

03860

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra
Centro de Ciencias de la Atmósfera



Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México

Tesis

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Física de la Atmósfera

Presenta

Oscar Augusto Peralta Rosales

Dirigida por:

Dr. Darrel Baumgardner

México, D. F.

Junio de 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Of. No. PCT/JOCE/780/00

Asunto: Asignación de jurado para examen de grado.

OSCAR AUGUSTO PERALTA ROSALES

Estudiante de Maestría

Física de la Atmósfera

Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 26 de septiembre del año en curso, aprobó a los siguientes investigadores como su jurado de examen de grado para defender la tesis titulada "Determinación de un índice que relacione la concentración de monóxido de carbono en el aire con la presencia de hollín".

Mtro. Armando Baéz Pedrajo	Presidente
Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez	Vocal
Dr. Darrel Baumgardner	Secretario
Dra. Graciela Binimelis de Raga	Suplente
Dra. Silvia Eidels	Suplente

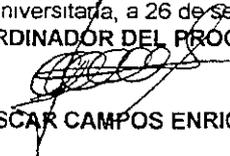
Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 26 de Septiembre del 2000

EL COORDINADOR DEL PROGRAMA


DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUEZ

c c p. Tutor
Archivo

Ciudad Universitaria, abril de 2001

Dr. Oscar Campos Enríquez
Coordinador del Posgrado
en Ciencias de la Tierra

Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para el examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), Oscar Augusto Peralta Rosales, he leído y revisado la tesis titulada "Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente


Dr. Darrel Baumgardner 6/4/01

Ciudad Universitaria, abril de 2001

Dr. Oscar Campos Enríquez
Coordinador del Posgrado
en Ciencias de la Tierra

Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para el examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), Oscar Augusto Peralta Rosales, he leído y revisado la tesis titulada "Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

En más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Dra. Graciela Binimelis de Raga

Ciudad de México, abril de 2001

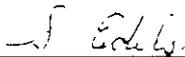
Dr. Oscar Campos Enríquez
Coordinador del Posgrado
en Ciencias de la Tierra

Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para el examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), Oscar Augusto Peralta Rosales, he leído y revisado la tesis titulada "Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

En más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Dra. Silvia Eidels Dubovoi

Ciudad Universitaria, abril de 2001

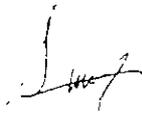
Dr. Oscar Campos Enríquez
Coordinador del Posgrado
en Ciencias de la Tierra

Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para el examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), Oscar Augusto Peralta Rosales, he leído y revisado la tesis titulada "Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Mto. Armando Báez Pedrajo

Ciudad Universitaria, abril de 2001

Dr. Oscar Campos Enríquez
Coordinador del Posgrado
en Ciencias de la Tierra

Presente

Por medio de este conducto me permito comunicarle que, en calidad de jurado para el examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias (Física de la Atmósfera), Oscar Augusto Peralta Rosales, he leído y revisado la tesis titulada "Determinación de carbón negro a partir de monóxido de carbono en la Ciudad de México" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra; por lo tanto, el estudiante puede continuar con los trámites para solicitar fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez

Contenido general

Agradecimientos	i
Resumen del documento	iii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Aerosol que contiene carbón	2
1.1.1 Carbón elemental (CE) y carbón negro (CN)	3
1.1.2 Combustión incompleta	4
1.1.3 Efectos del carbón negro	5
1.2 Características de la Ciudad de México	7
1.3 Monóxido de carbono (CO)	7
1.4 Hipótesis y objetivos del proyecto	8
1.4.1 Hipótesis	9
1.4.2 Objetivos	10
Capítulo 2. Metodología e instrumentación	13
2.1 Determinación de CN	14
2.1.1 Coeficiente de absorción (σ_{ab})	16
2.1.2 Coeficiente de dispersión (σ_{sc})	20
2.1.3 Impactador de partículas (MOUDI)	21
2.1.4 Análisis del contenido de carbón de las partículas	24
2.1.5 Coeficiente de absorción específica (A_E)	27
2.2 Determinación de monóxido de carbono (CO)	29
2.3 Propagación de errores	31
2.4 Otras mediciones	34
2.5 Sitios de muestreo	35
2.6 Análisis estadístico	39
Capítulo 3. Resultados	44
3.1 Series de tiempo	44
3.1.1 Merced	45
3.1.2 Instituto Mexicano del Petróleo	48
3.1.3 Centro de Ciencias de la Atmósfera	50
3.2 Análisis de las muestras	54
3.4 Distribución de frecuencias	58
Capítulo 4. Análisis de resultados	66
4.1 Merced	68
4.2 Instituto Mexicano del Petróleo	70
4.3 Centro de Ciencias de la Atmósfera	80
Capítulo 5. Resumen, conclusiones y recomendaciones	102
5.1 Resumen	102
5.2 Conclusiones	102
5.3 Recomendaciones	105
Referencias	107

