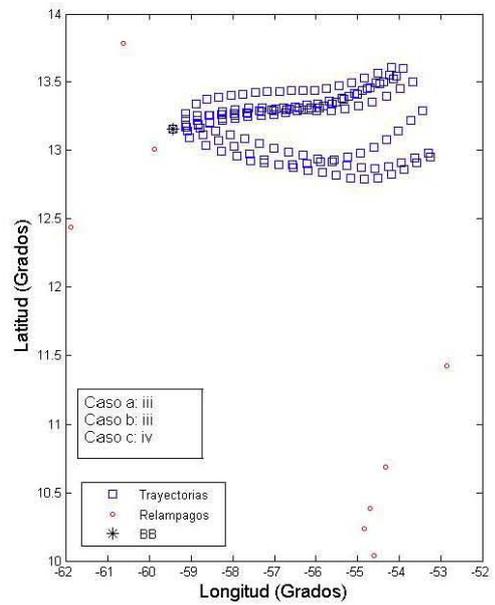
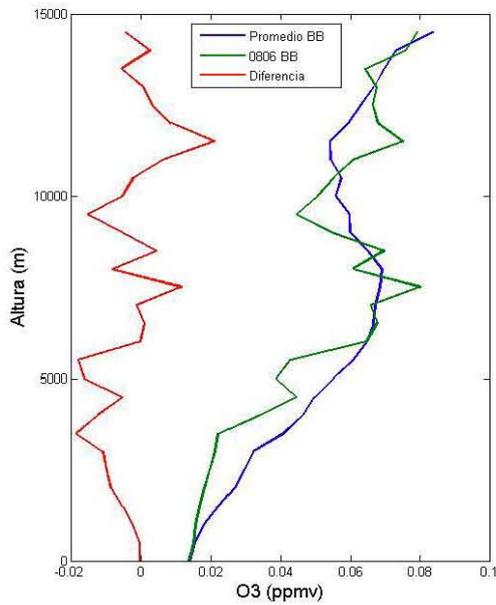


Figura I-5. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

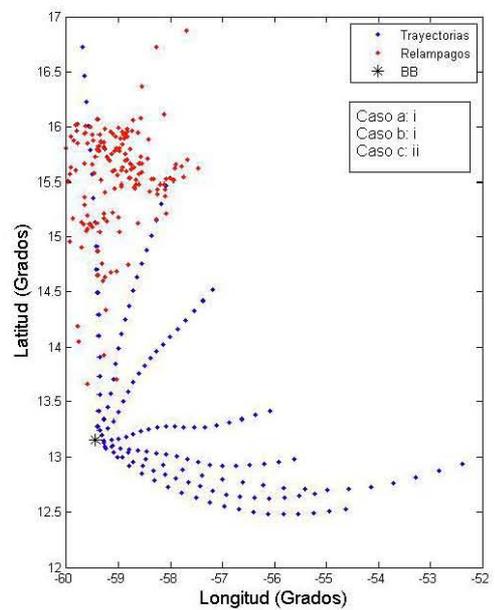
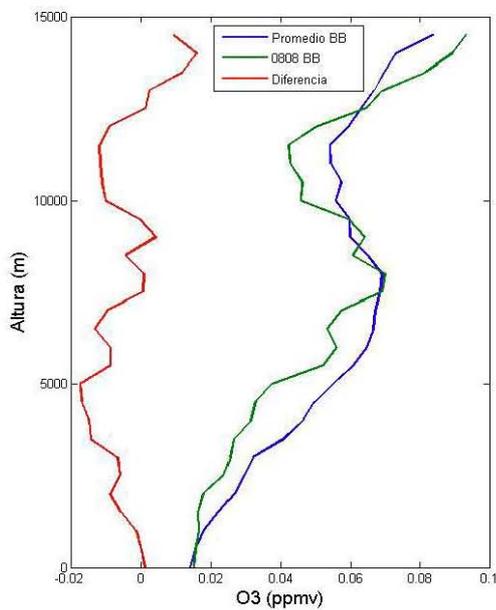


Figura I-6. Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

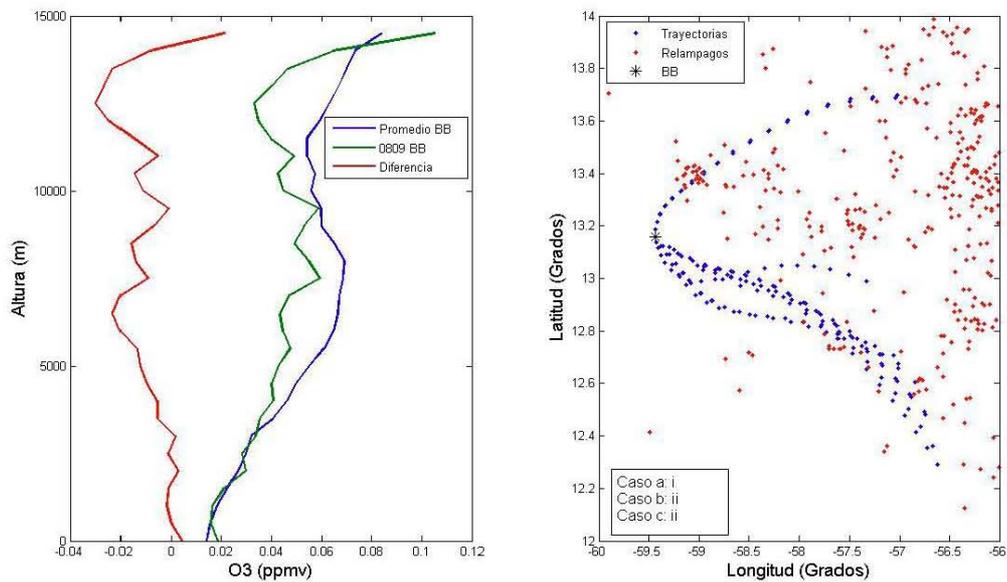


Figura I-7. Perfiles de ozono promedio para el día 09 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

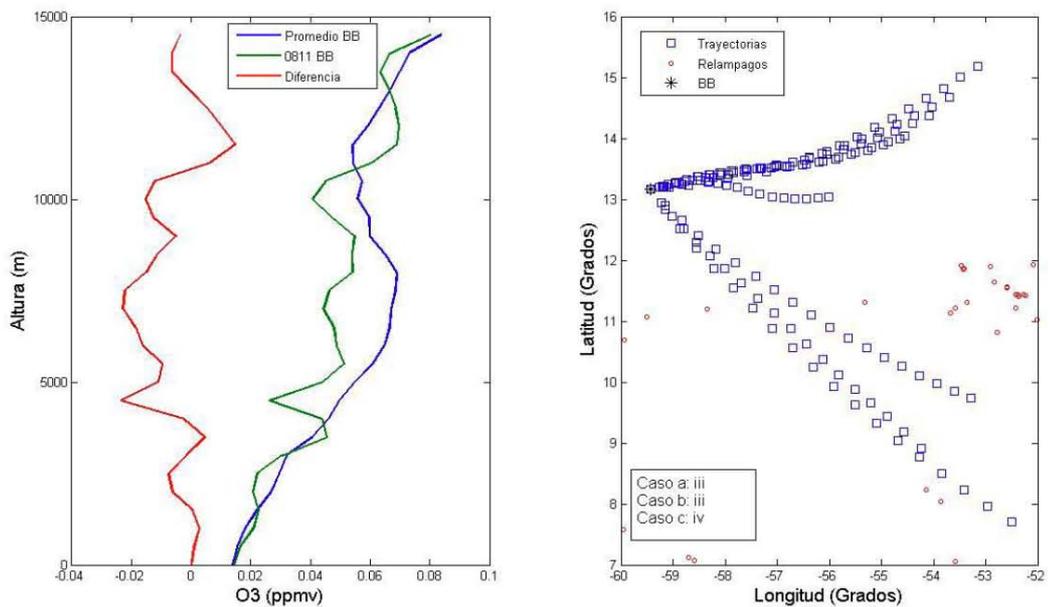


Figura I-8. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

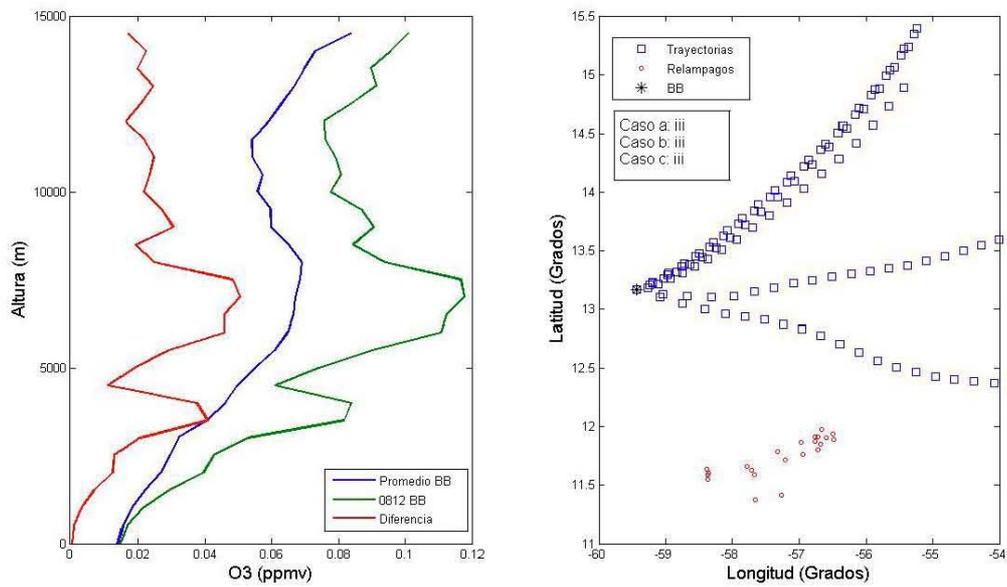


Figura I-9. Perfiles de ozono promedio para el día 12 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

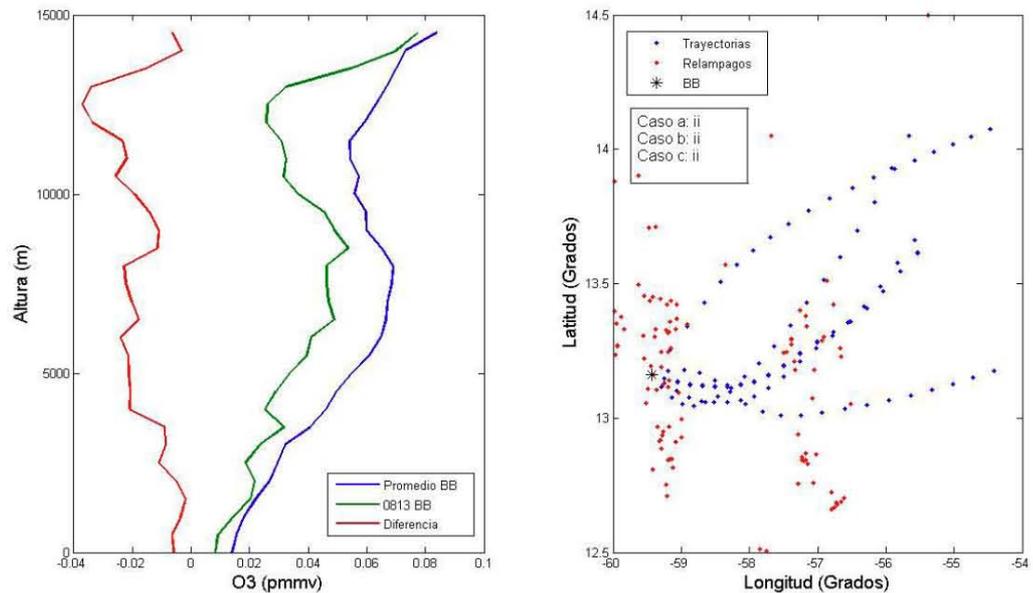


Figura I-10. Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

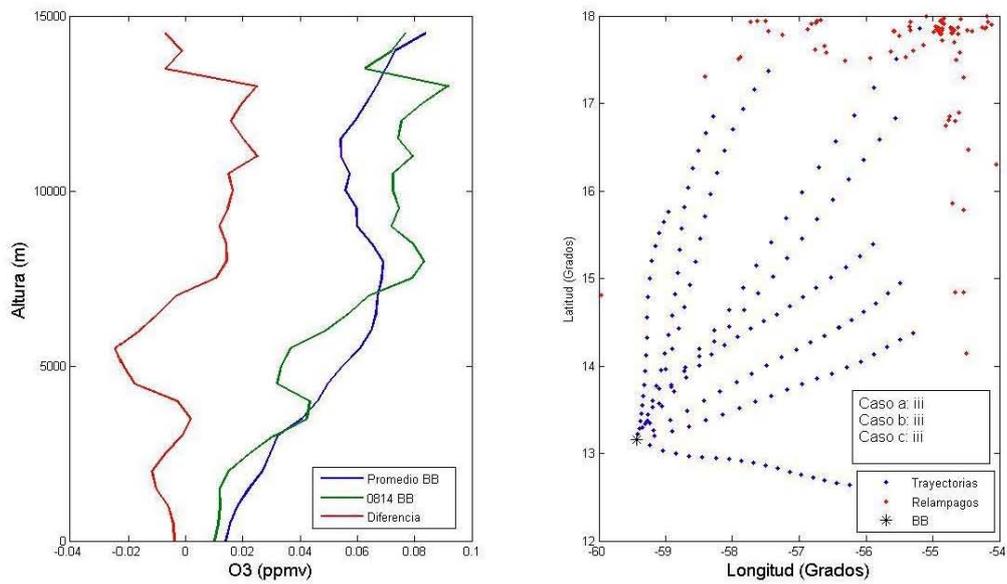


Figura I-11. Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

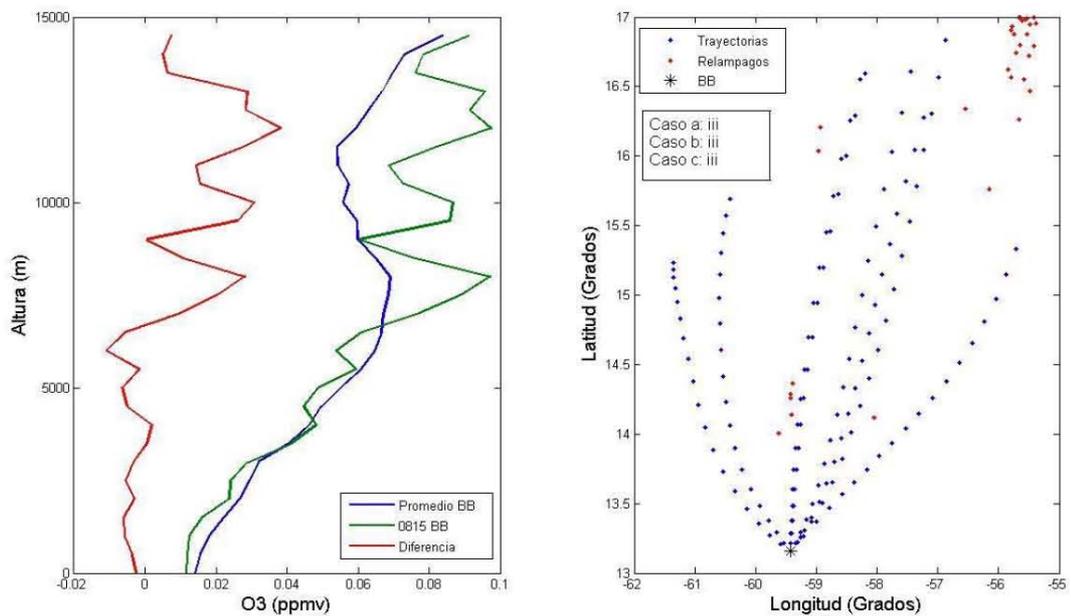


Figura I-12. Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

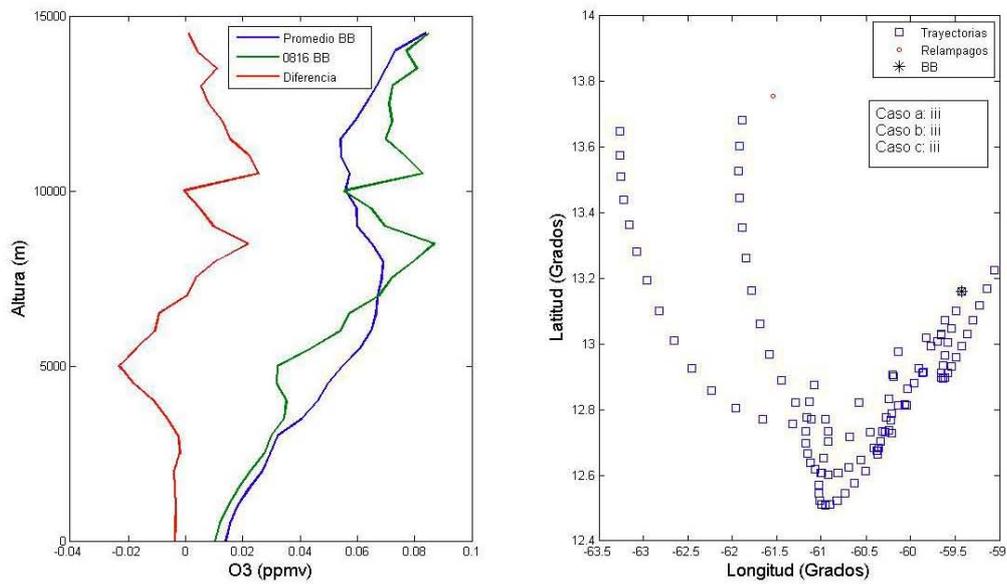


Figura I-13. Perfiles de ozono promedio para el día 16 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

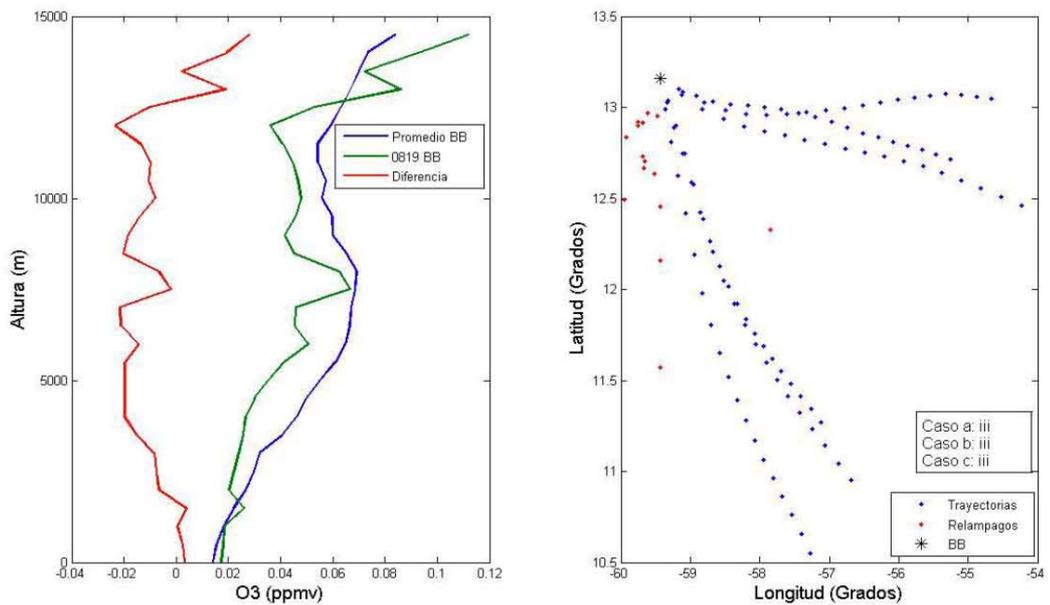


Figura I-14. Perfiles de ozono promedio para el día 19 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

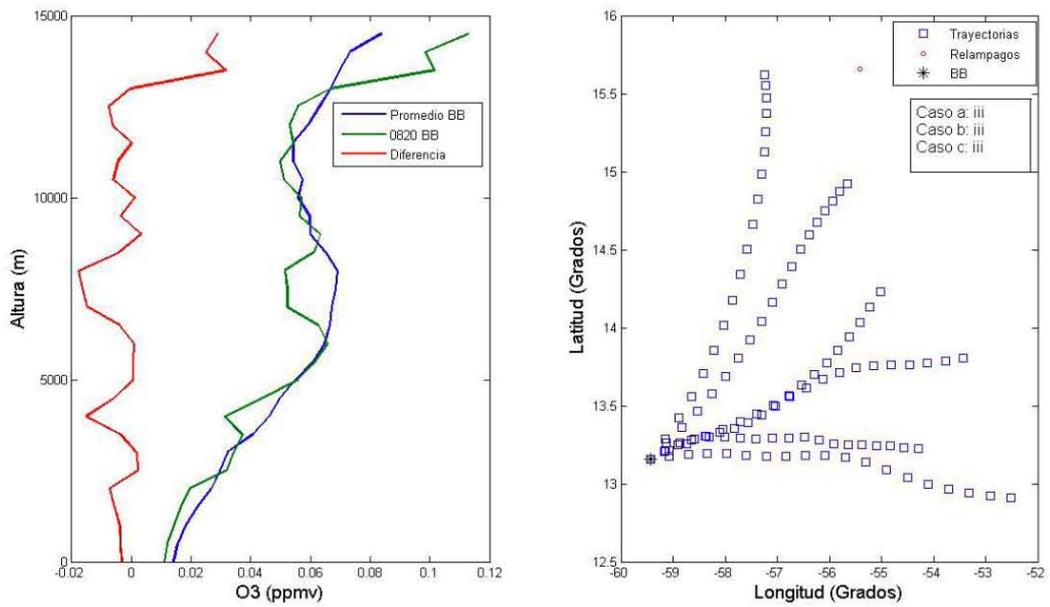


Figura I-15. *Perfiles de ozono promedio para el día 20 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