Contenido de figuras

Figura 2-01. Diagrama de funcionamiento del PSAP	17
Figura 2-02. Diagrama del nefelómetro M903	20
Figura 2-03. Corte vertical del impactador MOUDI	21
Figura 2-04. Eficiencia de recolección según el diámetro de las partículas	22
Figura 2-05. Concentración de materia según diámetro de las partículas en micras	24
Figura 2-06. Termograma de las etapas 0.32 y 0.18 μm . Merced (28 de enero)	26
Figura 2-07. A_E de hollín en función del tipo y del radio de la partícula	29
Figura 2-08. Ubicación de los sitios de muestreo	35
Figura 2-09. Serie de tiempo, del coeficiente de absorción (σ_{ab})	40
Figura 2-10. Distribución normalizada de datos	41
Figura 2-11. Regresión lineal de datos y coeficiente de determinación	43
Figura 3-01. Serie de tiempo promedio en bloque de 10 ptos Estación Merced	46
Figura 3-02. Serie de tiempo promedio en bloque 10 ptos. Estación IMP	49
Figura 3-03. Serie de tiempo promedios en bloque 10 ptos. Estación CCA	51
Figura 3-04. Serie de tiempo promedios en bloque 10 ptos. Estación CCA	52
Figura 3-05. Serie de tiempo promedios en bloque 10 ptos. Estación CCA	53
Figura 3-06. Concentración de CN según el diámetro de las partículas en micras	56
Figura 3-07. Distribución de datos de CO y CN en la Merced, 25 al 29 de enero	59
Figura 3-08. Distribución de datos de CO y CN en el IMP, 30 de enero al 5 de febrero	60
Figura 3-09. Distribución de datos CO y CN, estación CCA 22-26 de febrero	62
Figura 3-10. Distribución de datos de CO y CN, estación CCA 27 febrero-4 marzo	63
Figura 3-11. Distribución de datos CO y CN, estación CCA 5 -10 de marzo	64
Figura 4-01. Diagrama de dispersión Merced. Datos 0000-2359	69
Figura 4-02. Diagrama de dispersión del IMP. Datos 0000-2359	72
Figura 4-03. Diagrama de dispersión del IMP. Datos 0600-1359	73
Figura 4-04. Diagrama de dispersión del IMP. Datos 1400-2159	74
Figura 4-05. Diagrama de dispersión del IMP. Datos 2200-0559	75
Figura 4-06. Diagrama de dispersión del IMP. Datos HR<50%	76
Figura 4-07. Diagrama de dispersión del IMP. Datos HR>50%	77
Figura 4-08. Diagrama de dispersión del IMP Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	78
Figura 4-09. Diagrama de dispersión del IMP. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	79
Figura 4-10. Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos 0000-2359	82
Figura 4-11. Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos 0600-1359	83
Figura 4-12. Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos 1400-2159	84
Figura 4-13. Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos 2200-0559	85
Figura 4-14 Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	86
Figura 4-15. Diagrama de dispersión del CCA 01 Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	87
Figura 4-16. Diagrama de dispersión del CCA 01. Datos 0000-2359	89
Figura 4-17. Diagrama de dispersión del CCA 02. Datos 0600-1359	90
Figura 4-18. Diagrama de dispersión del CCA 02. Datos 1400-2159	91
Figura 4-19. Diagrama de dispersión del CCA 02. Datos 2200-0559	92
Figura 4-20 Diagrama de dispersión del CCA 02 Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	93
Figura 4-21 Diagrama de dispersión del CCA 02. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	94
Figura 4-22 Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos 0000-2359	96

Figura 4-23. Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos 0600-1359	97
Figura 4-24. Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos 1400-2159	98
Figura 4-25. Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos 2200-0559	99
Figura 4-26. Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$	100
Figura 4-27. Diagrama de dispersión del CCA 03. Datos $90^{\circ} > DV > 30^{\circ}$	101

Contenido de tablas

Tabla 2-01. Precisión de los instrumentos	31
Tabla 2-02. Propagación de errores en cada sitio de muestreo	34
Tabla 2-03. Datos obtenidos en las diferentes estaciones de monitoreo	38
Tabla 3-01. Promedio de A_E para cada sitio	55
Tabla 3-02. Coeficientes de absorción específica (A_E)	57
Tabla 4-01. Coeficientes lineales Merced. Datos 0000-2359	68
Tabla 4-02. Coeficientes lineales del IMP. Datos 0000-2359	72
Tabla 4-03. Coeficientes lineales del IMP. Datos 0600-1359	73
Tabla 4-04. Coeficientes lineales del IMP. Datos 1400-2159	74
Tabla 4-05. Coeficientes lineales del IMP. Datos 2200-0559	75
Tabla 4-06. Coeficientes lineales del IMP. Datos HR<50%	76
Tabla 4-07. Coeficientes lineales del IMP. Datos HR>50%	77
Tabla 4-08. Coeficientes lineales del IMP. Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	78
Tabla 4-09. Coeficientes lineales del IMP. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	79
Tabla 4-10. Coeficientes lineales CCA 01. Datos 0000-2359	82
Tabla 4-11. Coeficientes lineales CCA 01. Datos 0600-1359	83
Tabla 4-12. Coeficientes lineales CCA 01. Datos 1400-2159	84
Tabla 4-13. Coeficientes lineales CCA 01. Datos 2200-0559	85
Tabla 4-14. Coeficientes lineales CCA 01. Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	86
Tabla 4-15. Coeficientes lineales CCA 01. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	87
Tabla 4-16. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 0000-2359	89
Tabla 4-17. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 0600-1359	90
Tabla 4-18. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 1400-2159	91
Tabla 4-19. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 2200-0559	92
Tabla 4-20. Coeficientes lineales CCA 02. Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	93
Tabla 4-21. Coeficientes lineales CCA 02. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	94
Tabla 4-22. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 0000-2359	96
Tabla 4-23. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 0600-1359	97
Tabla 4-24. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 1400-2159	98
Tabla 4-25. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 2200-0559	99
Tabla 4-26. Coeficientes lineales CCA 03. Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$	100
Tabla 4-27. Coeficientes lineales CCA 03. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$	101

Agradecimientos

Es difícil ofrecer agradecimientos sin olvidar algún nombre, y aunque siempre está la culpa precavida de quien los ofrece, resulta molesto no encontrarse dentro de los mencionados los agradecimientos, sobre todo cuando se ayudó en algo, por pequeña que haya sido la ayuda. Tampoco es agradable que el autor no agradezca a nadie, puesto que el agradecimiento es una norma diplomática elemental. Por lo tanto, estos agradecimientos serán algo *sui generis*, pues pretendo agradecer a todos sin olvidar a nadie, así que la única solución que encontré fue no mencionar el nombre de ninguno.

El primero de los agradecimientos va dirigido al personal del Grupo de Física de Aerosoles. Es curioso ver cómo ha crecido un grupo al que casi veo nacer. Recuerdo que un par de personas me preguntaron con quién hacer la tesis de maestría y con soltura los sentencí con "Güeyes, vayan con el Grupo de Física de Aerosoles". Claro, más curioso resulta ver que fui el primero en entrar, y el último en salir. (Sin embargo, "Los últimos serán los primeros en el Reino del Señor".)

También agradezco al personal de la clínica de salud Luis Ruiz, que con frecuencia iba a la azotea del edificio para ver qué hacía el loco que mide cosas extrañas. La sorpresa me se llevaba al ver a ese loco tirado sobre la azotea con las piernas colgadas sobre una pared tomando baños de sol.

Otro agradecimiento similar recibe el IMP. Algo que me emocionaba de ese lugar eran los partidos de fútbol que se realizaban por las tardes. Lamentablemente, los petroleros son malos futbolistas. Sin embargo, la gente de ese lugar siempre fue atenta y cortés, cosas que un petrolero aprecia mucho.

También quisiera dar las gracias al personal administrativo del Posgrado en Ciencias de la Tierra, pues en más de una ocasión tuvo que descifrarne el significado de los distintos documentos escolares.

Tampoco olvido a todas las personas que entraron junto conmigo a la maestría. Intento recordar nítidamente algún momento gozador con estas personas, pero estoy en una situación en la que mi memoria es traicionera y con frecuencia olvida unos momentos para recordar otros que jamás le pedí que retuviera. Por ejemplo, no sé para qué recuerdo quién metió el primer gol del partido Francia-Alemania en el mundial de 1982, si no puedo acordarme del marcador final.