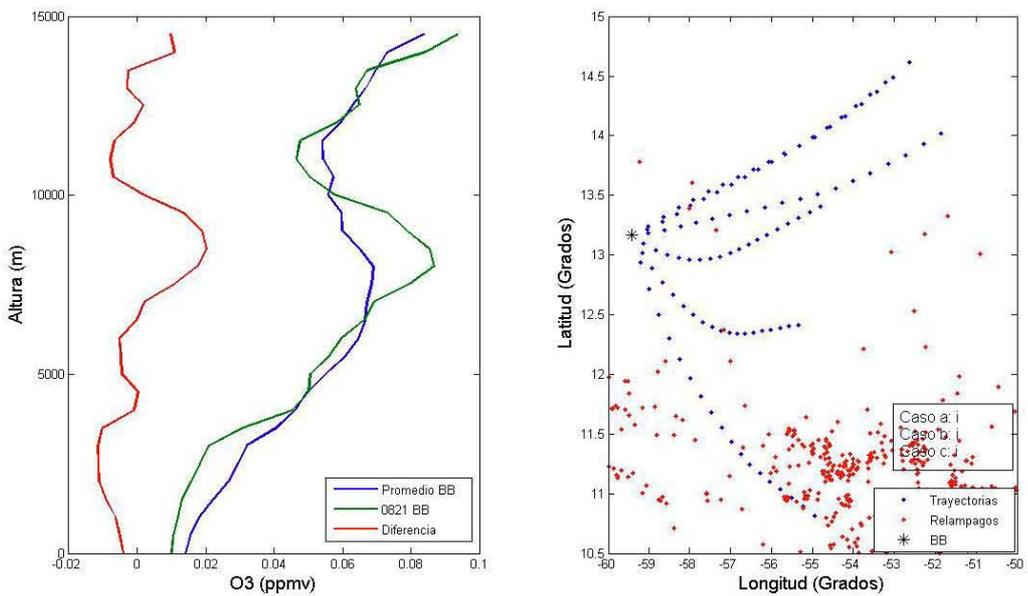


Figura I-16. *Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

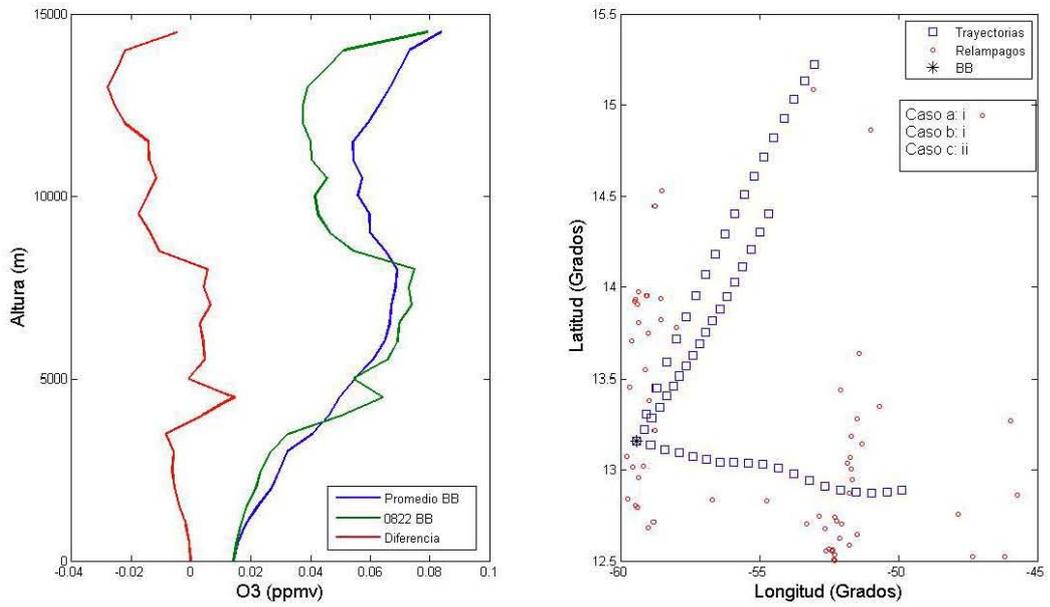


Figura I-17. Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

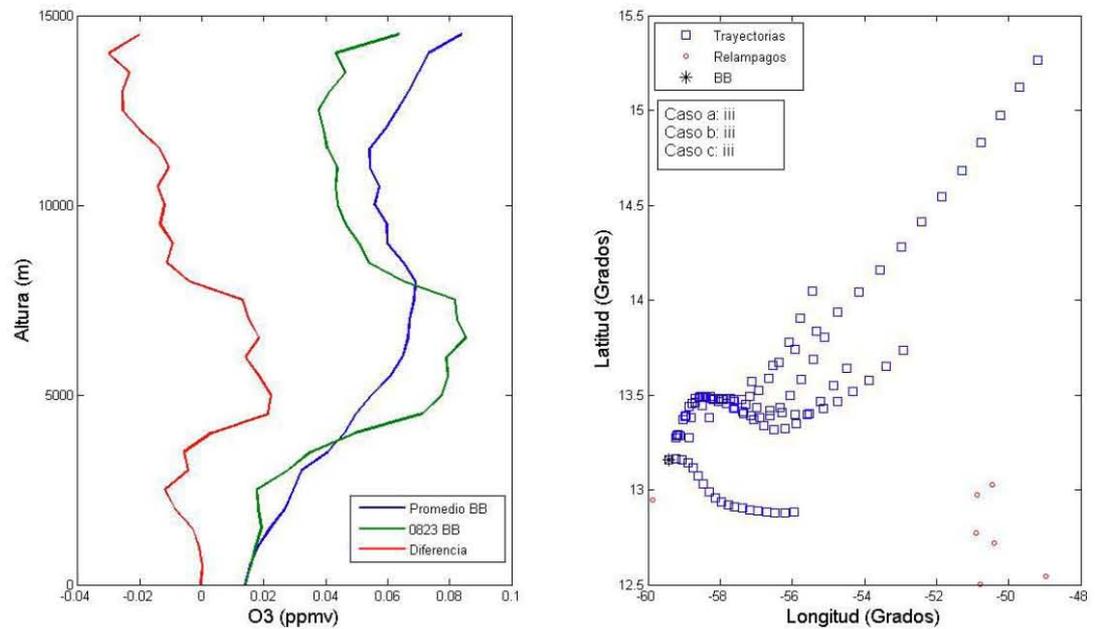


Figura I-18. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

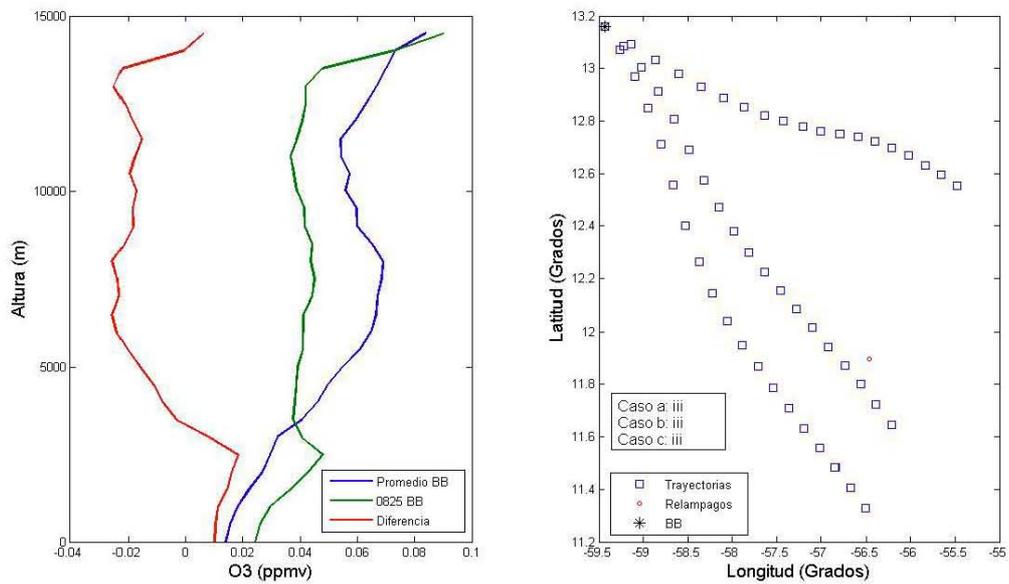


Figura I-19. Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

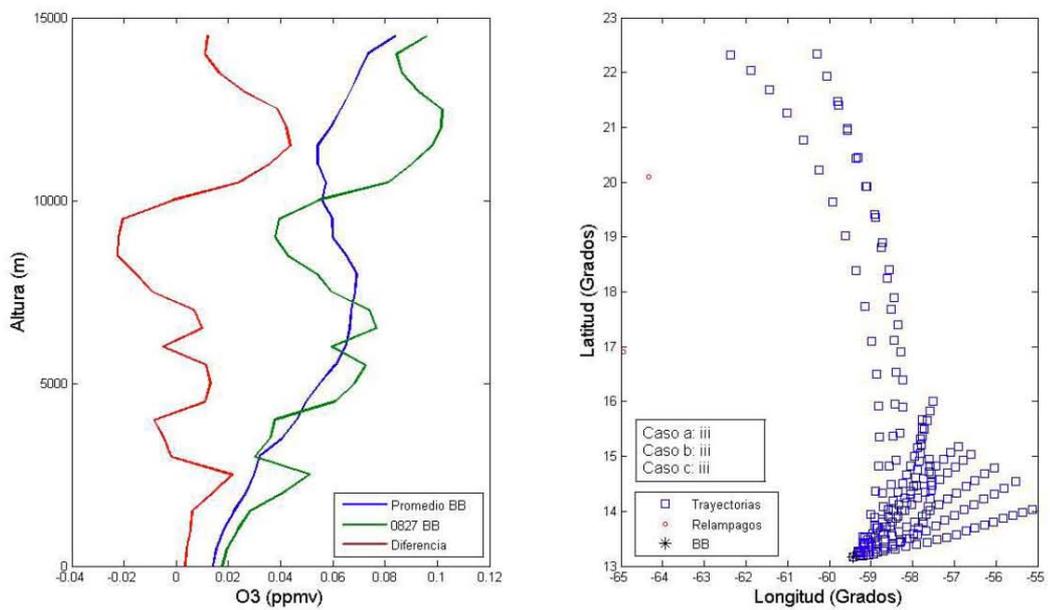


Figura I-20. Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

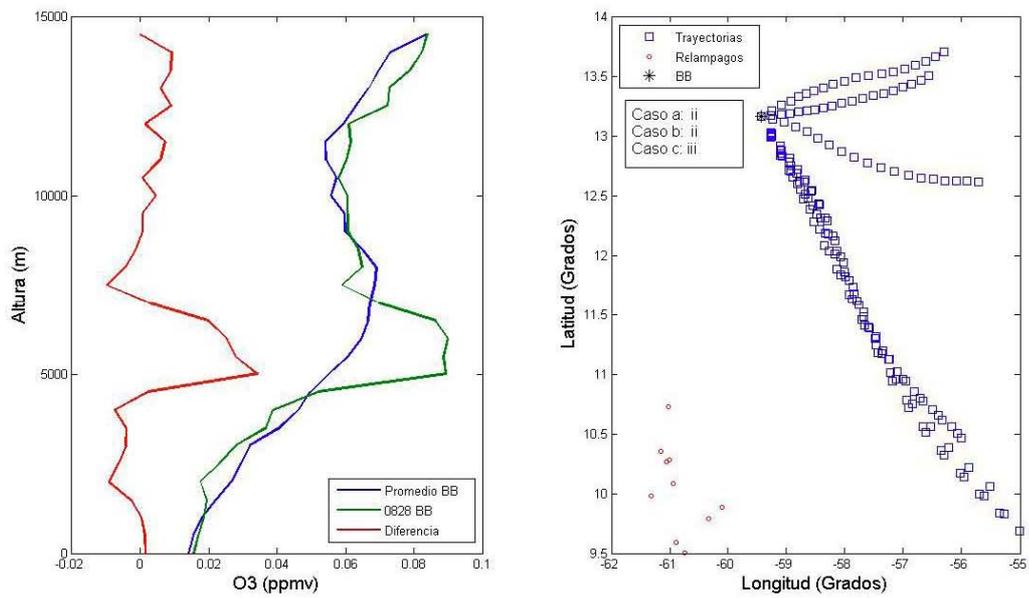


Figura I-21. Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

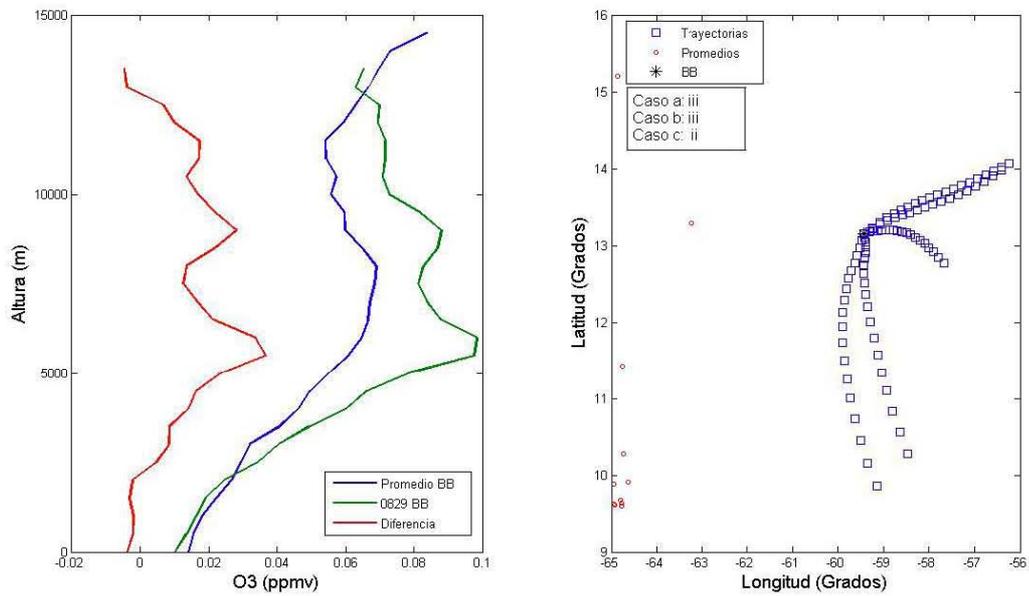


Figura I-22. Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

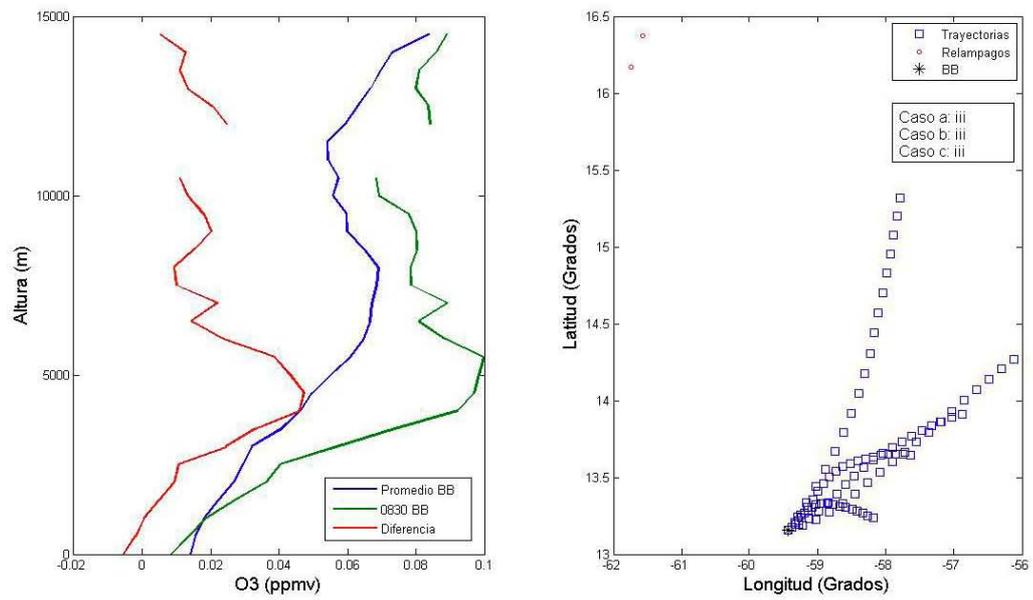


Figura I-23. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en BB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

APENDICE II

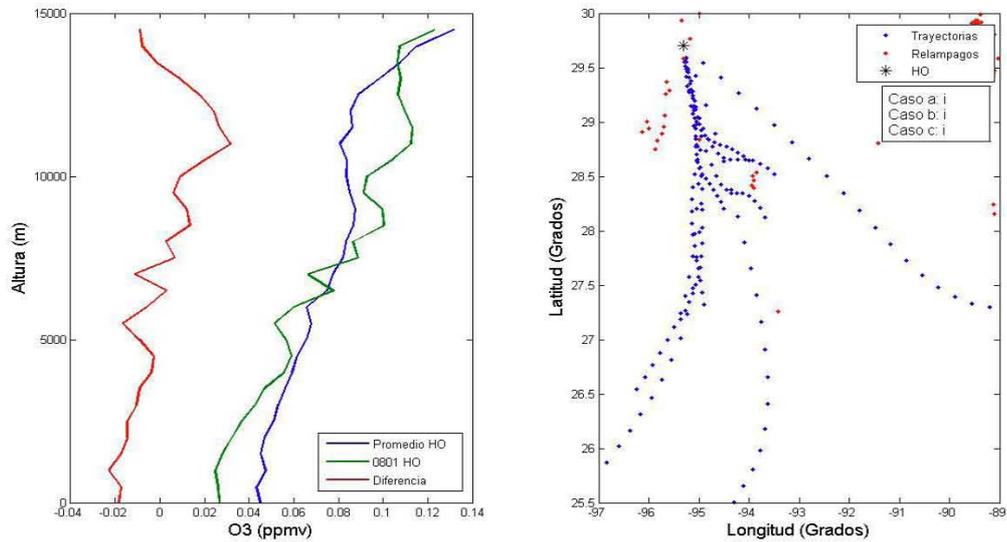


Figura II-1. *Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

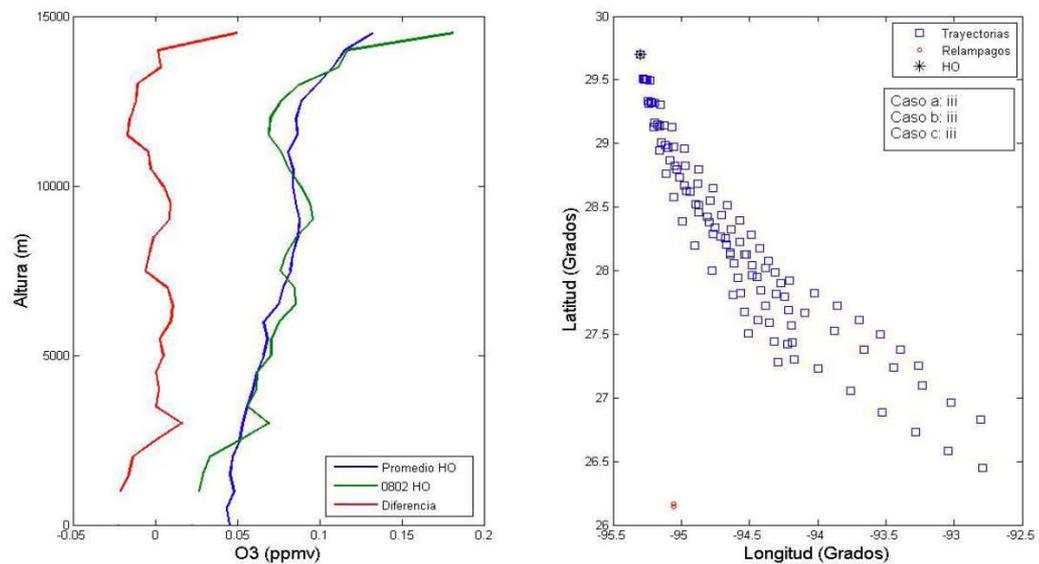


Figura II-2. *Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

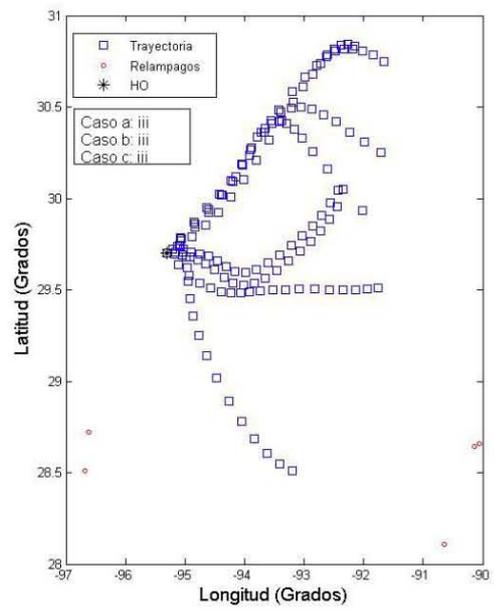
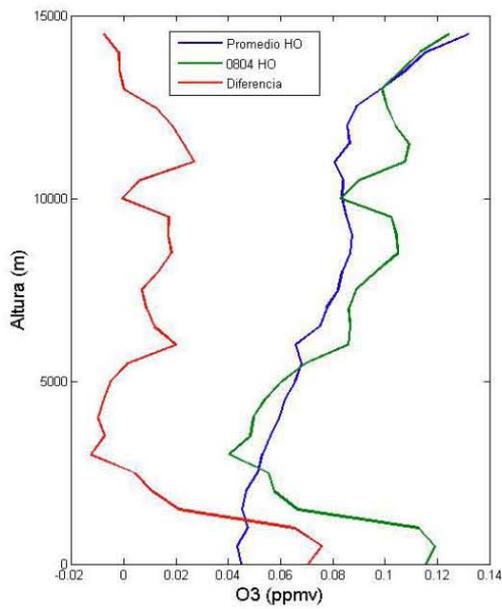
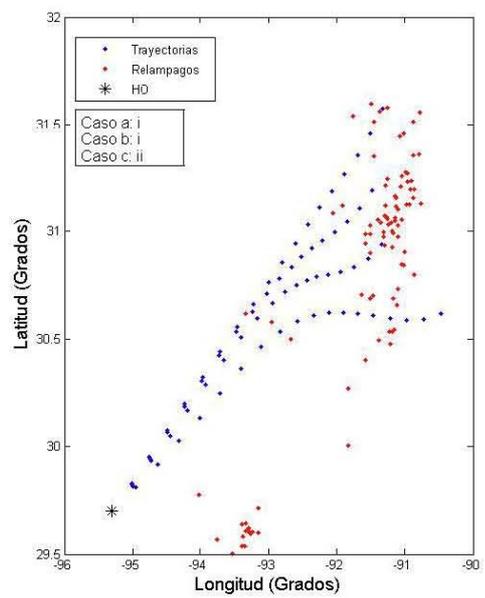
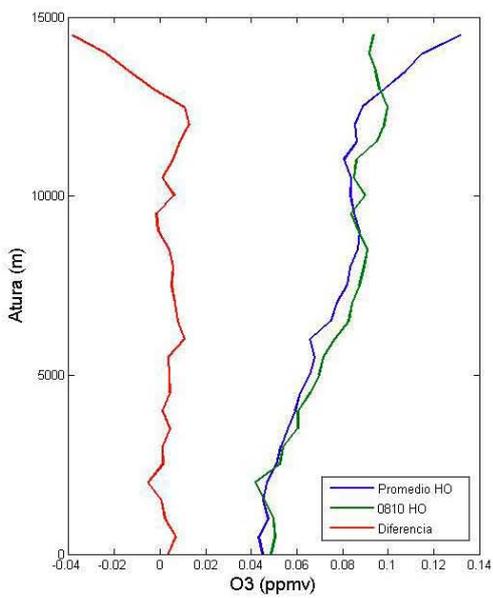