También quisiera agradecer las múltiples atenciones (¿o asistencias?) de mi gurú. Es satisfactorio saber que en términos generales superó la barrera del idioma, y no sólo aprendió bien el español, sino que se doctoró en spanglish, pues cual torre de Babel, cuando lo visitaba me permitía hablar en un spanglish nada nítido y que muy pocos catedráticos hubiesen podido entender.

Finalmente, mi agradecimiento total para mi socia. Ella sabe bien todo lo que le debo, y mucho más de lo que le he agradecido. Y también sabe que si algún día se llega a cobrar, me encontraré en la más profunda de las depresiones.

Resumen del documento

El Capítulo 1 detalla algunos aspectos generales del carbón negro, sus propiedades, riesgos que implica en el clima y en la salud, así como las técnicas más comunes para eliminarlo en el ambiente. Aquí también se postula la hipótesis y el objetivo de la tesis.

El Capítulo 2 describe la metodología y los instrumentos empleados para determinar el coeficiente de absorción específica (A_E), el coeficiente de absorción (σ_{ab}) y las concentraciones ambientales de carbón negro y monóxido de carbono. Aquí también se mencionan las posibles fuentes de error de la metodología y de los instrumentos de medición utilizados; y se describen los sitios de muestreo y los análisis estadísticos que establecen la relación que vincula al carbón negro con el monóxido de carbono.

Los resultados preliminares de la campaña de recolección de datos están en el Capítulo 3. Los datos de las condiciones meteorológicas, la evolución del monóxido de carbono y el coeficiente de absorción se reagruparon por fecha y lugar para dar una idea más clara del comportamiento general de los distintos parámetros. Este capítulo también muestra los coeficientes de absorción específica de cada sitio de muestreo y las distribuciones de frecuencias de los datos, como base para un análisis estadístico más detallado.

El análisis de los resultados se describe en el Capítulo 4. Aquí se muestran las distintas categorías en las que se reagruparon los datos y los coeficientes estadísticos determinados para cada categoría y grupo de datos.

Finalmente, el Capítulo 5 presenta el resumen, las recomendaciones y las conclusiones de este trabajo. Los resultados del trabajo se muestran en forma global y se indica la relación general entre el carbón negro y el monóxido de carbono, así como algunas recomendaciones para estudios posteriores.

Capítulo 1. Introducción

Los aerosoles que contienen carbón negro afectan el clima, la salud e intervienen en diversas reacciones químicas en la atmósfera. De hecho, algunos episodios de contaminación por aerosoles que contienen carbón, como Donora en 1948 y Londres en 1954, han demostrado que sus efectos en la atmósfera y en la salud pueden ser de consecuencias catastróficas (Perkins, 1974). El origen del carbón negro, sobre todo en las grandes ciudades, casi es exclusivo de reacciones incompletas de combustión, y su concentración en la atmósfera parece ir en aumento cada año debido al creciente consumo de combustibles.

Las condiciones de operación de muchos vehículos que circulan por la Ciudad de México, así como la naturaleza de los combustibles que consumen, favorecen la generación de carbón negro. Además, el clima y la geografía de la Ciudad pueden ayudar a crear las condiciones que propicien episodios de contaminación atmosférica por carbón negro.

Determinar la concentración de carbón negro en la atmósfera no es trivial, ya que se necesitan diversos instrumentos que emplean bastante tiempo de análisis. Incluso la literatura sobre la determinación directa de carbón negro en el ambiente es limitada (Penner, 1993). Sin embargo, algunas investigaciones han empleado análisis indirectos que se basan en alguna propiedad del carbón negro o en los gases que acompañan a los productos de la combustión (Horvath, 1993). De hecho, este trabajo plantea un sencillo método alternativo para determinar las concentraciones atmosféricas de carbón negro a partir de monóxido de carbono, que es otro producto de las combustiones incompletas, y que se mide cotidianamente en casi todas las ciudades del mundo.

En 1997, en un proyecto enfocado en determinar distintas propiedades de gases y aerosoles (el Proyecto Azteca) se encontró una estrecha relación entre el coeficiente de absorción de las partículas suspendidas en el aire y la concentración de monóxido de carbono. Este trabajo se basó en el hecho de ese hecho, con el fin de determinar si existe un vínculo entre las concentraciones ambientales de carbón negro y de monóxido de carbono.

Aerosol que contiene carbón

El aerosol que contiene carbón y que se genera en combustiones incompletas puede ser primario o secundario, según la fuente y el mecanismo de formación. El aerosol primario, que se genera directamente por estos procesos, se conoce como hollín (Penner & Novakov, 1996; Seinfeld & Pandey, 1989). En términos generales, este aerosol contiene sustancias solubles en solventes orgánicos y un compuesto insoluble en estos solventes y resistente a la oxidación a temperaturas inferiores a 400°C. Este compuesto insoluble es el carbón negro (Seinfeld & Pandey, 1998; Petzold, 1995)

El aerosol primario, conforme envejece, puede absorber y combinarse con otras partículas por coagulación, condensación y procesos de nucleación. Las fuentes del aerosol primario pueden ser muy diversas, como hogueras, calentadores, automóviles, fuegos forestales, cigarrillos encendidos, etc. De hecho, algunos combustibles generan carbón negro con más eficiencia que otros, como la gasolina y el diesel (Burstcher et al, 1998).

El aerosol secundario se forma en la atmósfera por una transferencia de masa a la fase gaseosa de los productos de la combustión, pues algunos de estos productos se condensan en las partículas disponibles en un intento por establecer el equilibrio entre las fases gas y aerosol.

Además de que estas partículas sirven como un sitio de condensación de vapor de agua y otros compuestos, gracias a las características químicas y catalíticas del carbono que contienen, pueden contribuir en diversos procesos químicos en la atmósfera.

Estas partículas tienen una velocidad de precipitación de sólo algunos centímetros por día, por lo que pueden permanecer en el aire días, o incluso semanas si rebasan la troposfera alta a la sedimentación a tierra por gravedad, arrastradas por la lluvia o como núcleo de condensación de nubes, son los principales procesos en los que las partículas con carbón negro se remueven de la atmósfera (Seinfeld & Pandis, 1998).

1.1 Carbón elemental (CE) y carbón negro (CN)

Las definiciones de carbón elemental y carbón negro de los aerosoles con carbón generalmente se basan en los propios métodos de determinación de tales especies. El carbón elemental (CE) se define por su comportamiento térmico. El CE no se volatiliza a temperaturas bajas y sólo puede gasificarse en una oxidación a temperaturas superiores a los 400°C, por lo que este término se aplica en aspectos relacionados con determinaciones químicas o térmicas de carbón (Petzold, 1995).

Por otro lado, el carbón negro (CN) se refiere a la parte del aerosol que absorbe luz, por lo que este término se suele aplicar cuando se determina el contenido de carbón en aerosoles o partículas con métodos ópticos o radiativos. Fotómetros PSAP y etalómetros son algunos ejemplos de instrumentos que determinan CN (Petzold, 1995).

El carbón elemental es la fracción más polimerizada proveniente de la combustión y se considera como un refractario térmico con propiedades de cuerpo negro, por esta razón muchos

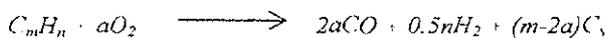
Instrumentos de análisis de aerosoles que contienen carbón se basan en al menos una de las propiedades del CE o del CN.

En este trabajo, el análisis del contenido de carbón en partículas recolectadas es tanto químico como físico, así que se considera como CN a toda aquella partícula que absorba luz y que tenga además una temperatura de oxidación superior a los 400°C, por lo que ambos términos emplean según el método de análisis al que se hace referencia.

2.2 Combustión incompleta

La combustión incompleta generalmente se debe a la falta del oxígeno suficiente para quemar el combustible, a las propiedades del combustible, como puede ser el estado en que se encuentra y las impurezas que contiene, o a las condiciones específicas de la reacción. Por estas razones la composición, la forma y el tamaño de las partículas generadas durante la combustión varían según las características específicas de la reacción.

La formación del carbón negro que compone estas partículas depende críticamente de la relación carbono/hidrógeno en la mezcla hidrocarburo-aire. Por lo tanto, al asumir que la mezcla tiene oxígeno suficiente para formar CO₂ y H₂O, y que el producto de combustión del hidrocarburo C_mH_n es CO, la estequiometría de la combustión es (Seinfeld & Pandis, 1998):



donde C, es el carbón negro y $m/2a$ es la razón de carbono a oxígeno, C/O. Cuando esta razón es igual a la unidad y $m/2a > 1$, entonces hay oxígeno suficiente para agotar todo el carbono

disponible sin que se produzca carbón negro. Si hay más oxígeno, entonces la razón C/O será $m < 2a$, y el oxígeno extra se empleará para convertir el CO producido en CO_2 .

Sin embargo, si hay una menor cantidad de oxígeno y $m > 2a$, el carbón negro gradualmente comenzará a formarse. Este argumento indica que se espera la formación estequiométrica de carbón negro cuando la razón C/O en la mezcla combustible-aire exceda el valor crítico de la unidad.