Figura II-3. *Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*



FiguraII- 4. *Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

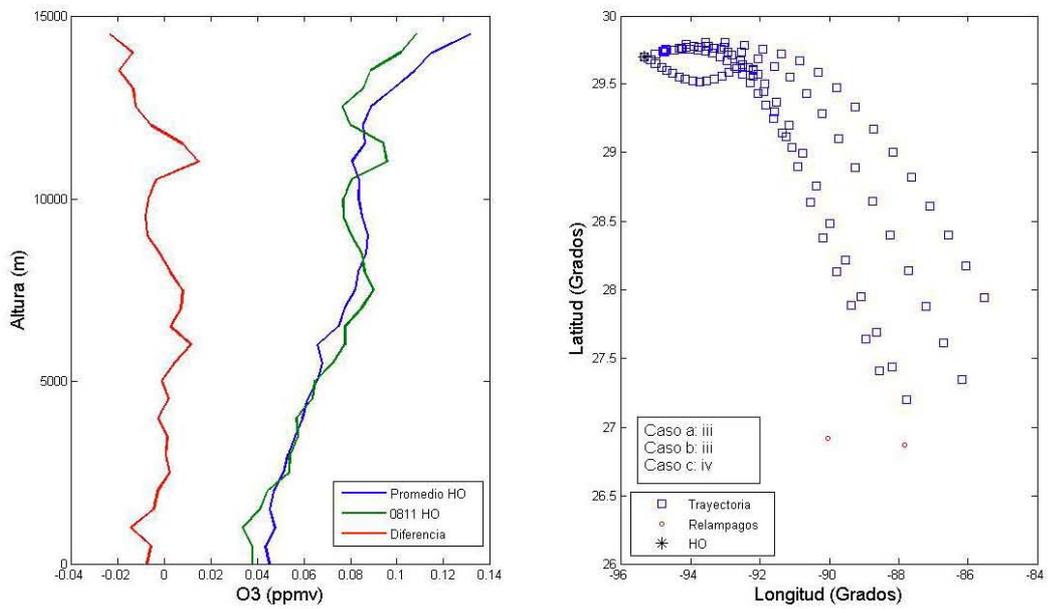


Figura II-5. *Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

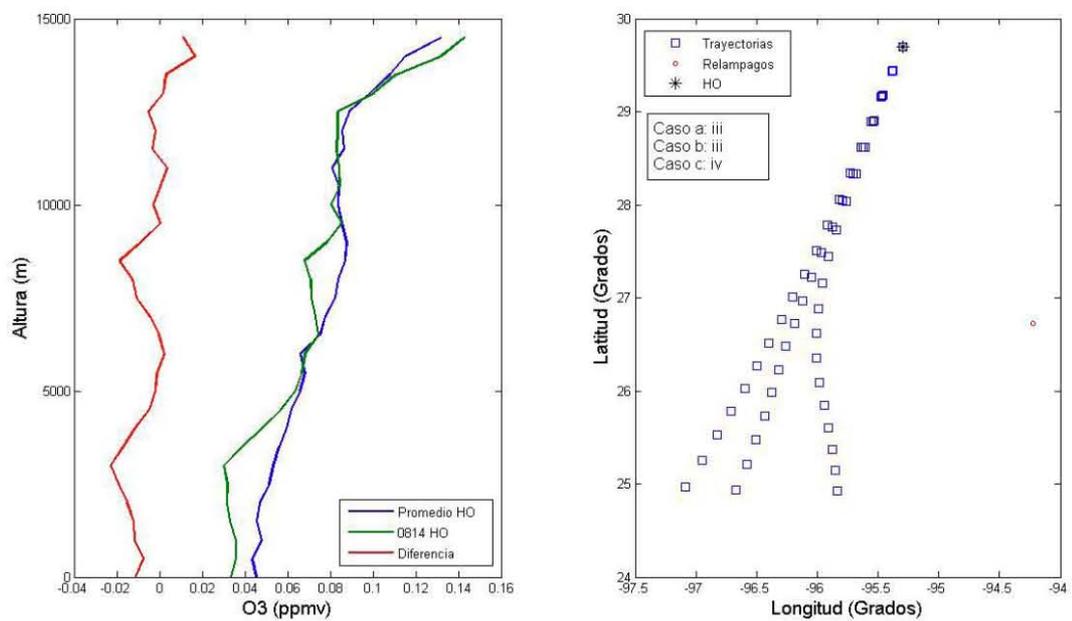


Figura II-6. *Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

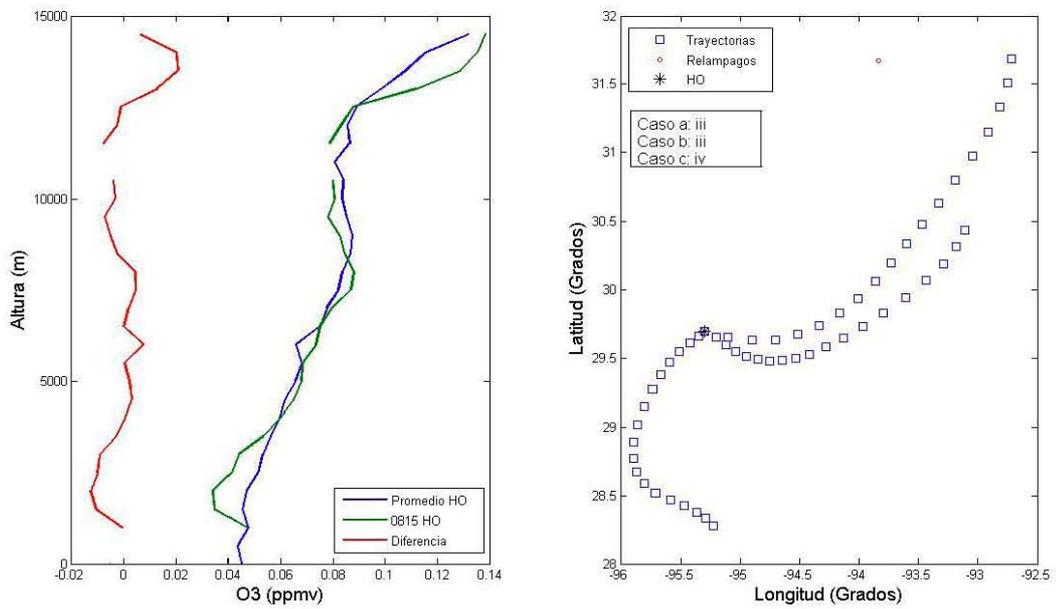


Figura II-7. *Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

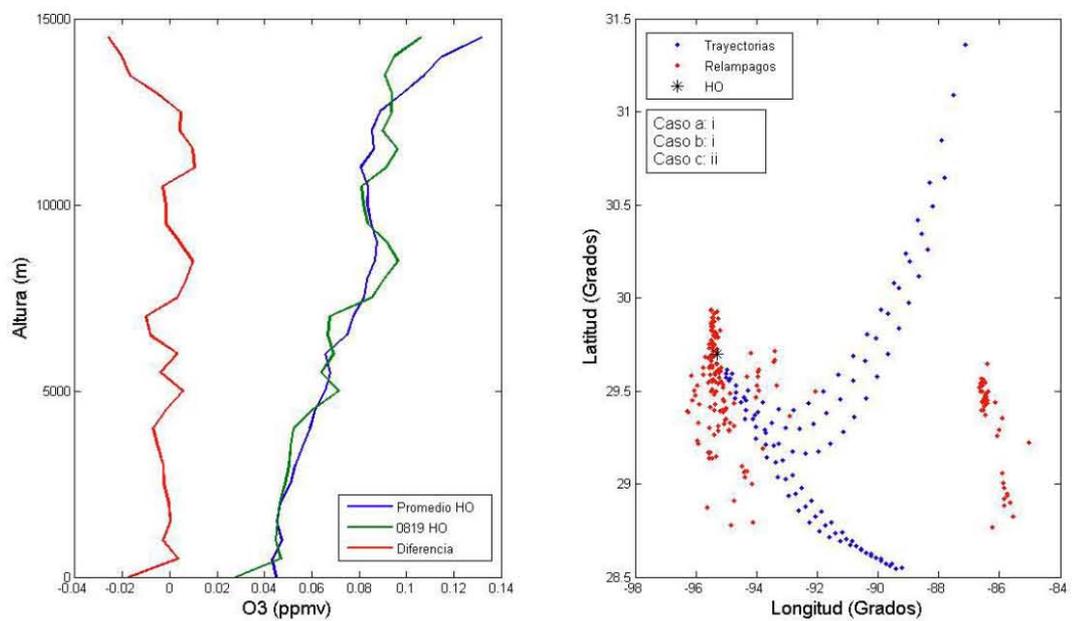


Figura II-8. *Perfiles de ozono promedio para el día 19 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

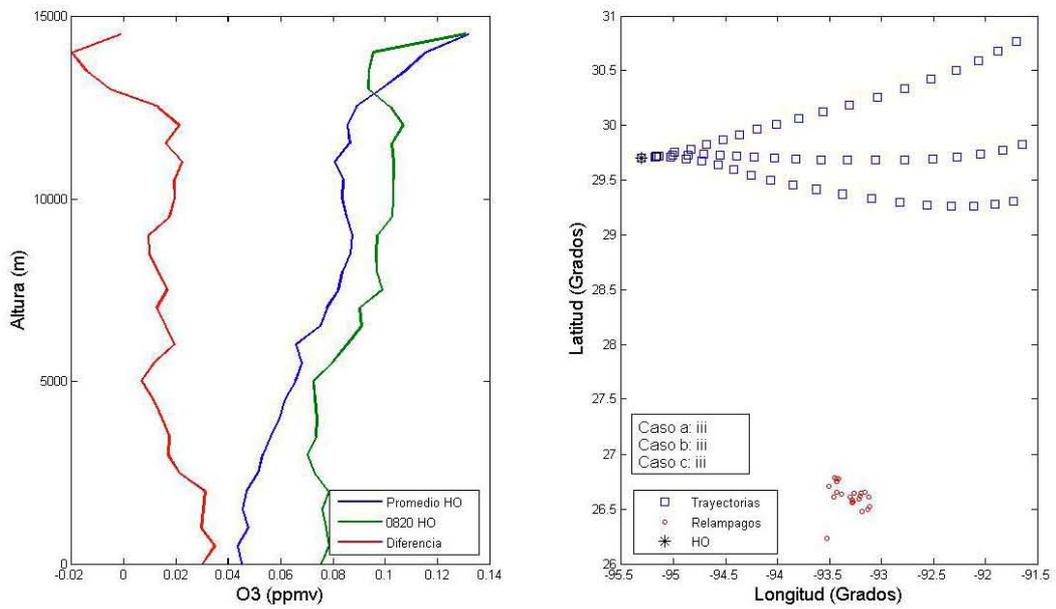


Figura II-9. *Perfiles de ozono promedio para el día 20 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

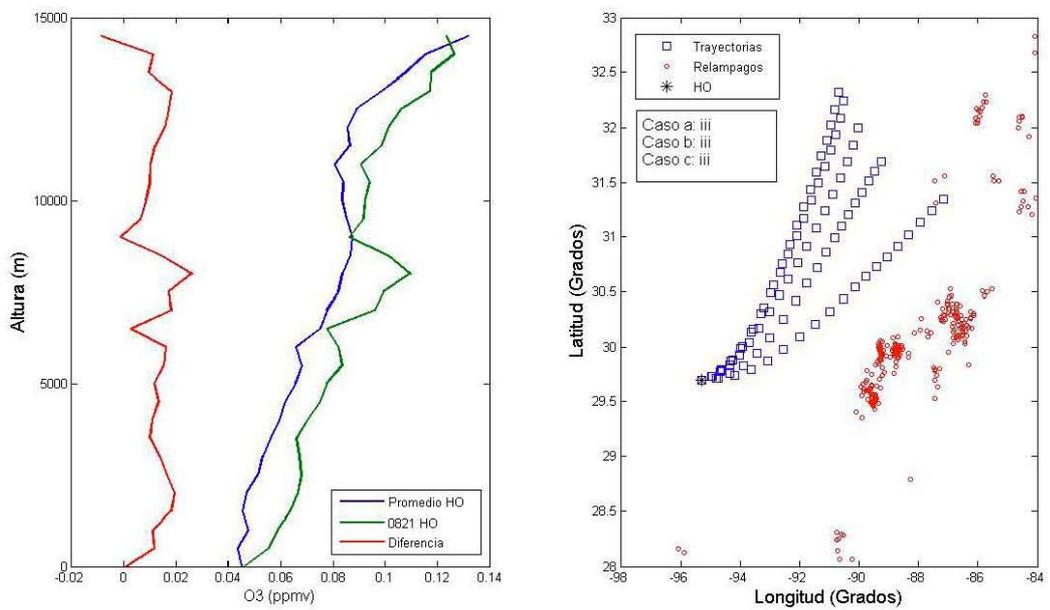


Figura II-10. *Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

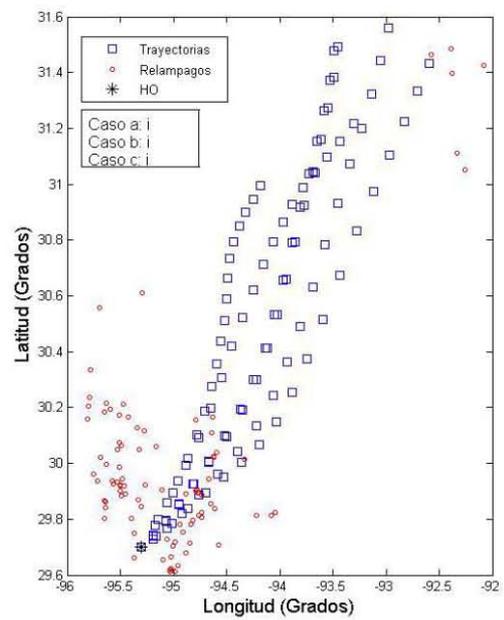
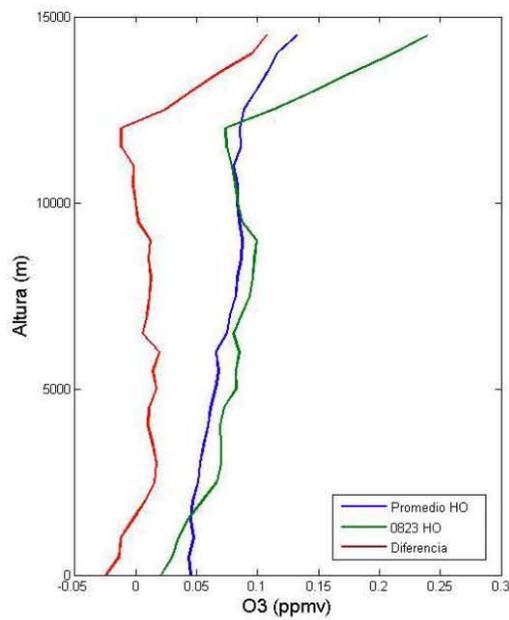


Figura II-11. *Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

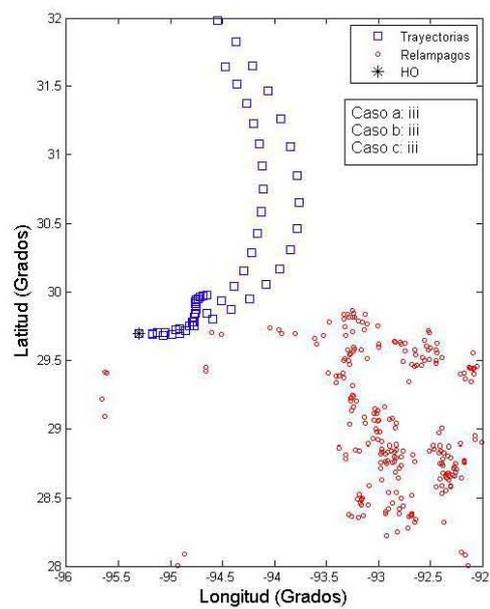
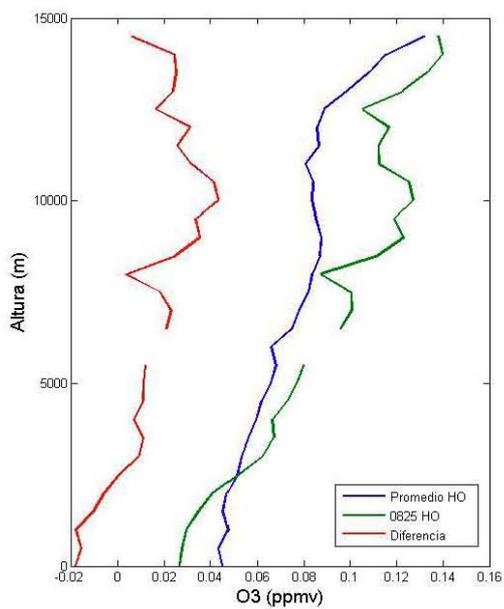


Figura II-12. *Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

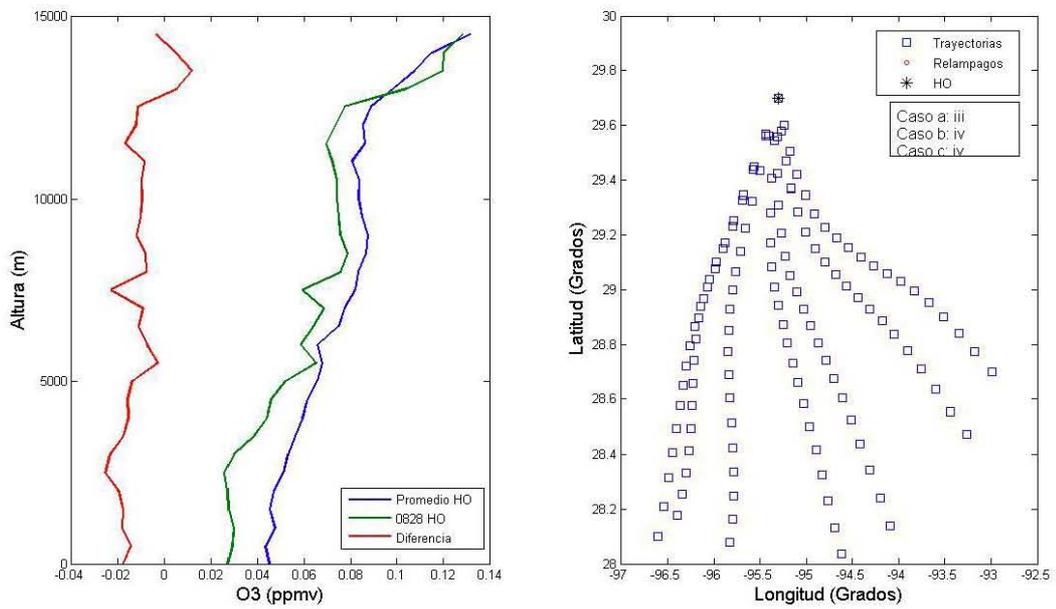


Figura II-13. *Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

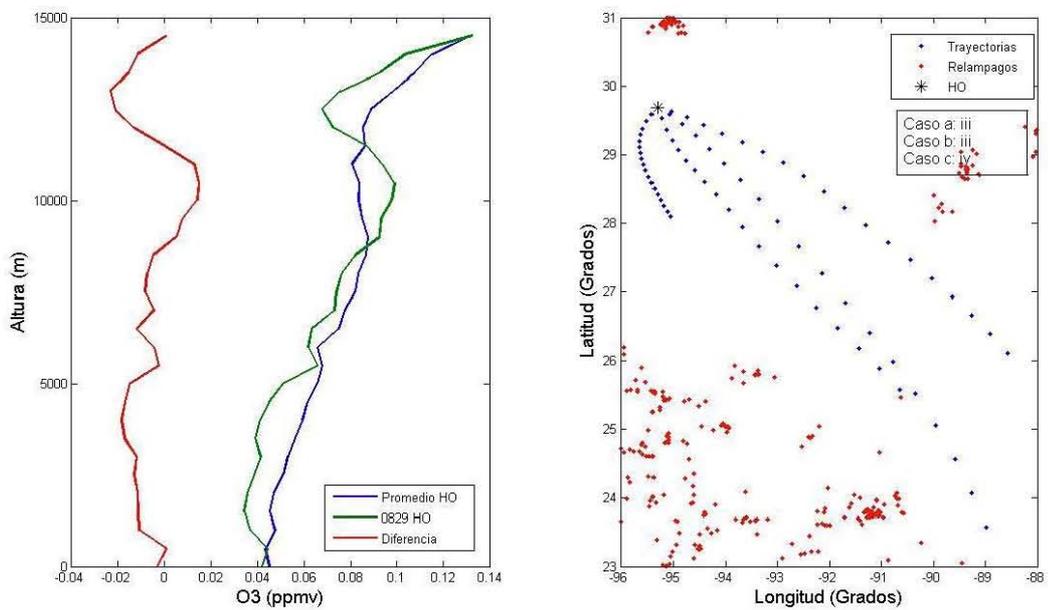


Figura II-14. *Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

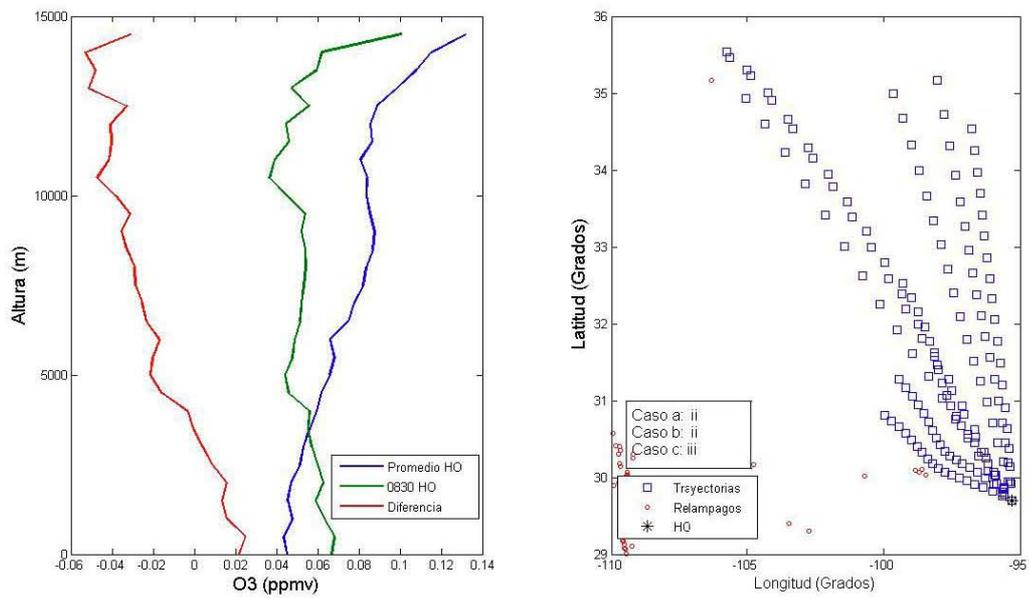


Figura II-15. Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

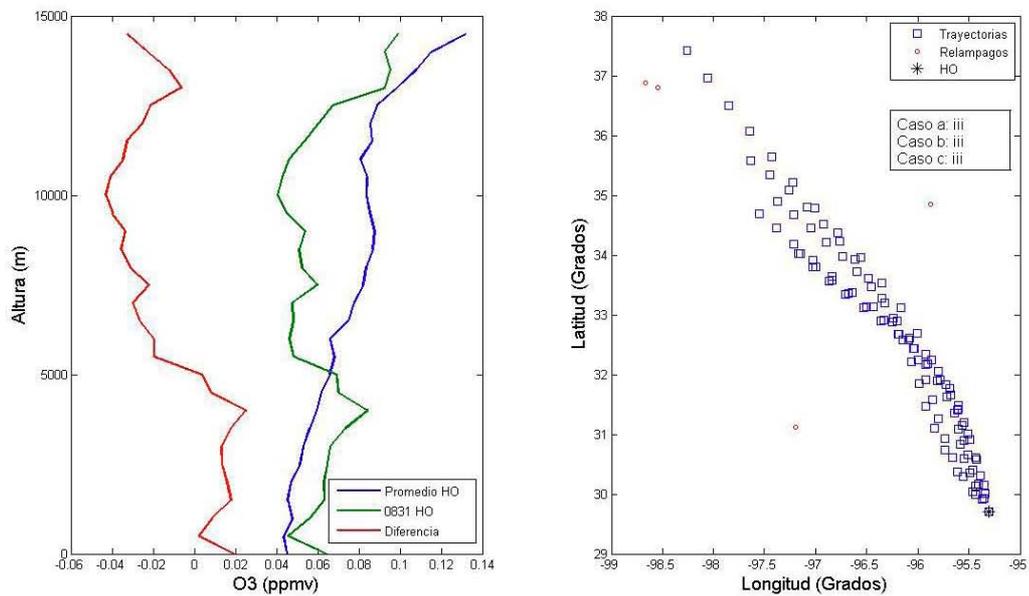


Figura II-16. Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en HO (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