1.1.3 Efectos del carbón negro

El aerosol que contiene carbón negro tienen propiedades radiativas y pueden influir en distintos procesos climáticos, como el calentamiento de la atmósfera, la reducción de la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie del planeta, el incremento de la absorción de radiación en nubes y la reducción del albedo en las superficies que pueden incorporar estas partículas, como el hielo y la nieve (Penner et al, 1993; Horvath, 1993).

Además, dos episodios relativamente recientes marcan la historia de los aerosoles con carbón y sus efectos en la salud. El primero aconteció en Donora, E.U., en octubre de 1948. Donora era un pequeño pueblo minero e industrial, donde la combinación de una inversión térmica y el hollín proveniente de fundiciones de zinc provocó la muerte por asfixia a 20 personas y enfermó a más de 6000. Este acontecimiento se considera como el desastre ambiental más grande de los Estados Unidos.

El segundo acontecimiento sucedió en Londres, Inglaterra, en 1954. El hollín producido por quemar carbón, junto con una alta humedad relativa y grandes cantidades de dióxido de azufre (SO_2) en el ambiente, crearon un compuesto muy tóxico y respirable que mató a cientos

personas. El hollín funcionó como receptáculo para que se condensaran el agua y el bióxido de azufre del ambiente, que después reaccionaban entre sí para crear ácido sulfúrico. Al inhalarse estas partículas quemaban la traquea y los pulmones.

Las partículas generadas por procesos de combustión son dañinas. De acuerdo con estudios relacionados con la salud y la presencia de partículas, la mortalidad humana por enfermedades cardiopulmonares se incrementa en 1% cuando la cantidad en el aire de partículas respirables de diámetro menor a $2.5 \mu\text{m}$ aumenta en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Dockery, 1993). De hecho, además de los daños inmediatos a la salud, existen otros a largo plazo relacionados con la respiración de este tipo de partículas, el cáncer de pulmón es el más relevante de ellos. Los efectos de la exposición a estas partículas son imperceptibles y eso hace creer a la gente que tiene inmunidad a ellas.

El tamaño de las partículas es un factor clave para cuantificar el riesgo a la salud. En términos generales, las partículas con un diámetro superior a $1 \mu\text{m}$ se depositan en la nariz, mientras que las partículas con diámetro inferior a $1 \mu\text{m}$ se depositan en la parte bronquial y pulmonar del sistema respiratorio (Perkins, 1974). Las partículas generadas en procesos de combustión tienen en promedio un tamaño inferior a $2.5 \mu\text{m}$ (Ligthy et al, 2000)

El CN atmosférico tiene otros efectos, además de los daños a la salud y los derivados de sus propiedades de absorción de luz. El CN puede ser un catalizador en procesos de oxidación, y en la superficie de partículas que contienen CN puede reaccionar el SO_2 . Se han realizado varios estudios sobre la química de reacciones atmosféricas del CN con SO_2 , O_3 y NO_2 (Kalberer et al, 1999). Sin embargo, la fuerte dependencia de los resultados sobre la naturaleza de las superficies impide la extrapolación de los resultados a la atmósfera. Estudios recientes en laboratorio y mediciones de campo indican una posible reducción heterogénea del HNO_3 a NO en superficies de CN. Esta reducción puede afectar el balance de ozono troposférico y

atmosférico (Aumont et al, 1999). Además, en los aerosoles con carbón puede ocurrir una pérdida directa del O_3 que se transforma a oxígeno molecular. Por otro lado, debido a la gran diversidad de compuestos orgánicos que puede haber en la superficie de las partículas de CN, existen muchos reactivos potenciales que pueden seguir diversos procesos químicos atmosféricos; por ejemplo, algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAP, reaccionan con O_2 y HNO_3 para formar mono y dinitro-HAP (Seinfeld & Pandis, 1998).

2 Características de la Ciudad de México

La Ciudad de México tiene una extensión de 4900 km^2 y en ella viven más de 18.5 millones de personas. Diariamente circulan 3.4 millones de vehículos que consumen cerca de 18 millones de litros de gasolina y 5 millones de diesel. La ciudad se encuentra a 2240 metros sobre el nivel del mar, lo que provoca que el contenido de oxígeno en el aire sea 25% menor que en otras ciudades a nivel del mar. El bajo nivel de O_2 y las condiciones cotidianas de operación de los motores industriales y de los automóviles reducen la eficiencia de combustión, y promueven la generación de una mayor cantidad de contaminantes.

Además, las montañas que rodean la Ciudad forman una barrera natural contra la circulación de vientos y los sistemas de alta presión favorecen la estabilidad atmosférica y evitan la dispersión de gases y materia particulada.

3.1 Monóxido de carbono (CO)

Hacia el año de 1996, en la Ciudad de México se emitían diariamente cerca de 6600 toneladas de monóxido de carbono y la mayor parte de este gas provenía de combustiones

completas. El CO también presenta un riesgo a la salud, pues al entrar en el tracto respiratorio, combina con la hemoglobina en los pulmones para formar carboxihemoglobina. Este compuesto reduce la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno a los tejidos del cuerpo. El CO tiene una mayor afinidad que el O₂ para unirse a la hemoglobina, por lo que pequeñas cantidades de CO pueden resultar en grandes niveles de carboxihemoglobina (Perkins, 1974).

Algunos estudios sobre mediciones del CO que emiten los vehículos de la Ciudad de México mencionan que en horas de tráfico intenso existe una concentración promedio de 56 ppm en el interior de los autos (Fernández et al, 1997), que es mayor a la norma de la WHO de 50 ppm/a, volviéndose así un problema de salud para el conductor.

El tiempo de residencia del monóxido de carbono en la atmósfera se ha estimado desde minutos hasta un año. El CO se remueve principalmente de la atmósfera al oxidarse con HO[•] y convertirse en CO₂ (Perkins, 1974). Existen otros procesos que remueven el CO, por ejemplo la deposición, algunas reacciones fotoquímicas, la absorción en diferentes partículas y superficies, pero no lo hacen en grandes cantidades, por lo que estos procesos no son considerados como importantes.

Hipótesis y objetivos del proyecto

En noviembre de 1997 se llevó a cabo el Proyecto Azteca. El objetivo de ese proyecto era determinar las propiedades microfísicas, ópticas y químicas de algunas de las partículas suspendidas en el aire de la Ciudad de México. Tuvo lugar en la ladera del Ajusco (Parque Botánico de la Ciudad de México) y colaboraron investigadores del National Center for Environmental Research (NCAR) y del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Durante ese proyecto se efectuaron mediciones continuas de aerosoles y gases (O_3 , NO_x , CO y SO_2), así como de variables meteorológicas y radiativas.

En ese proyecto se encontró una estrecha relación entre el comportamiento diario del monóxido de carbono (CO) y el coeficiente de absorción (σ_{ab}) de partículas suspendidas en el aire. Algunos de los resultados mostraron una correlación promedio de 0.90 en el comportamiento de ambas especies, sin que hubiese una diferencia significativa entre el día y la noche (Baumgardner et al, 2000).

El coeficiente de absorción tiene una relación directa con la cantidad de carbón negro que contienen las partículas, ya que éste puede absorber una gran cantidad de radiación solar. Esto sugiere que la presencia de CO quizá sea un indicador positivo de partículas que contienen carbón negro en el ambiente, pues ambas especies provienen de una misma fuente, la combustión incompleta de hidrocarburos.

4.1 Hipótesis

Con base en los resultados del Proyecto Azteca, se puede establecer la hipótesis siguiente. "Existe un vínculo entre el monóxido de carbono y el carbón negro, por lo que puede estimarse la concentración ambiental del carbón negro a partir de mediciones existentes de CO, con la misma exactitud que si se realizaran mediciones directas de carbón negro"

A determinadas horas del día la capa límite atmosférica se comporta de manera turbulenta, y ésta es una parte esencial para dispersar los contaminantes (Sorbján, 1989). Por lo tanto, se puede esperar que el comportamiento del CO y el CN sea similar durante estos

condiciones debido al mezclado turbulento, sin que influya el tipo de fuente de emisión o la distancia entre la fuente y el lugar de muestreo. Además, la cantidad de O_2 en el aire de la Ciudad de México es menor que en otras ciudades a nivel del mar, y esto puede favorecer procesos de combustión incompleta, que incrementen la cantidad de CO y CN en la atmósfera.

Cuando la capa límite tiene una estratificación estable, es probable que difiera el comportamiento entre ambas especies debido a que factores como la disminución de actividades humanas, el tipo de combustible empleado, la distancia y la ubicación entre la zona de muestreo y las fuentes de emisión, la edad y el tamaño de las partículas medidas, etc., pueden ser más importantes que las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, los 3.4 millones de automóviles que circulan continuamente por la ciudad, como algunas de las actividades cotidianas de sus habitantes, son una fuente continua de CO y CN, por lo que no se esperan cambios muy significativos en la relación entre ambas especies, al menos durante la noche.