APENDICE III

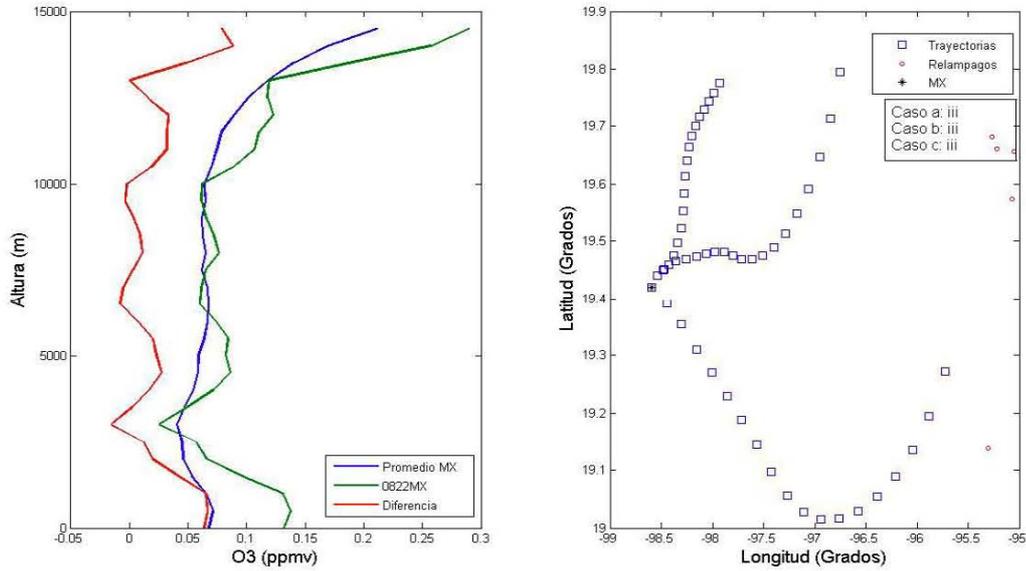


Figura III-1. Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

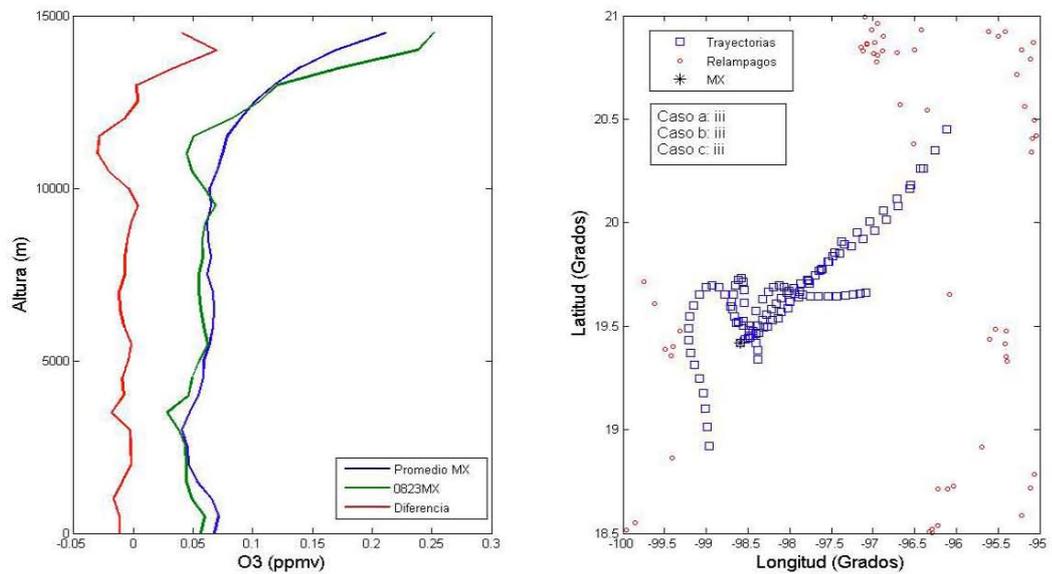


Figura III-2. Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

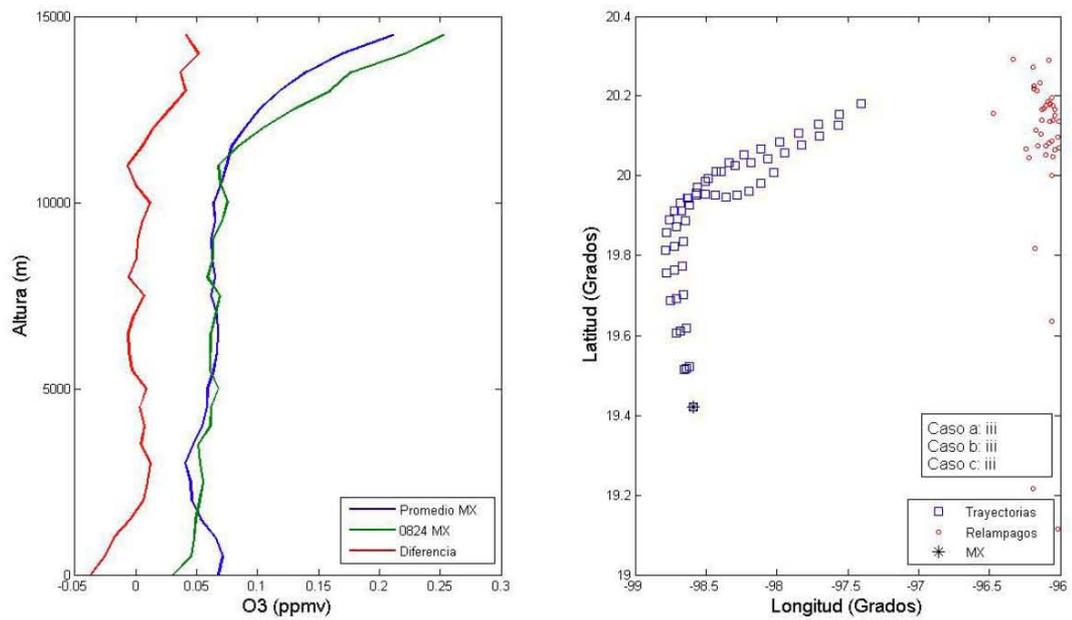


Figura III-3. Perfiles de ozono promedio para el día 24 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

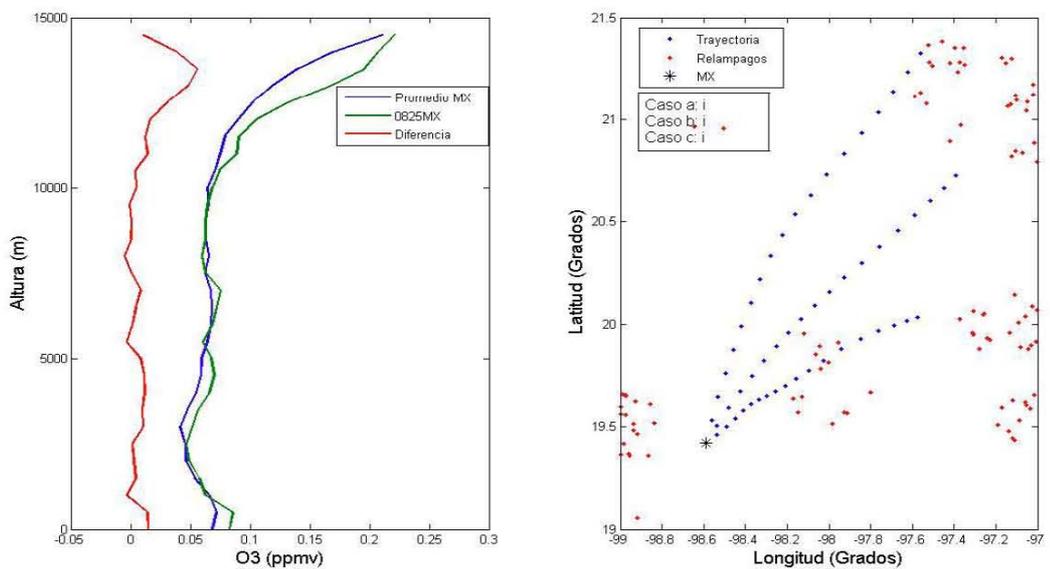


Figura III-4. Perfiles de ozono promedio para el día 25 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

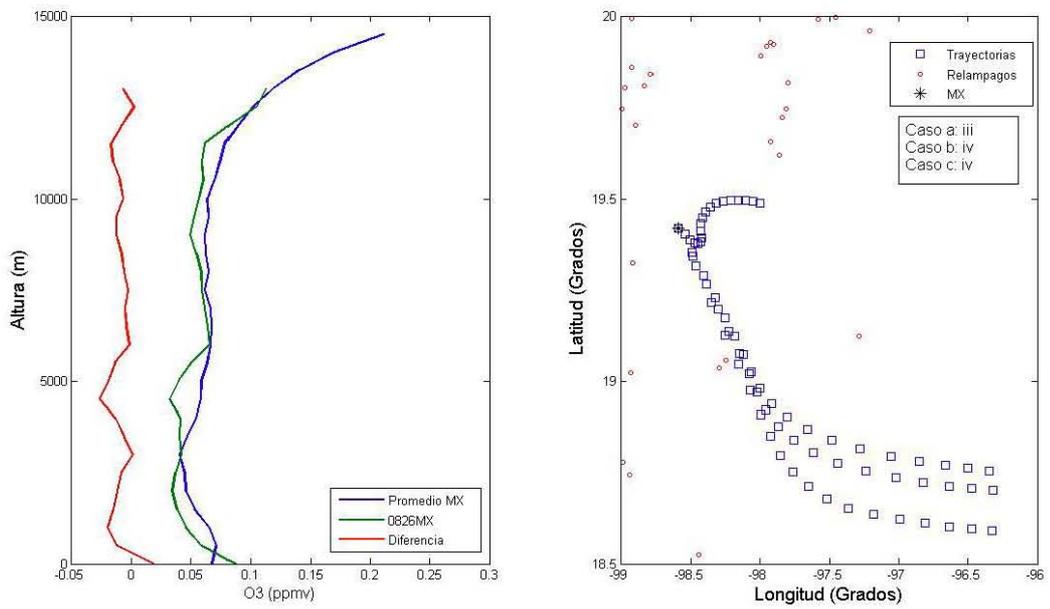


Figura III-5. *Perfiles de ozono promedio para el día 26 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

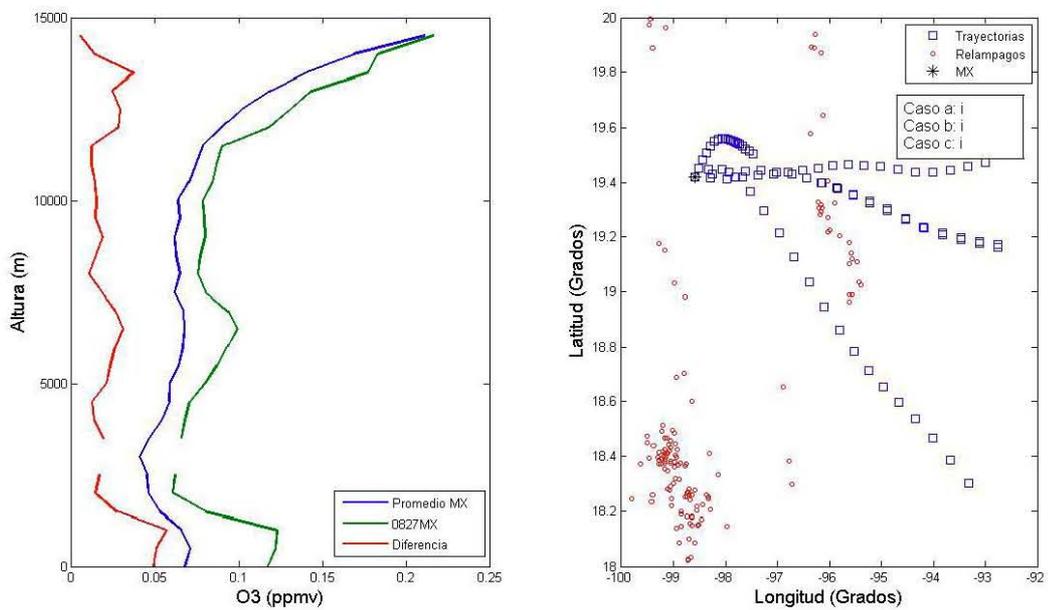


Figura III-6. *Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

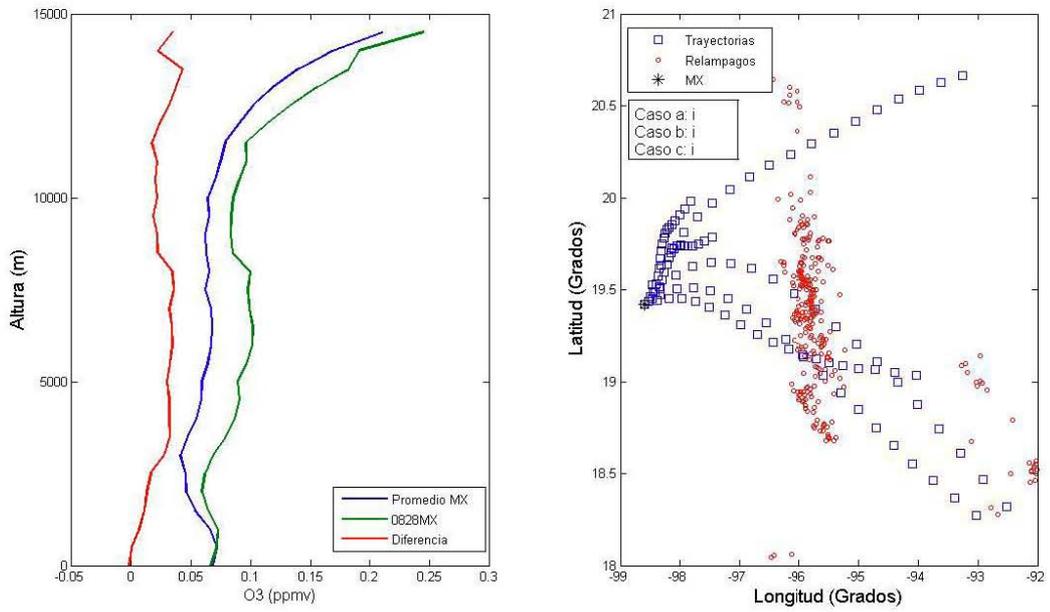


Figura III-7. *Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

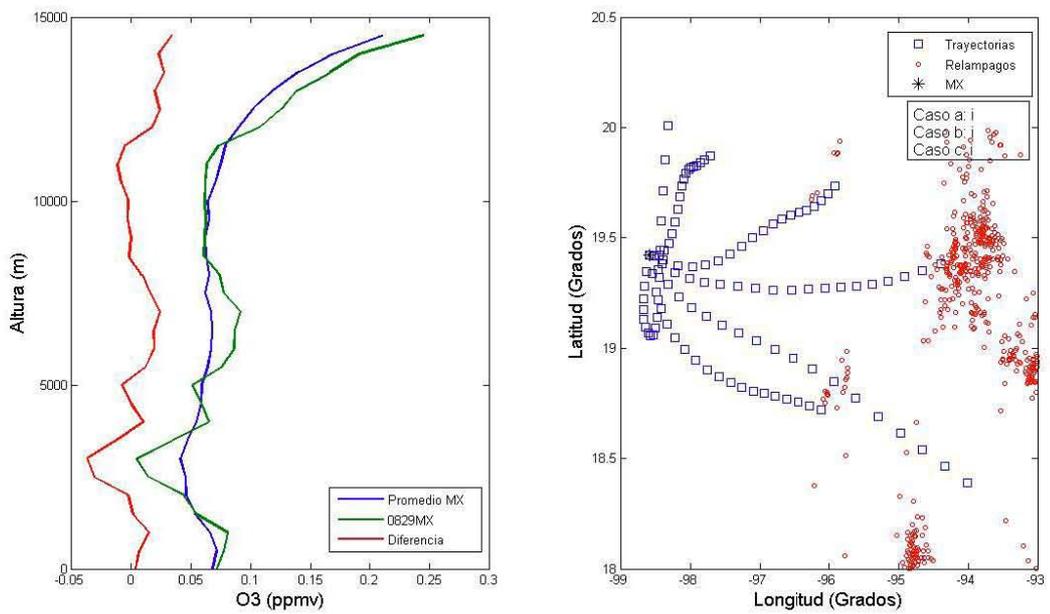


Figura III-8. *Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

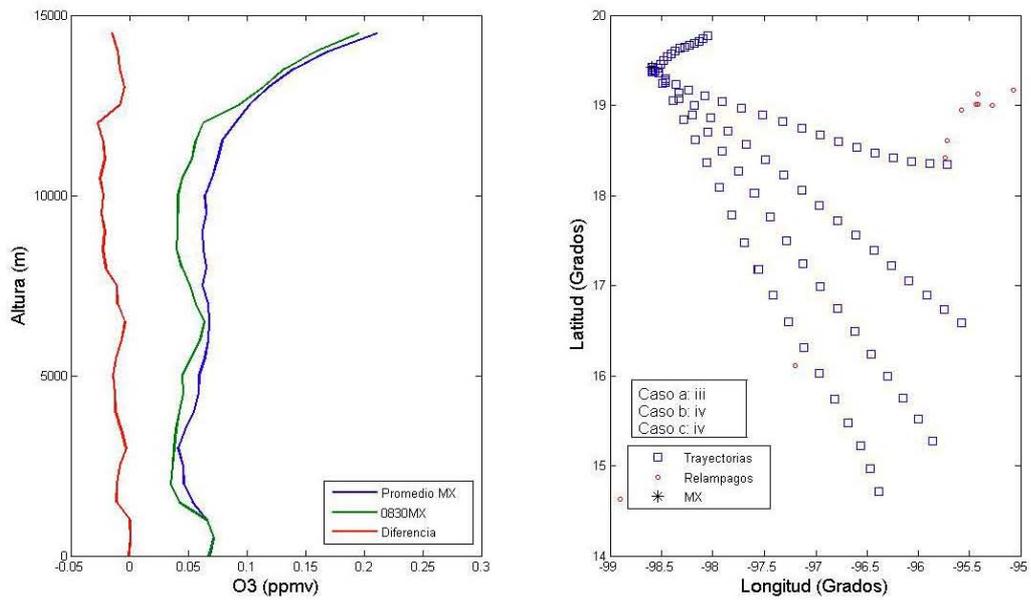


Figura III-9. *Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

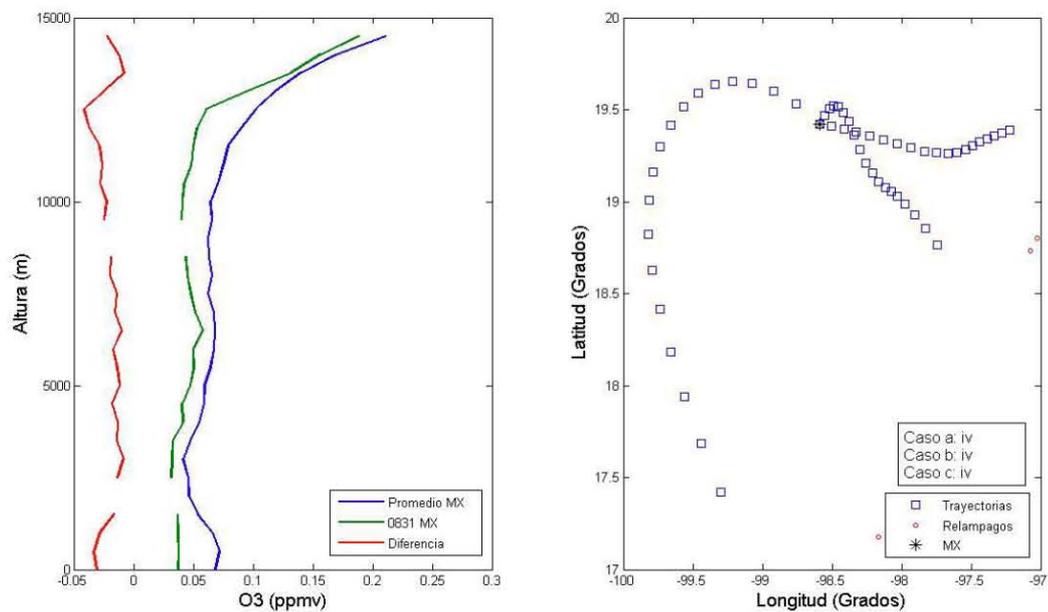


Figura III-10. *Perfiles de ozono promedio para el día 31 de Agosto en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

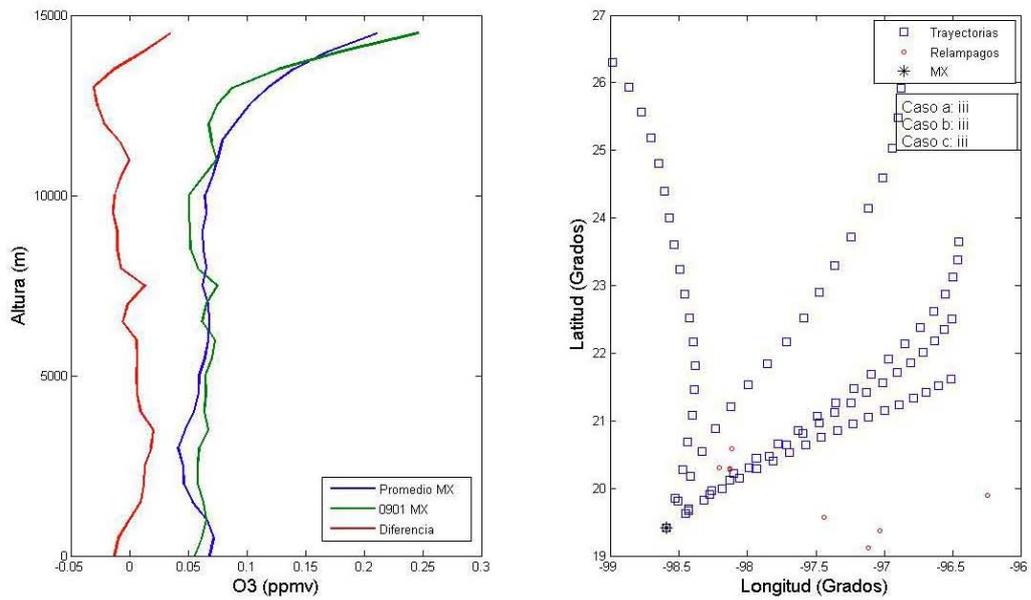


Figura III-11. *Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

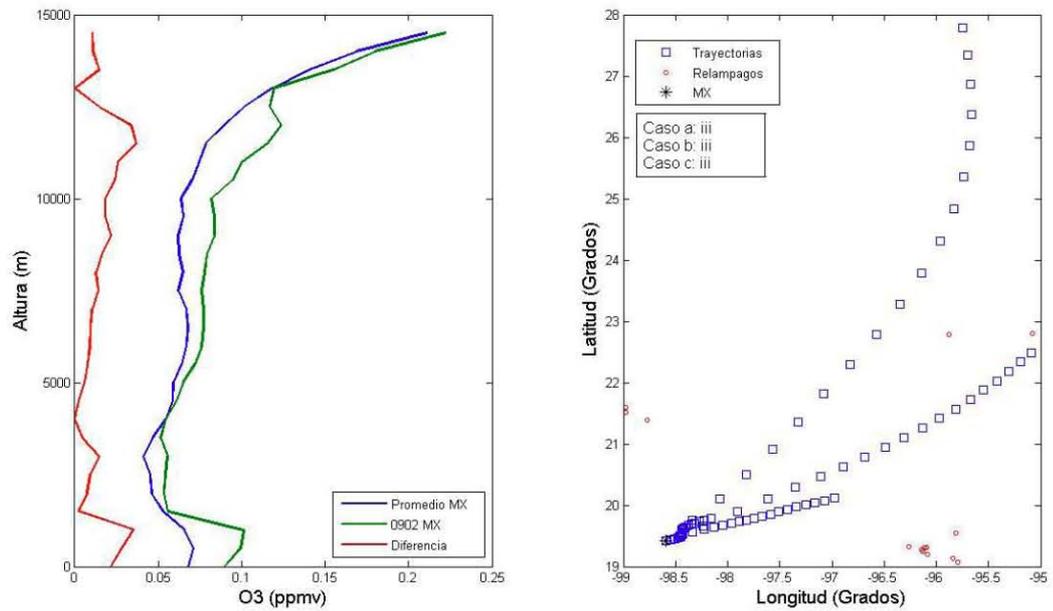


Figura III-12. *Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

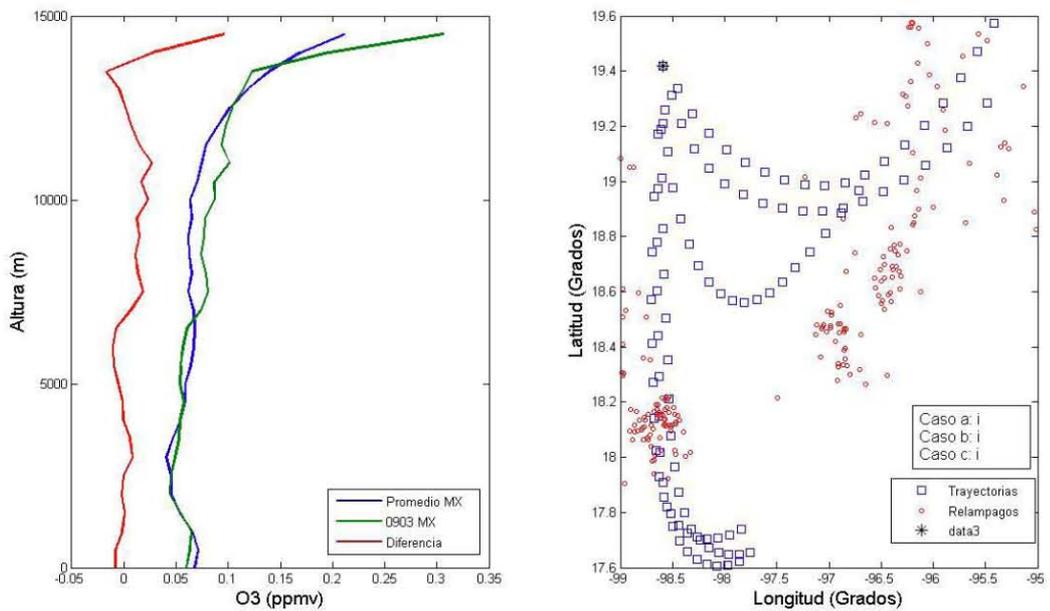


Figura III-13. *Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

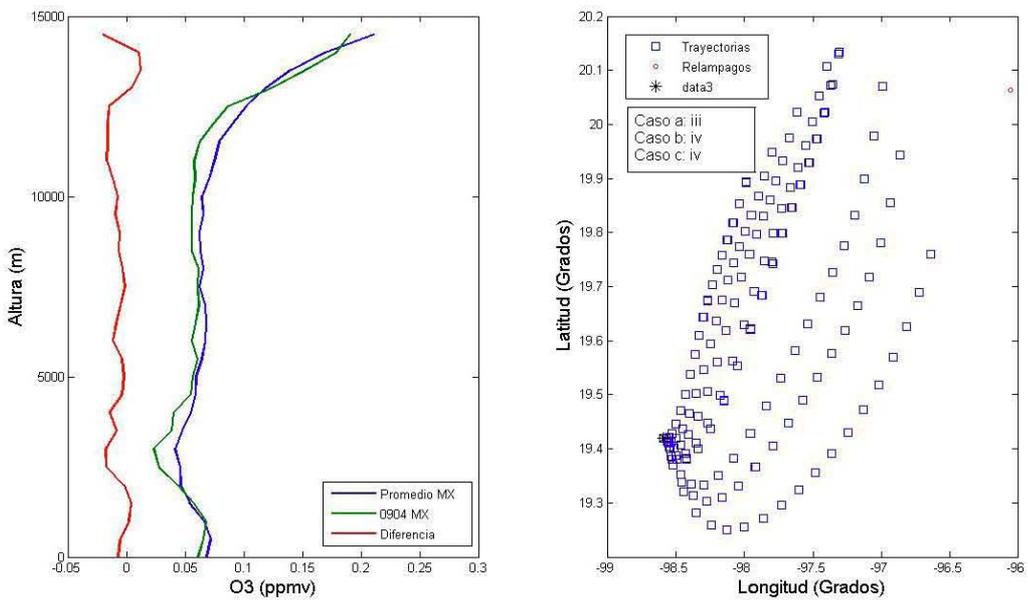


Figura III-14. *Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

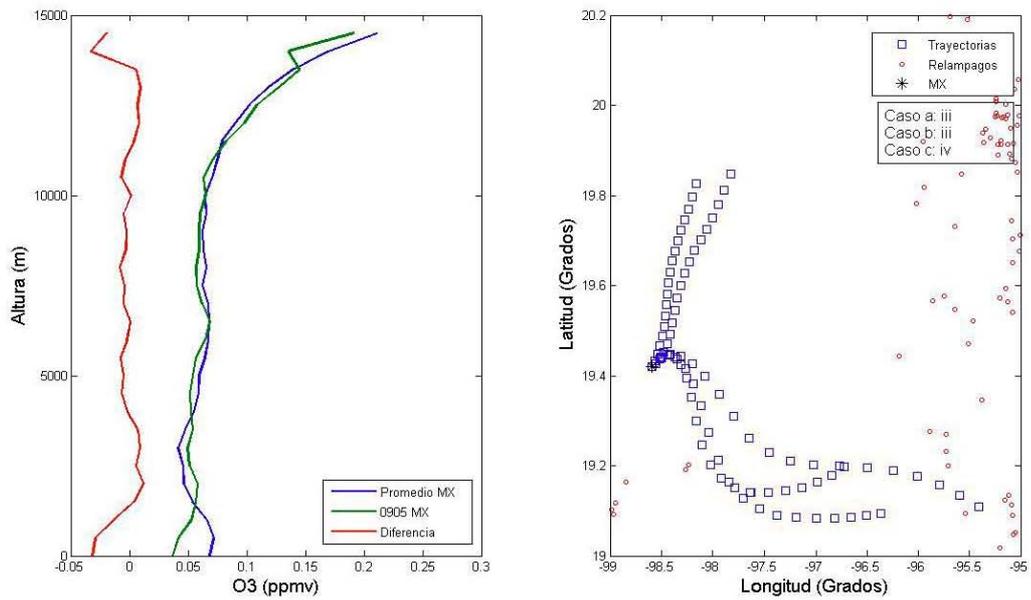


Figura III-15. *Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

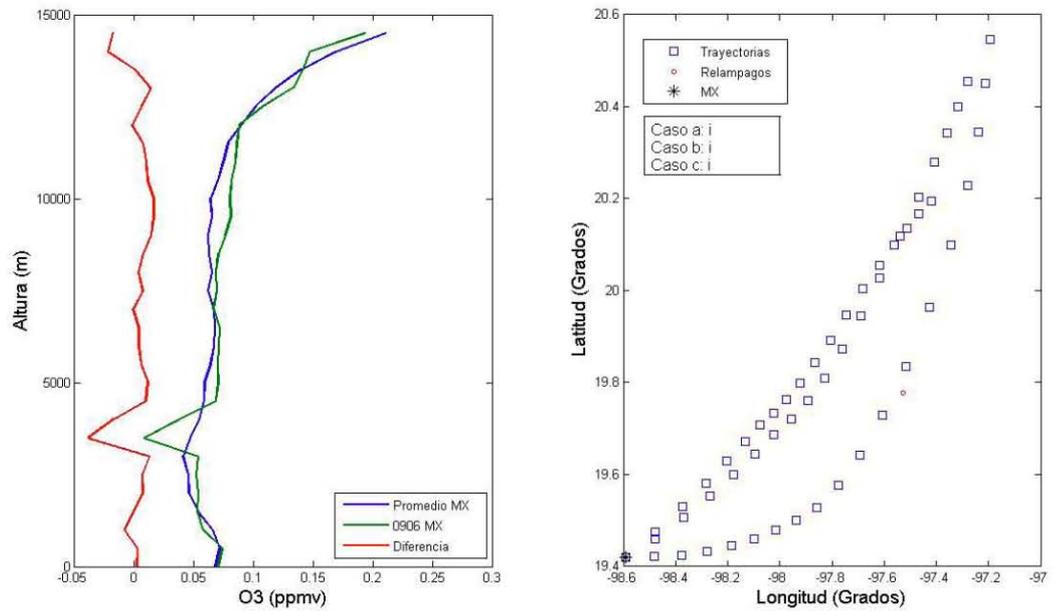


Figura III-16. *Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

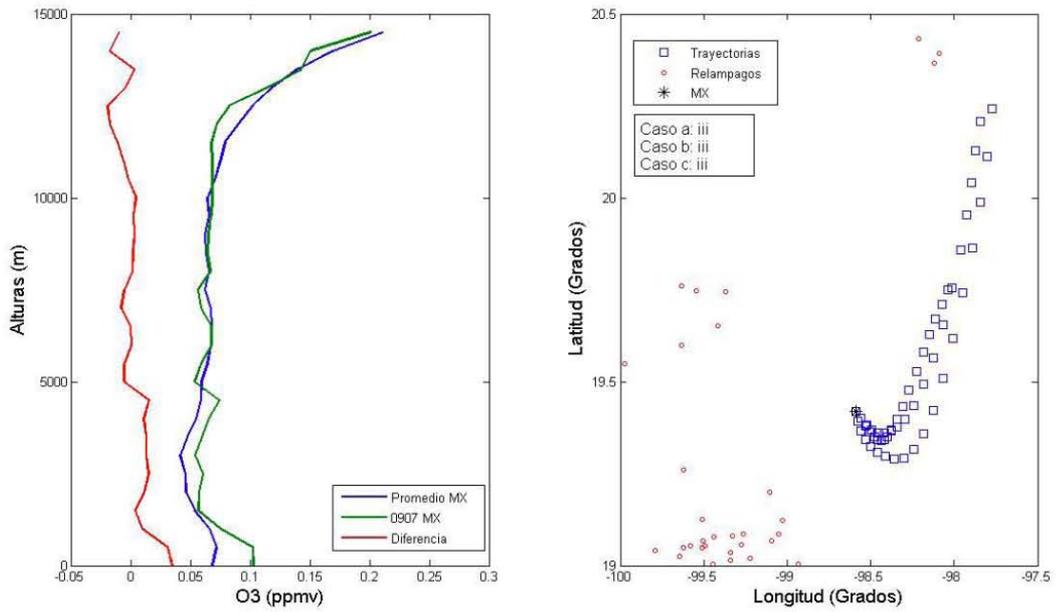


Figura III-17. Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

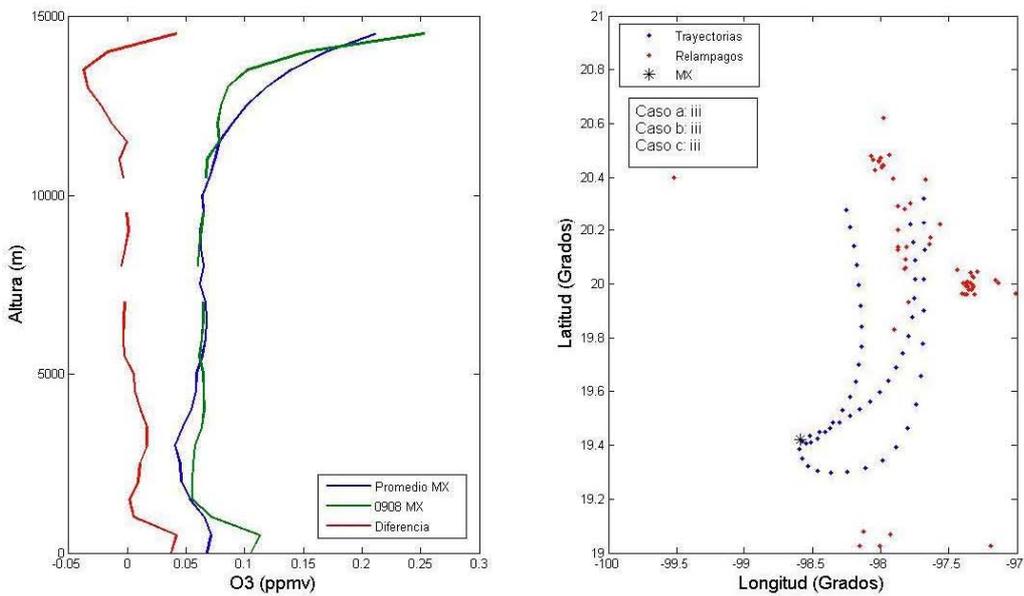


Figura III-18. Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

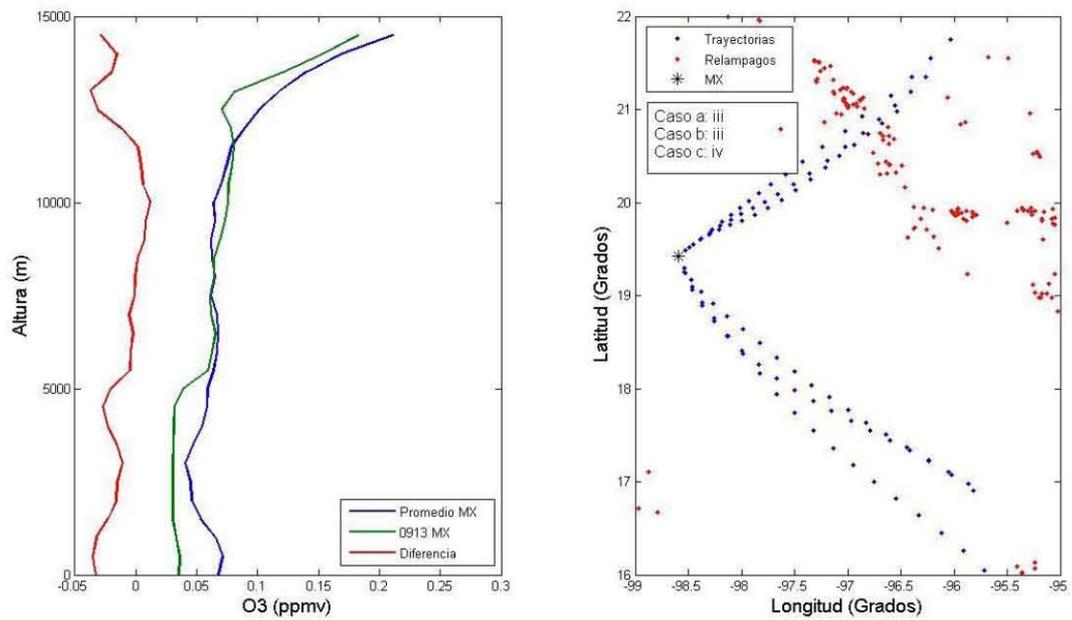


Figura III-19. *Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

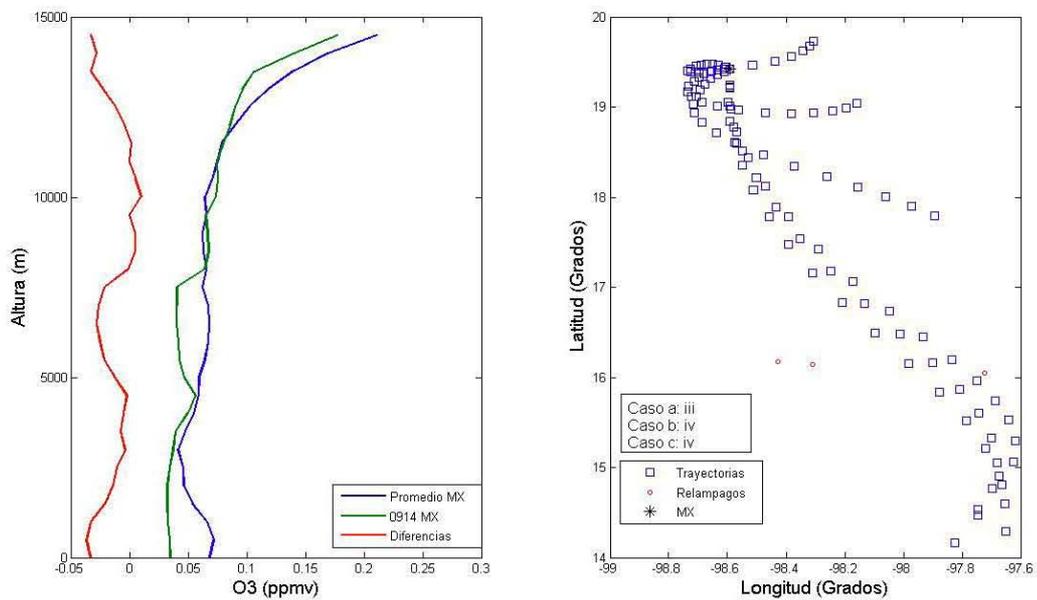


Figura III-20. *Perfiles de ozono promedio para el día 14 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

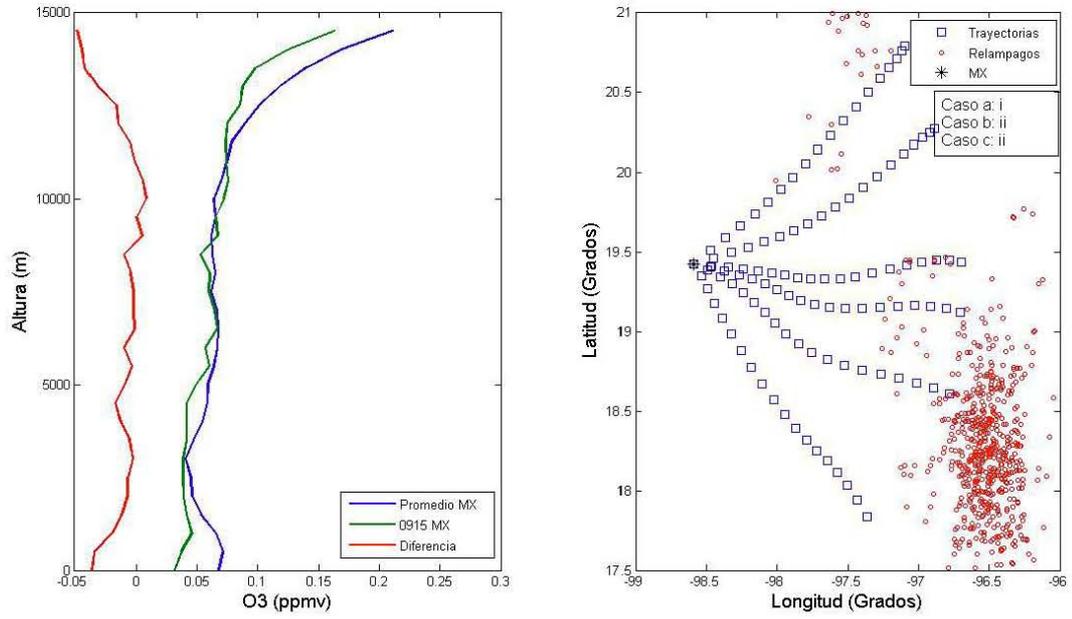


Figura III-21. *Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Septiembre en MX (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

APENDICE IV

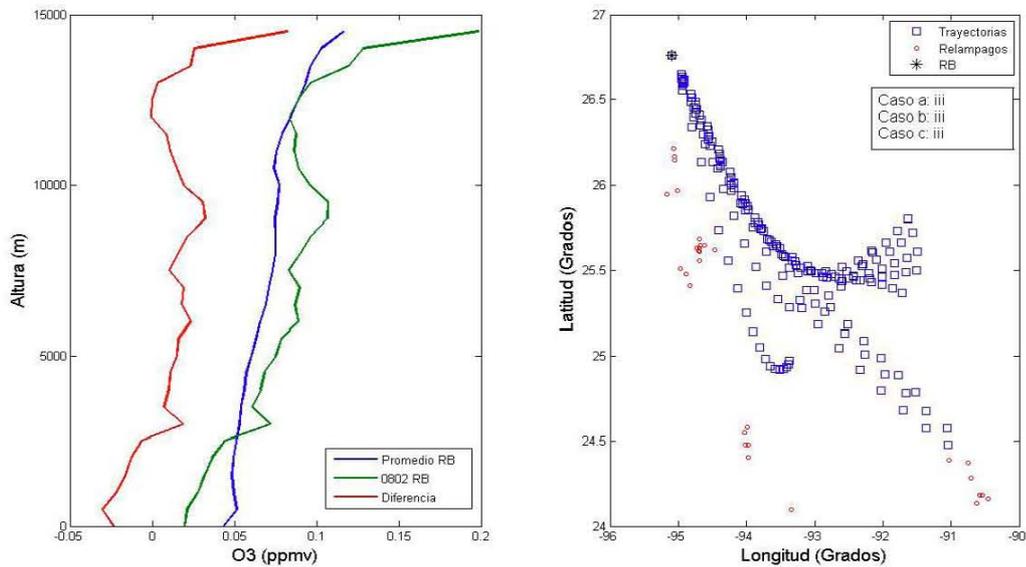


Figura IV-1. Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

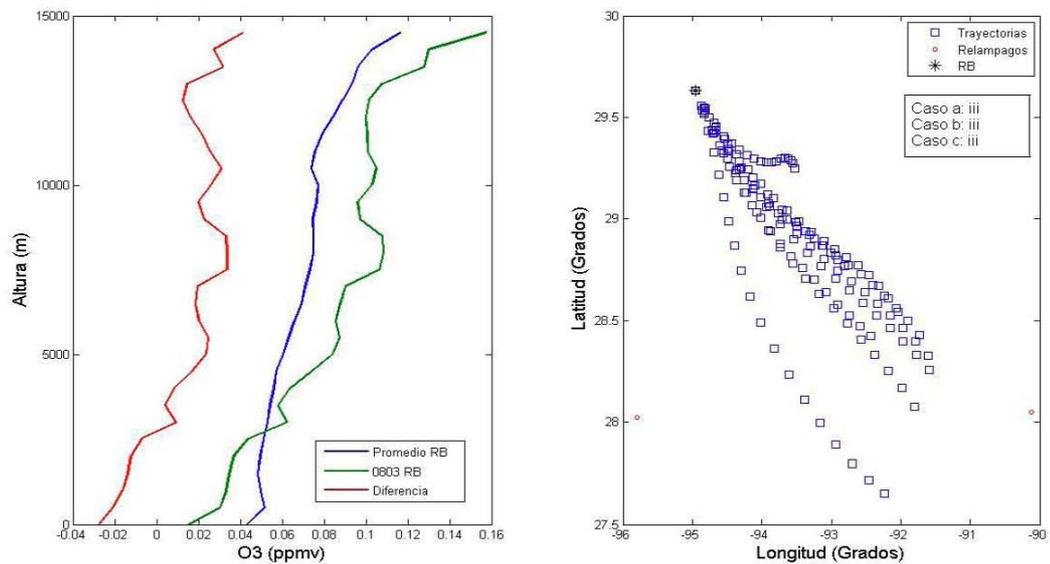


Figura IV-2. Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

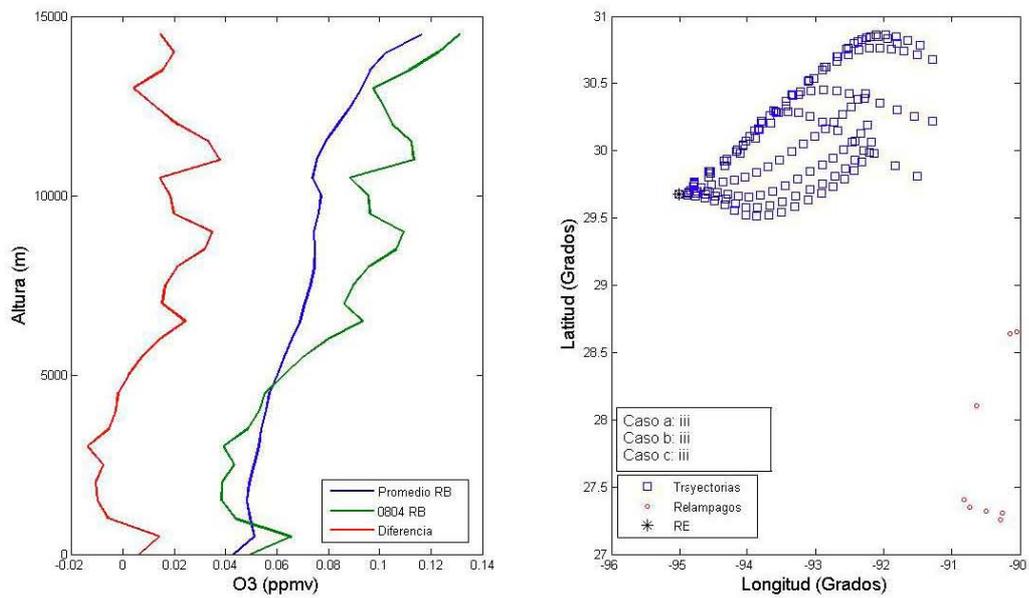


Figura IV-3. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

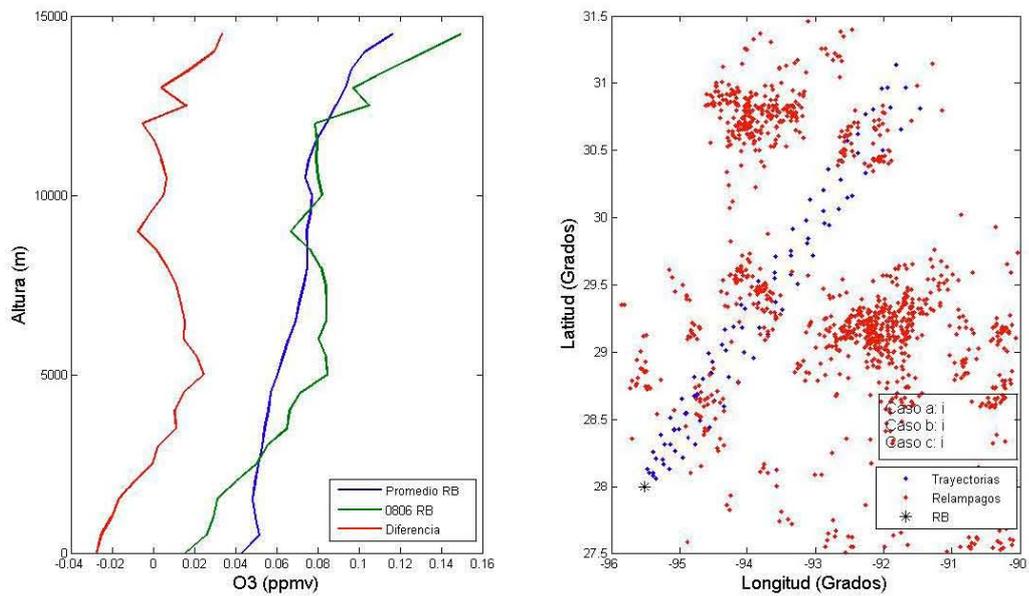


Figura IV-4. Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

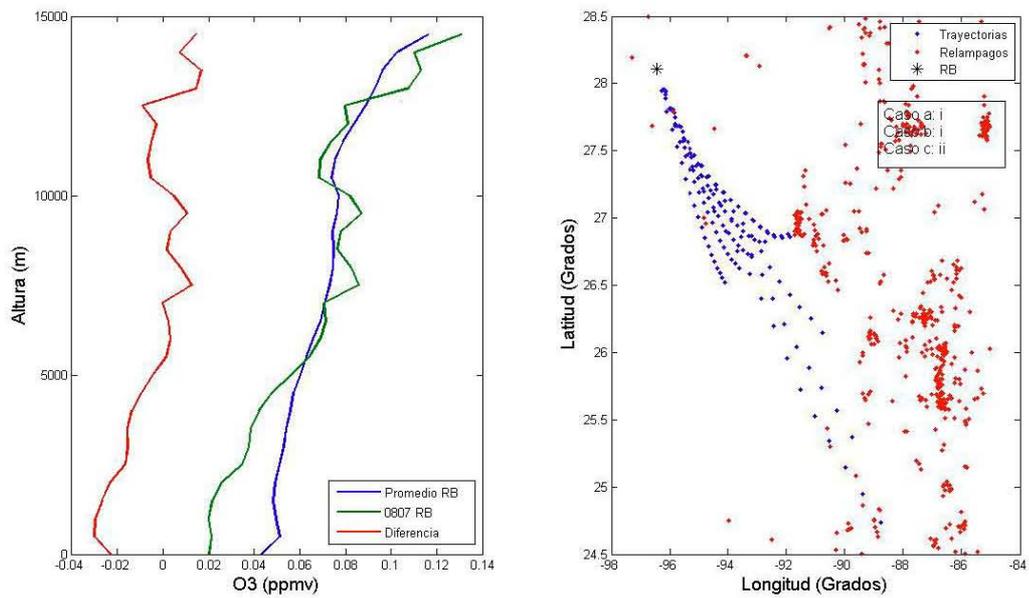


Figura IV-5. Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

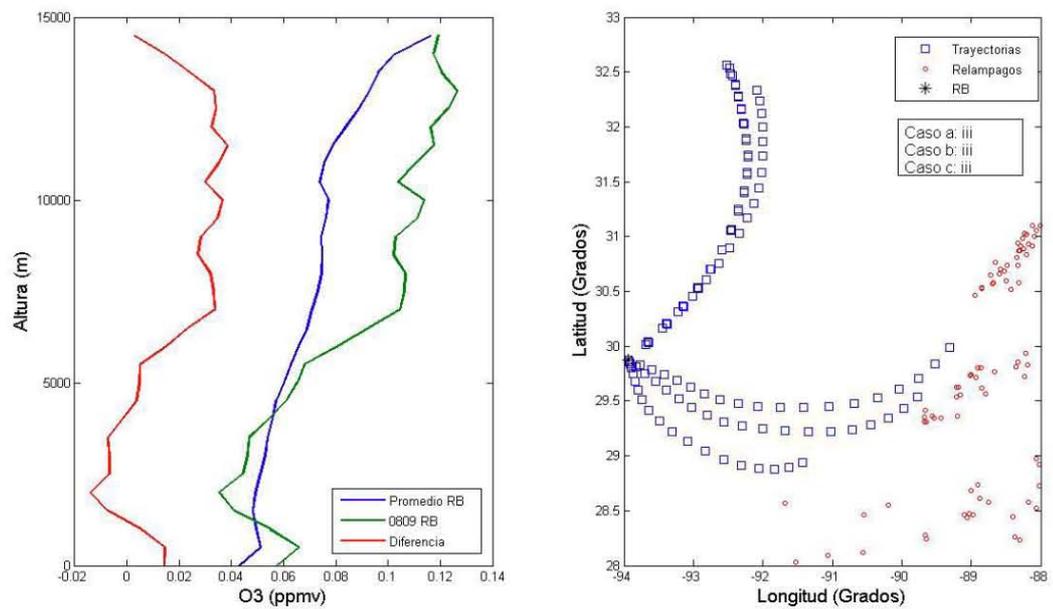


Figura IV-6. Perfiles de ozono promedio para el día 09 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

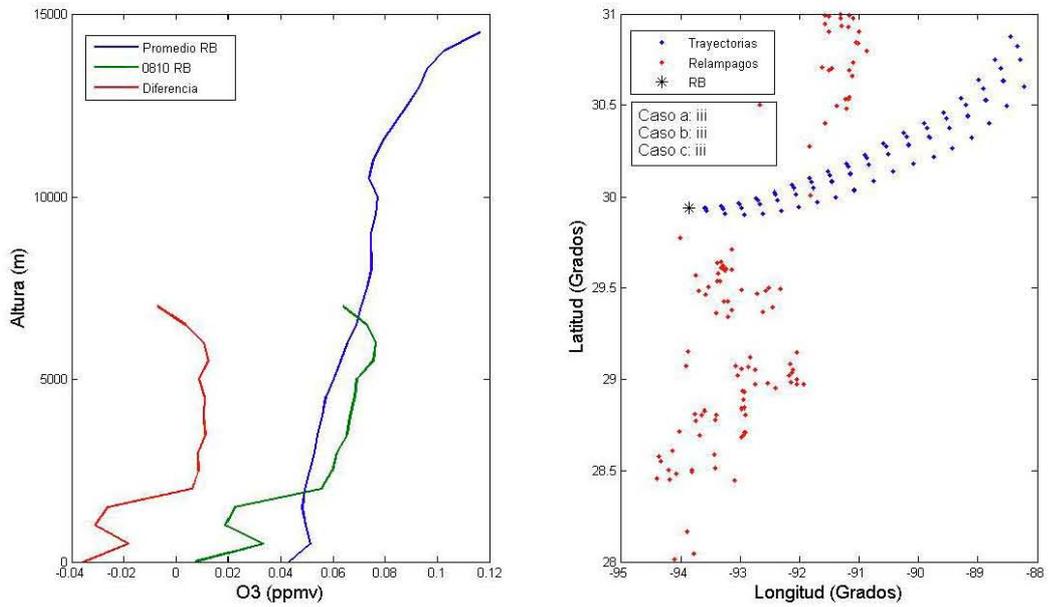


Figura IV-7. Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

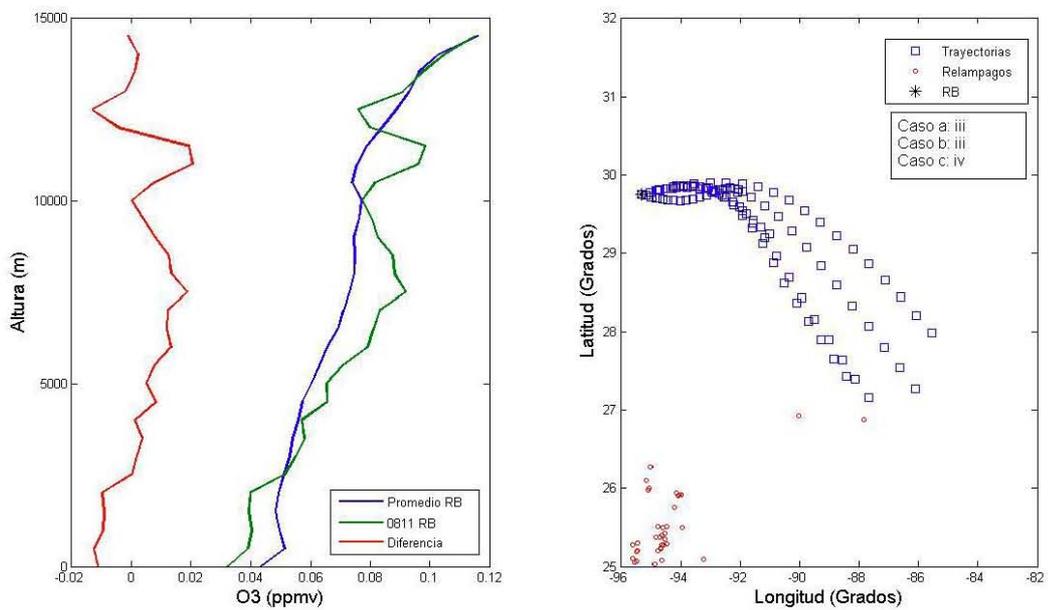


Figura IV-8. Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

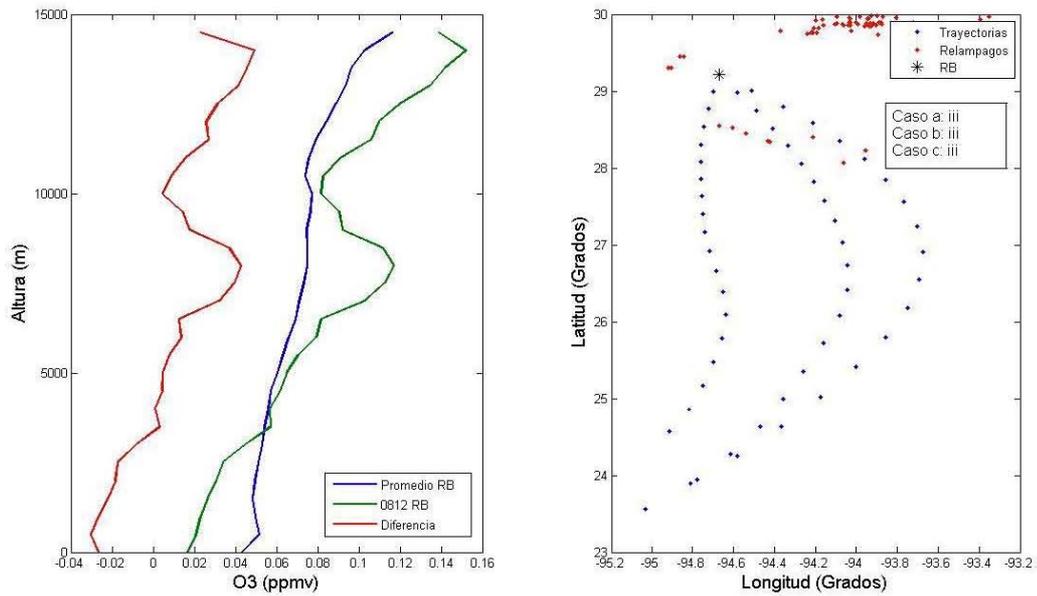


Figura IV-9. *Perfiles de ozono promedio para el día 12 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

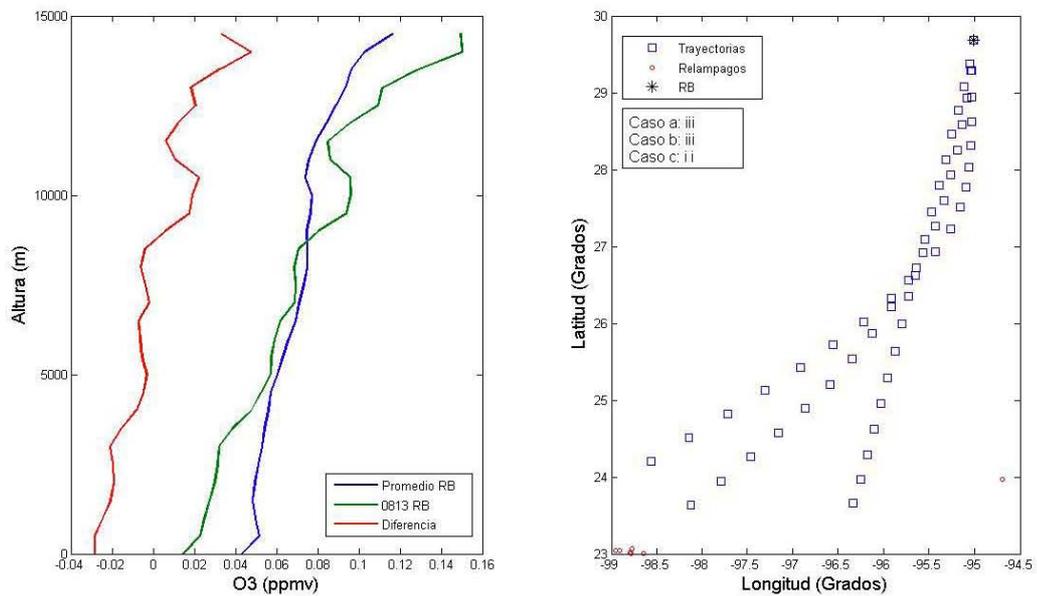


Figura IV-10. *Perfiles de ozono promedio para el día 13 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

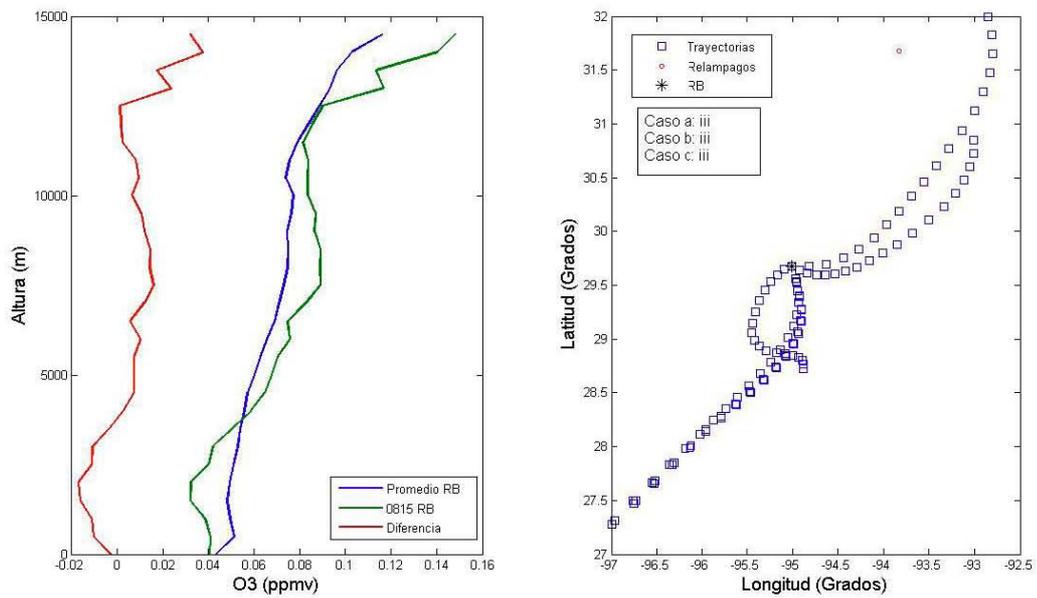


Figura IV-11. *Perfiles de ozono promedio para el día 15 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

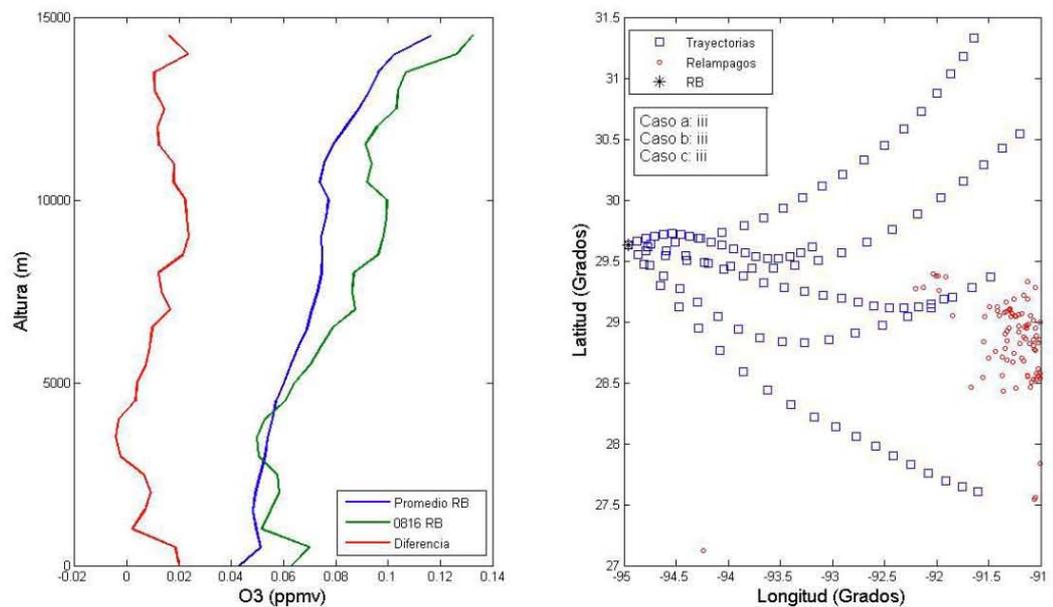


Figura IV-12. *Perfiles de ozono promedio para el día 16 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

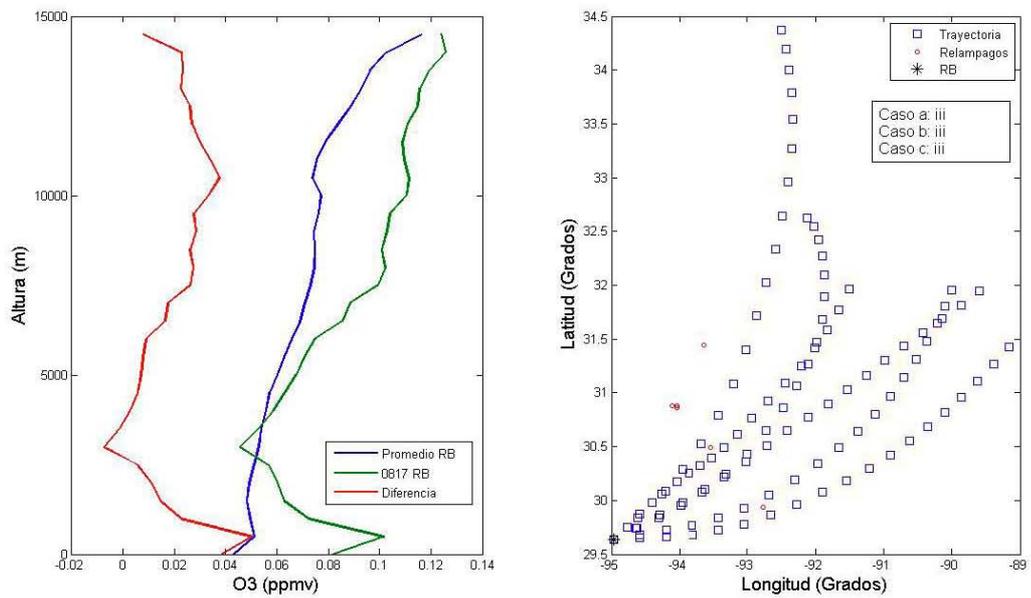


Figura IV-13. *Perfiles de ozono promedio para el día 17 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

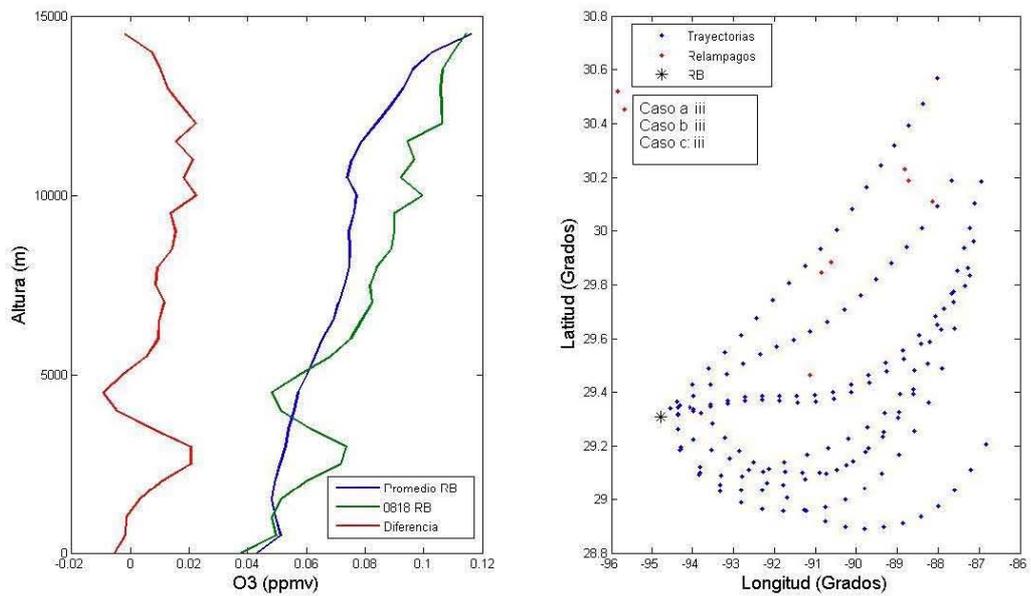


Figura IV-14. *Perfiles de ozono promedio para el día 18 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

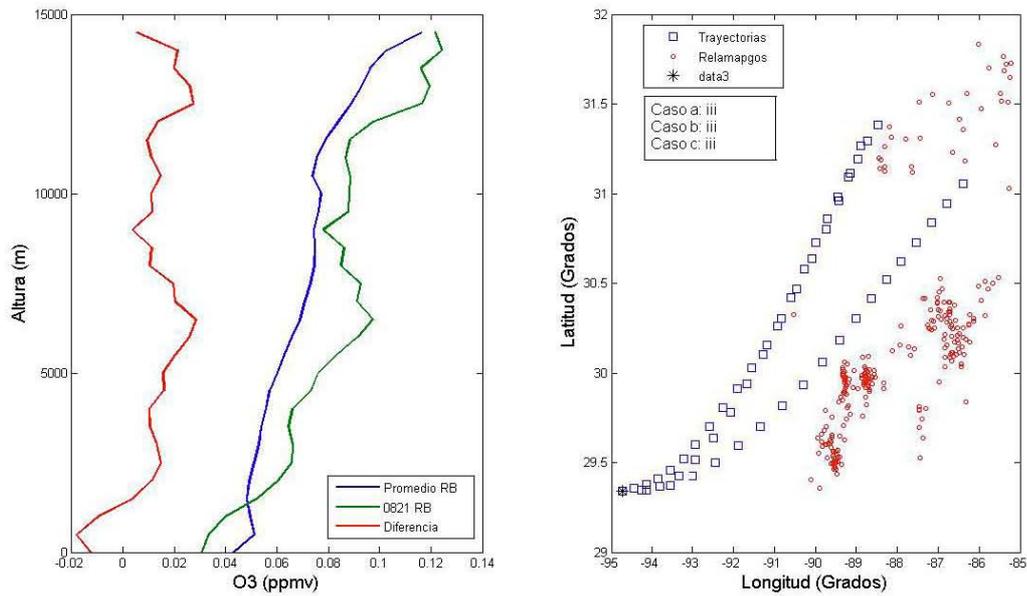


Figura IV-15. *Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

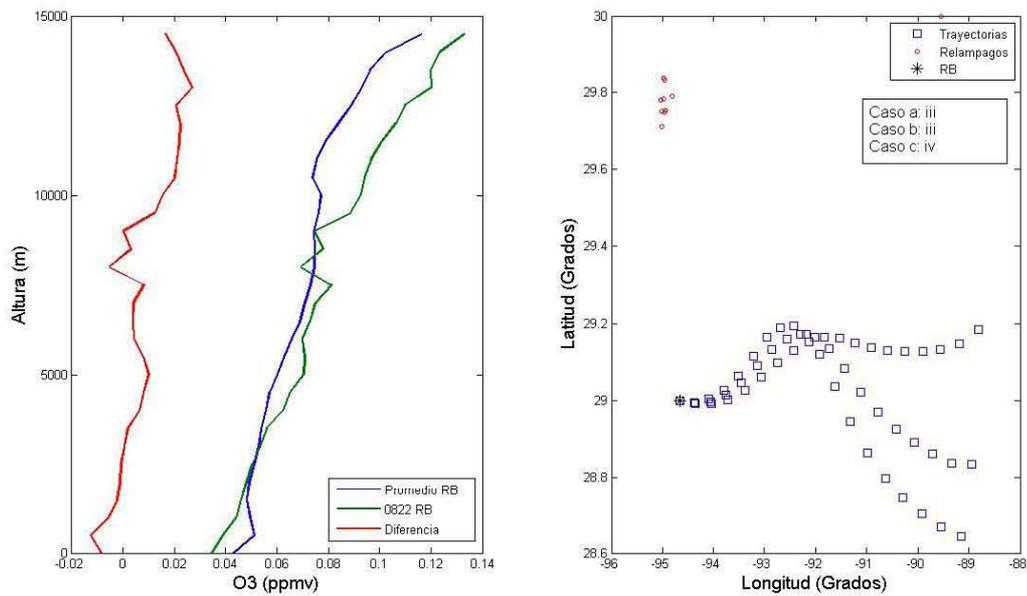


Figura IV-16. *Perfiles de ozono promedio para el día 22 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

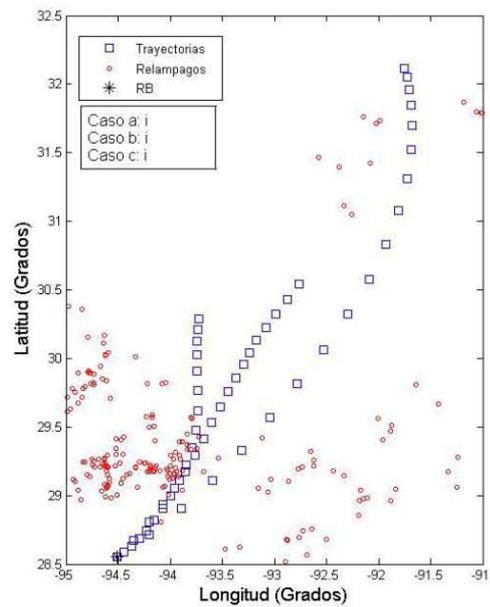
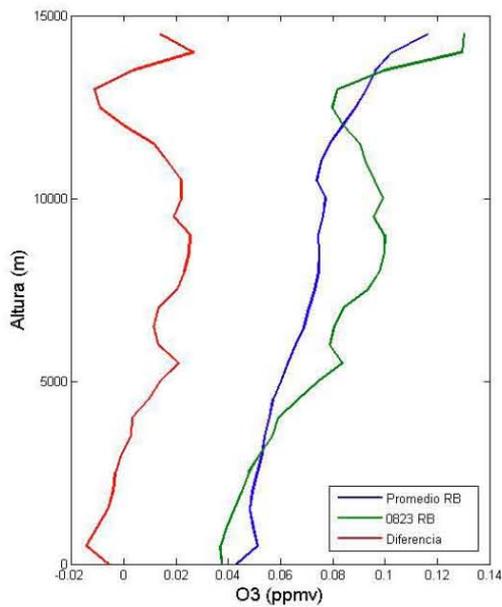


Figura IV-17. *Perfiles de ozono promedio para el día 23 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

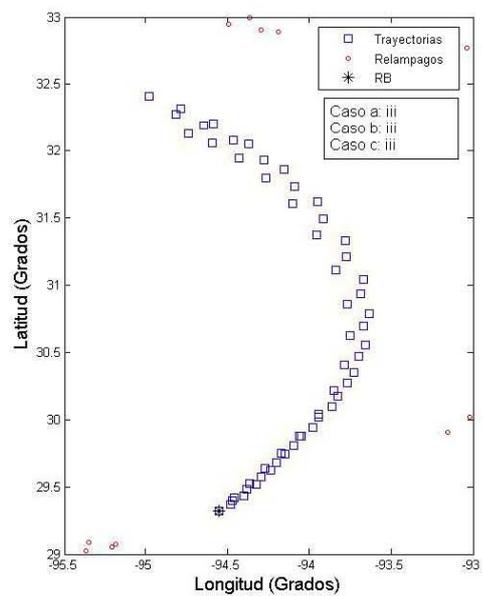
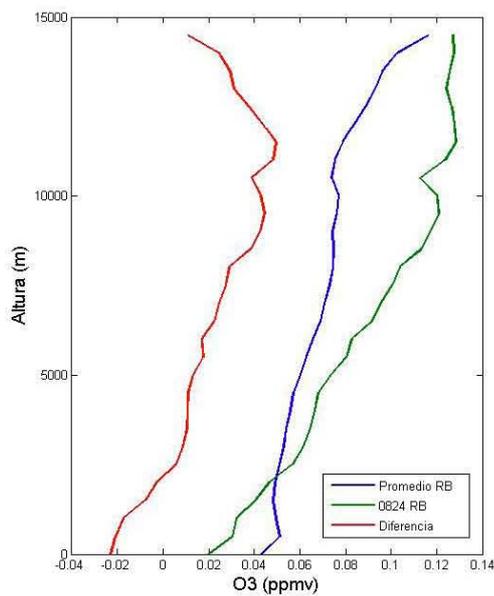


Figura IV-18. *Perfiles de ozono promedio para el día 24 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

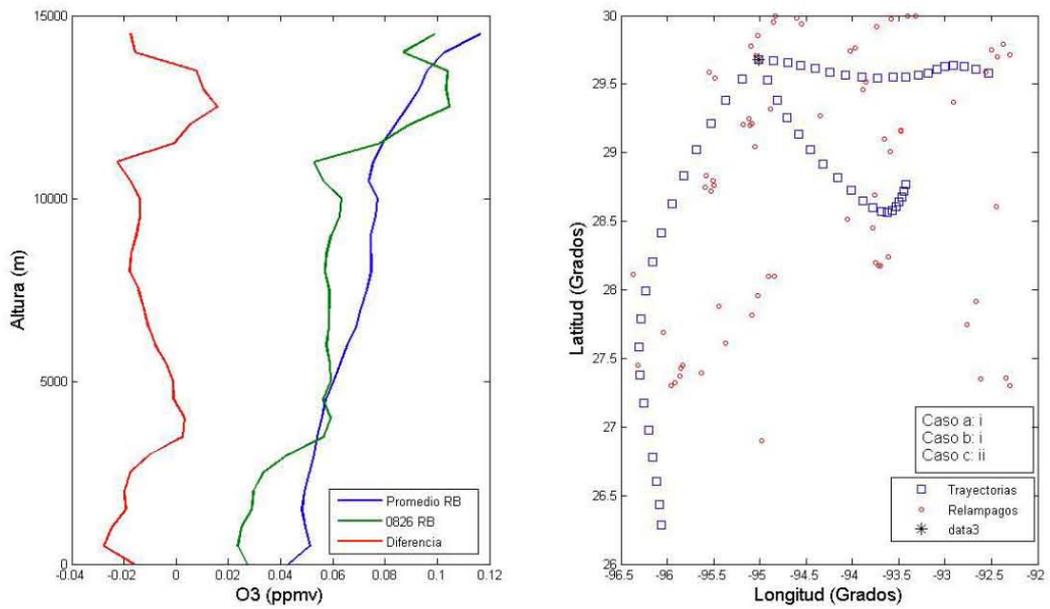


Figura IV-19. Perfiles de ozono promedio para el día 26 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

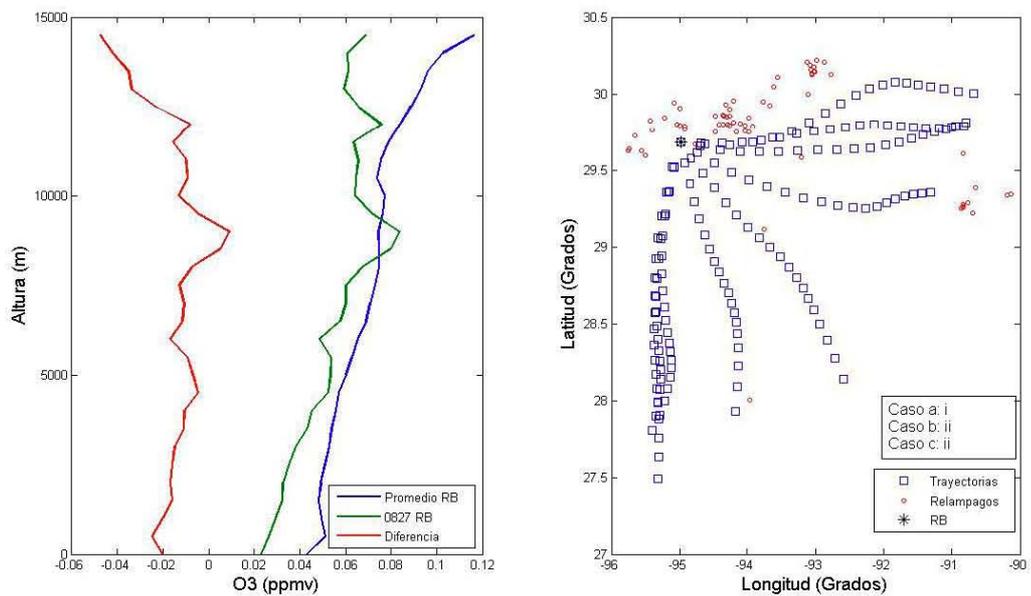


Figura IV-20. Perfiles de ozono promedio para el día 27 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

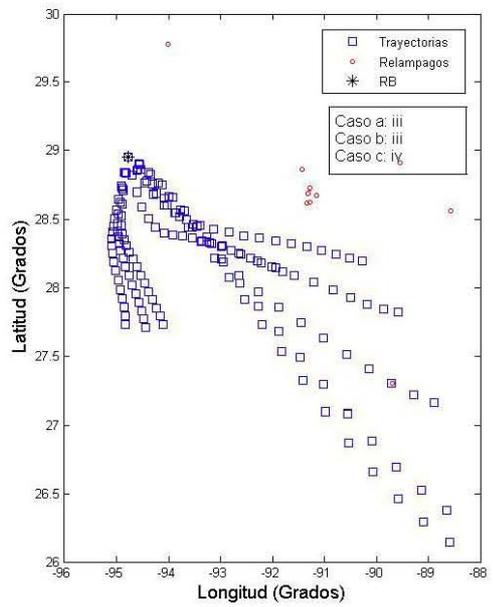
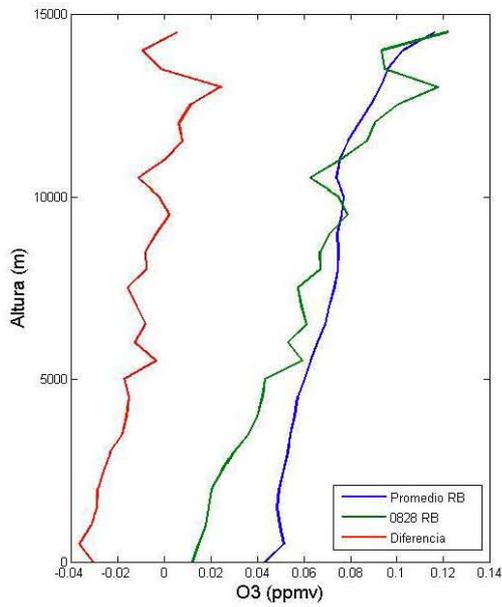


Figura IV-21. *Perfiles de ozono promedio para el día 28 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

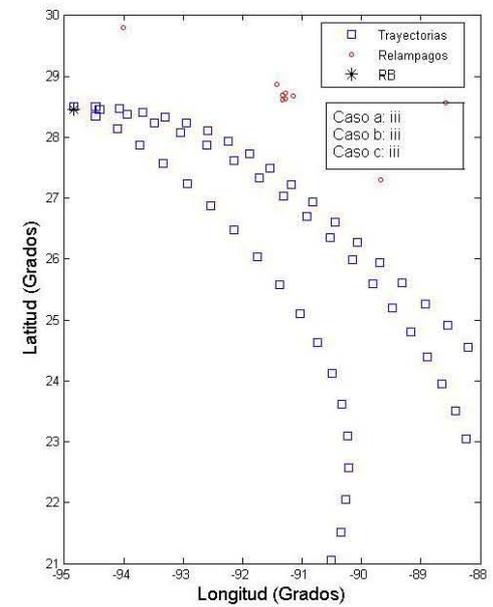
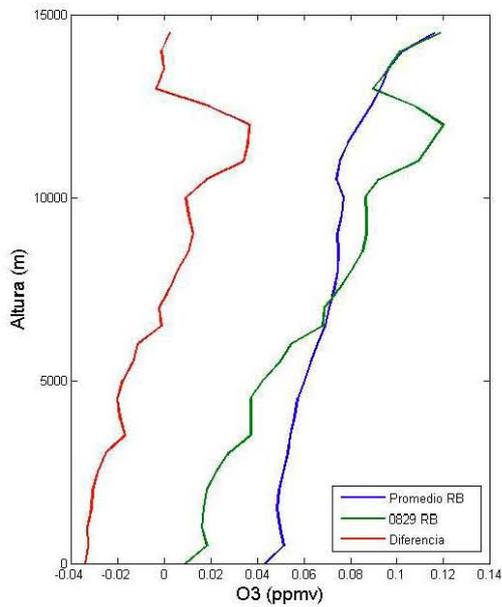


Figura IV-22. *Perfiles de ozono promedio para el día 29 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para este día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

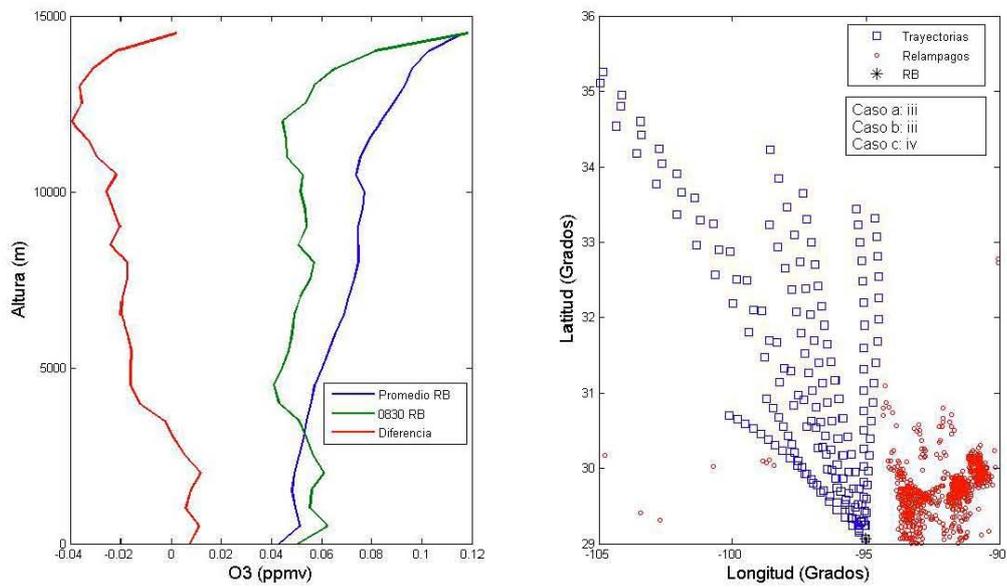


Figura IV-23. *Perfiles de ozono promedio para el día 30 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

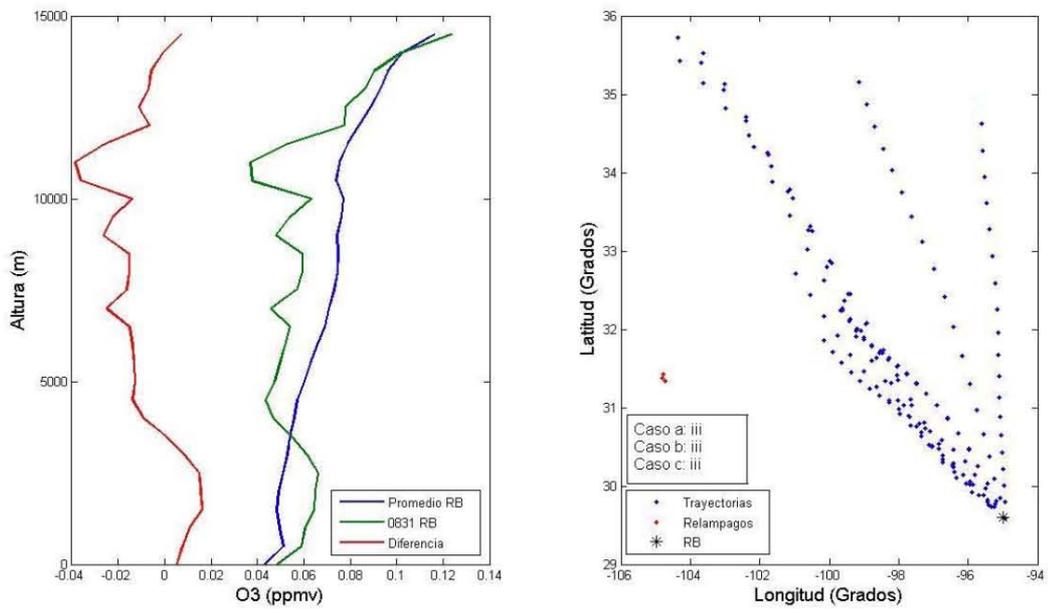


Figura IV-24. *Perfiles de ozono promedio para el día 21 de Agosto en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

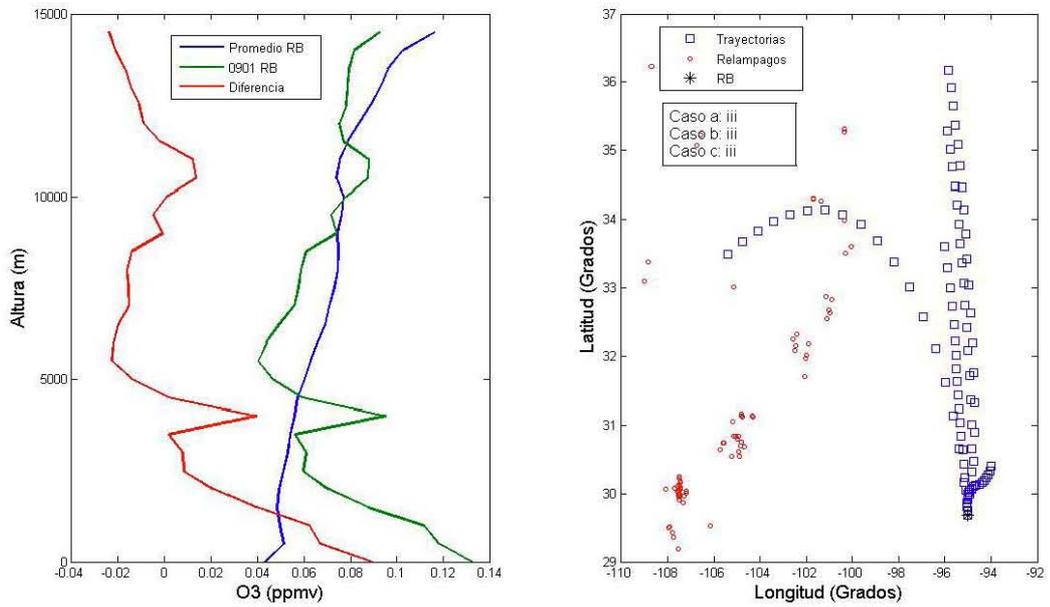


Figura IV-25. *Perfiles de ozono promedio para el día 01 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

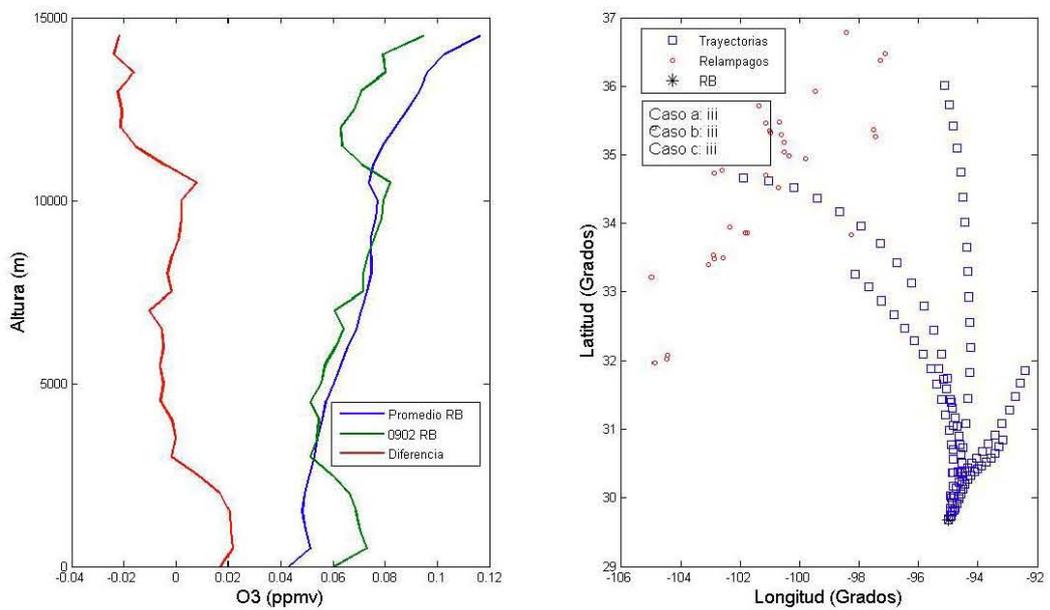


Figura IV-26. *Perfiles de ozono promedio para el día 02 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

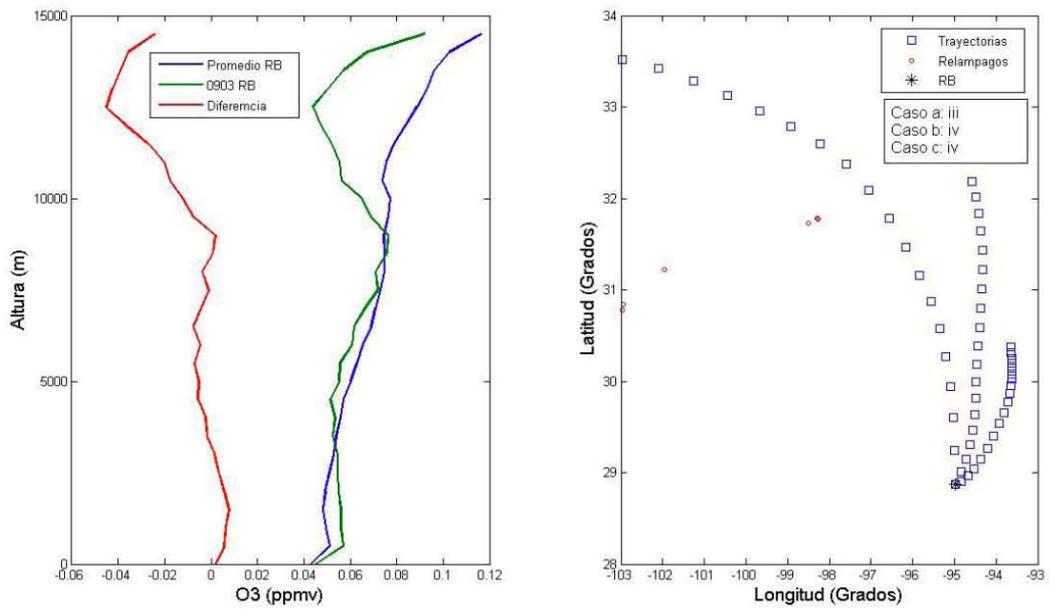


Figura IV-27. Perfiles de ozono promedio para el día 03 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

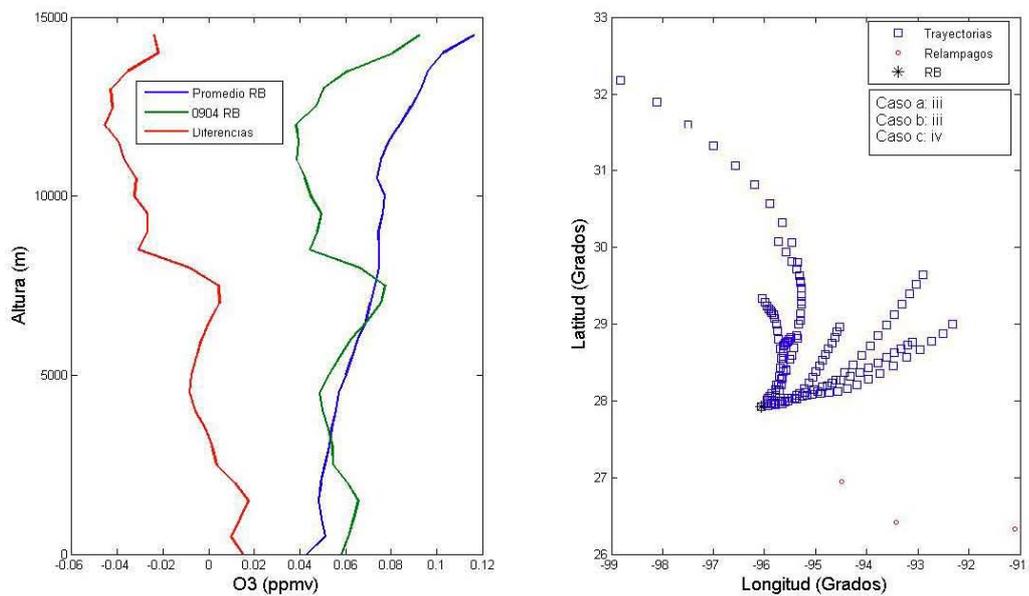


Figura IV-28. Perfiles de ozono promedio para el día 04 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)

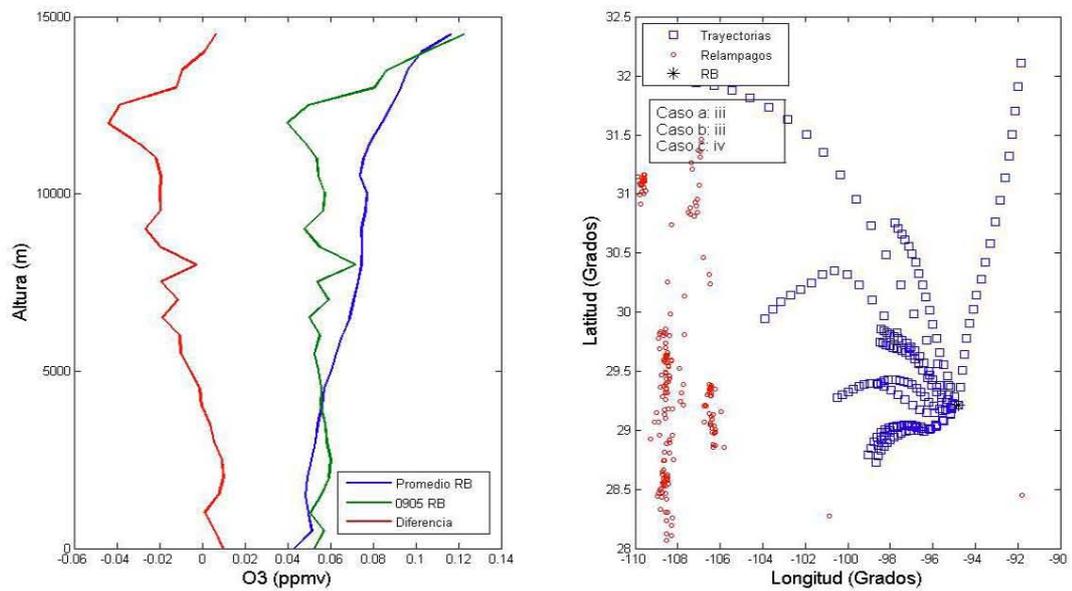


Figura IV-29. *Perfiles de ozono promedio para el día 05 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

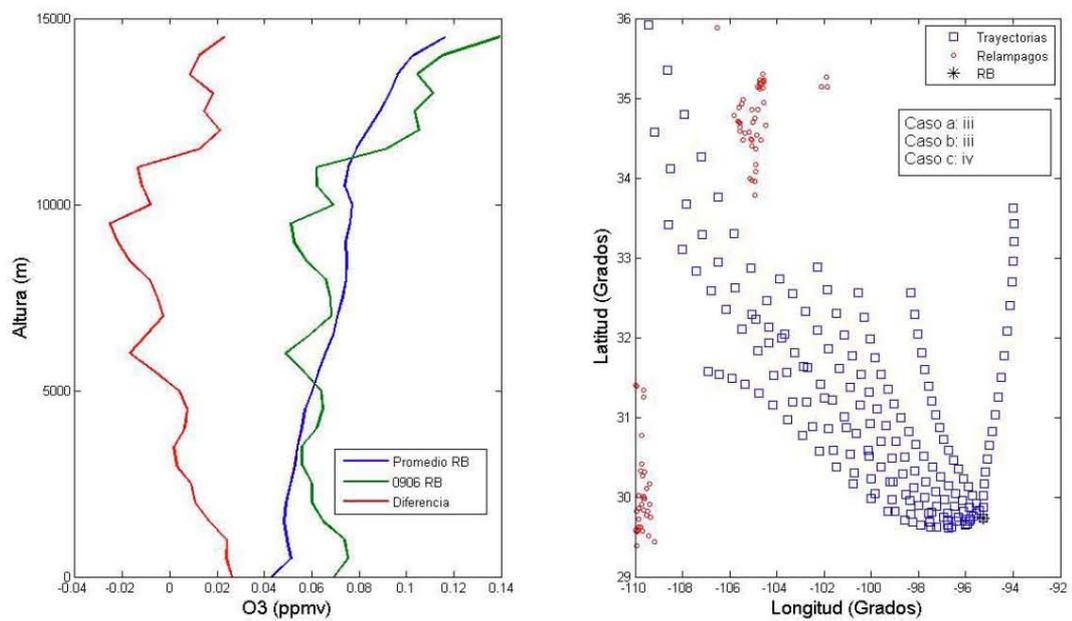


Figura IV-30. *Perfiles de ozono promedio para el día 06 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

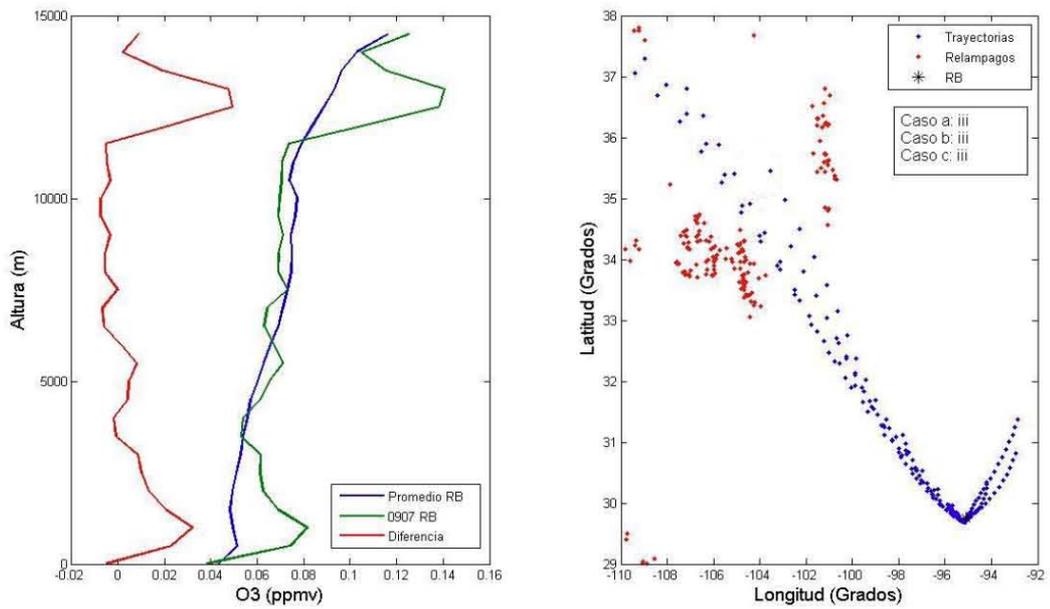


Figura IV-31. *Perfiles de ozono promedio para el día 07 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

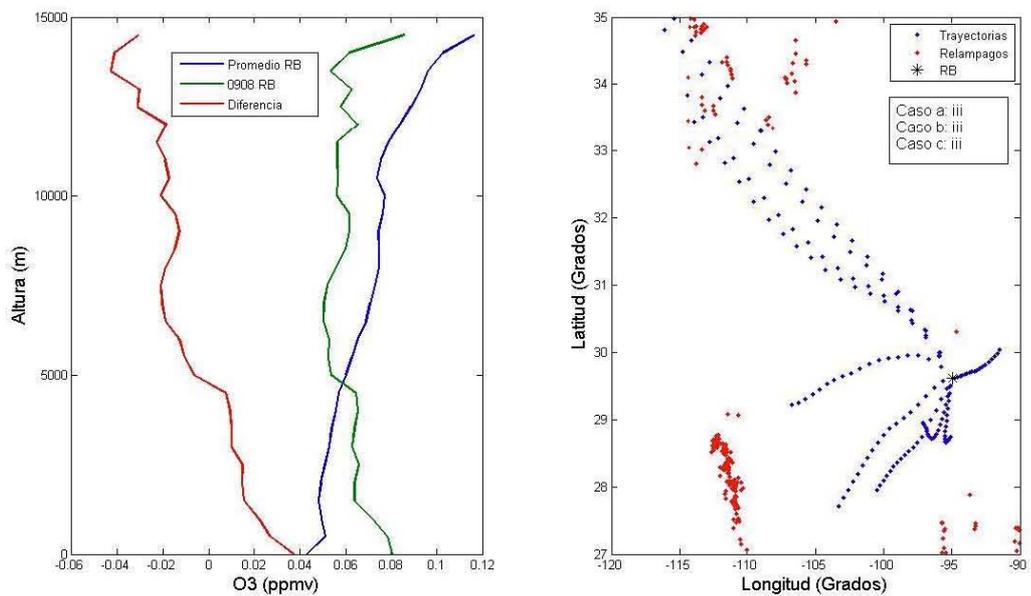


Figura IV-32. *Perfiles de ozono promedio para el día 08 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

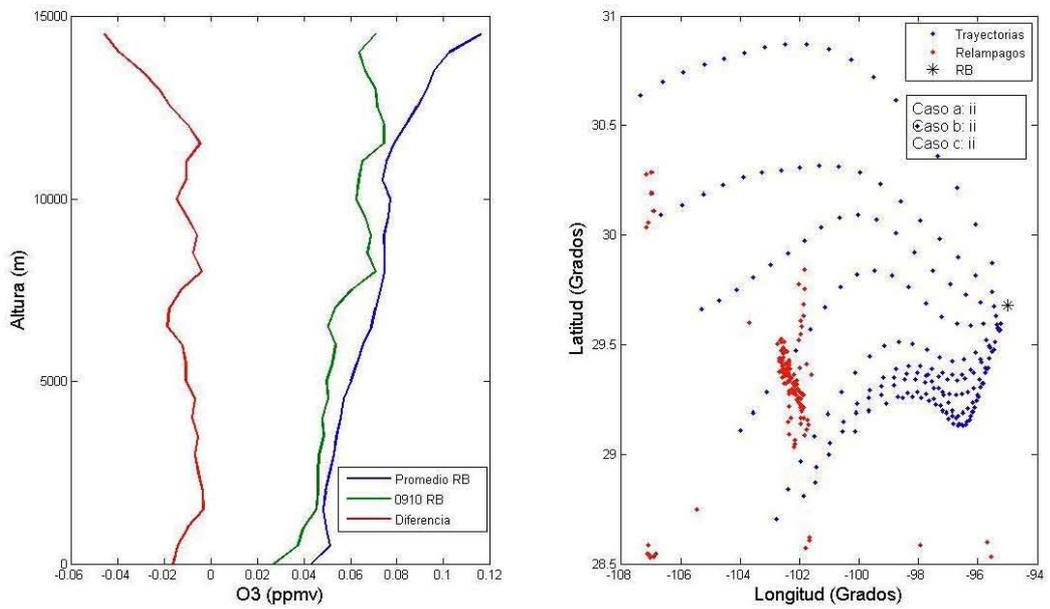


Figura IV-33. *Perfiles de ozono promedio para el día 10 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

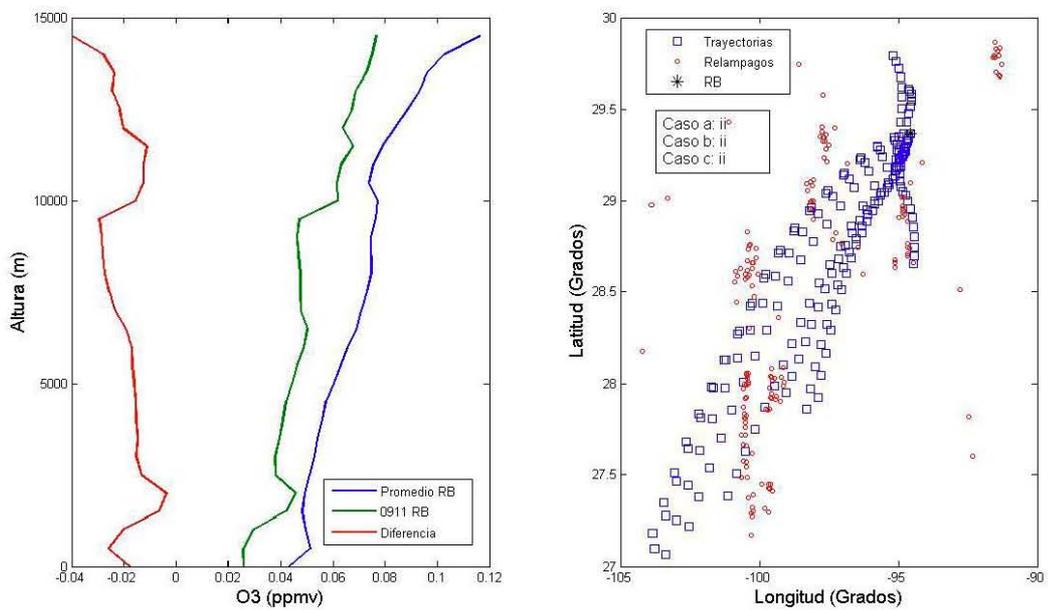


Figura IV-34. *Perfiles de ozono promedio para el día 11 de Septiembre en RB (izq.), Trayectorias de las masas de aire para ese día y los relámpagos en sus alrededores (der.)*

APENDICE V

Tabla V-1. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en BB día por día con el ozono climatológico.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico (m)	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
01	0.9685	3000	0				
02	0.8804	2000	0				
04	-0.9657	3000	0				
05	0.005341	3000	0				
06	1.268	3000	0				
08	0.9944	4000	13	5	13	0	260 (4)
				13			205 (6)
				11			39 (1)
				18			303 (2)
09	0.4995	12000	7	6	7	0	50 (4)
				5			103 (3)
11	0.8653	2000	0				
12	-0.9301	2000	0				
13	1.339	4000	12	13	12	0	269(10) 322 (2)
14	1.326	1000	0				
15	0.9372	2000	0				
16	0.886	4000	0				
19	1.263	4000	0				
20	0.758	1000	0				

21	1.267	2000	3	5	3	0	161 (3)
				18			
22	0.7797	2000	6	1	1	5	1033 (1) 19(5)
23	1.175	2000	0				
25	0.5381	4000	0				
27	0.5442	3000	0				
28	0.9606	2000	0				
29	0.3842	1000	0				
30	-0.6642	2000	0				

Tabla V-2. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en HO día por día con el ozono climatológico.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
01	3.586	11000	5	1	0	5	30(4) 84 (1)
02	2.706	9000	0				
04	3.398	8000	0				
10	2.755	1200	19	18	0	19	438 (1) 416 (12) 452 (6)
				17			
11	2.536	11000	0				
14	1.935	9000	0				
15	3.02	13000	0				
19	2.907	8000	12	8	9	3	136 (4) 38 (3) 86 (1) 188 (3) 343 (1)
				5			
				2			
20	3.137	10000	0				
21	3.708	8000	0				

23	3.12	8000	13	18	0	13	350(1)
				3			46(8)
				2			38(4)
25	4.487	10000	0				
28	2.584	13000	0				
29	2.856	10000	0				
30	0.2643	8000	0				
31	1.629	13000	0				

Tabla V-3. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en MX día por día con el ozono climatológico.

Día	$\Delta O_3 / DE$	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
22	3.624	5000	0				
23	2.487	9000	0				
24	3.902	1000	0				
25	2.398	7000	1	16	0	1	90(1)
26	1.97	6000	0				
27	4.34	6000	2	12	2	0	337(2)
28	4.781	6000	50	12	31	19	283(18)
				11			337(16)
				10			613(1)
							333(15)
29	3.621	6000	9	13	0	9	283(9)
				12			
30	1.703	6000	0				
31	1.081	6000	0				
901	2.499	7000	0				
902	4.247	11000	0				
903	3.629	11000	13	18	0	13	283(9)
				15			178(1)
				14			230(3)
904	1.878	8000	0				
905	2.055	6000	0				
906	3.571	9000	1	18	0	1	134(1)
907	2.573	9000	0				
908	1.937	5000	0				
913	2.997	3000	0				
914	2.548	9000	0				
915	2.602	9000	18	18	0	18	200(14)
				16			178(2)
				15			225(1)
							168(1)

Tabla V-4. Resumen de las coincidencias de relámpagos y trayectorias de aire en RB día por día con el ozono climatológico.

Día	ΔO_3 / DE	Altura del pico	# Eventos	H.A.L.	Ubicación		Distancia y Eventos (km, #)
					Mar	Tierra	
02	6.669	9000	0				
03	7.719	8000	0				
04	7.224	800	0				
06	5.625	8000	98	18	51	47	267(10)
				17			78(4)
				14			531 (4)
				7			557 (11)
				6			492 (2)
				5			120 (37) 417 (26) 455 (4)
07	5.684	8000	1	13	1	0	238 (1)
09	7.463	8000	0				
10	3.719	2000	0				
11	5.727	11000	0				
12	8.176	8000	0				
13	5.817	10000	0				
15	6.367	8000	0				
16	5.692	12000	0				
17	6.736	10000	0				
18	6.076	12000	0				
21	6.13	7000	0				
22	6.171	12000	0				
23	7.063	8000	34	18	28	6	265 (18)
				8			329 (2)
				7			281(8) 599(6)
24	7.746	8000	0				
26	5.537	12000	4	11	3	1	208 (1)
				9			133 (2)
				8			29 (1)
				5			
27	5.255	8000	1	3	0	1	29 (1)
28	5.452	12000	0				
29	6.594	11000	0				
30	3.857	8000	0				
31	4.636	1000	0				
901	5.034	10000	0				
902	5.178	8000	0				
903	5.249	8000	0				
904	5.111	7000	0				
905	4.526	8000	0				
906	5.972	12000	0				

907	7.003	12000	0				
908	4.142	8000	0				
910	4.95	8000	5	18	0	5	778 (1)
				17			726 (4)
911	3.854	11000	12	18	9	3	27 (9)
				5			607(3)