Además, pese a que ambas especies desaparecen de la atmósfera por distintos procesos, parecer lo hacen con la misma tasa, como se puede ver en los resultados del Proyecto Azteca, lo que quiere decir que probablemente una relación monótonica vincula al CO con el CN.

Objetivos

Se pretende determinar una expresión matemática que relacione las concentraciones ambientales de CO con las de CN que contienen las partículas de algunas zonas de la Ciudad de México. Asimismo, se determinarán los parámetros atmosféricos (condiciones meteorológicas, hora del día, etc.) en los que la relación se ajusta de la mejor manera a los resultados

Para comprobar la hipótesis propuesta y cumplir con los objetivos, se debe contar con mediciones de concentraciones ambientales de CN y CO y con datos de algunos parámetros meteorológicos.

Existen pocos estudios sobre la determinación de concentraciones atmosféricas de CN en Ciudad de México. Sin embargo, hoy en día hay bastante literatura sobre la evolución y el comportamiento del monóxido de carbono en la atmósfera de la Ciudad de México (Fernández et al, 1997; González et al, 1993). Esto sugiere que al establecer un índice confiable para determinar CN a partir de CO, entonces se podrá estimar la evolución del CN por medio de datos históricos de CO.

Al pretender vincular al CO con el CN, es necesario obtener mediciones de ambas especies. La medición de CO es directa y normalmente tiene un tiempo de respuesta inferior a 5 minutos. La medición de CN requiere análisis de filtros con partículas recolectadas, y con frecuencia lleva tiempo recolectar las partículas y analizar el contenido de CN en los filtros. En este proyecto se busca obtener valores de CN con un tiempo de respuesta cercano al del CO, así se empleará una técnica indirecta: la medición de la absorción de la luz producida por las partículas, y estos datos de absorción se convertirán a valores de concentración de CN con técnicas que se describen en los capítulos posteriores. Un aspecto muy importante es la determinación de este factor que convertirá los datos de absorción en valores de concentración de CN.

Las muestras de tres lugares característicos de la Ciudad de México, uno predominantemente comercial (Merced) cercano al centro de la ciudad, otro predominantemente industrial al norte (Instituto Mexicano del Petróleo) y el último predominantemente residencial al sur (Centro de Ciencias de la Atmósfera) son importantes para determinar si el factor de conversión varía de un lugar a otro, y de una fuente de combustión a otra. Si el tipo de

combustible, las principales actividades humanas de la zona y las condiciones meteorológicas influyen en la determinación de la expresión matemática, entonces estos efectos se verán en el factor de conversión (o coeficiente de absorción específica, A_E) de cada lugar. Los coeficientes de absorción específica reportados en la literatura comprenden un intervalo entre 4 y 20 m^2/g (Zsold, 1997)

La expresión matemática para estimar el CN a partir del CO debe especificar bajo qué condiciones (intervalo de horas, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc.) la relación entre ambas especies mejora o se reduce.

capítulo 2. Metodología e instrumentación

Este trabajo pretende establecer una relación matemática entre las concentraciones ambientales de monóxido de carbono (CO) y carbón negro (CN), y determinar si la relación es constante o varía con otros factores. Por lo tanto, son importantes los datos de concentraciones ambientales de CO y CN, junto con otros parámetros meteorológicos y atmosféricos que quizás fluyan en esta relación.

En el Proyecto Azteca se encontró que existían variaciones similares entre el coeficiente de absorción (σ_{ab}) de las partículas y las concentraciones ambientales de monóxido de carbono. Este trabajo pretende ir más allá de ese descubrimiento para estimar la concentración del CN en tiempo real, de la misma forma que se determina el CO.

Tanto el CO como el CN pueden medirse de manera directa, pero los instrumentos que determinan CN por lo general requieren acumular cierta cantidad de partículas. Sin embargo, se puede estimar la evolución de CN en el tiempo con observaciones indirectas (por ejemplo, con el coeficiente de absorción de las partículas) al utilizar un factor que convierta los datos de absorción en valores de concentración de CN. Dado que el CN no tiene forma, densidad ni tamaño definidos, la determinación de este factor no es sencilla.

En este capítulo se describen los principios operativos, así como las limitaciones de cada instrumento para determinar CO, CN, CE, σ_{ab} , σ_{rc} y otros parámetros asociados con estas variables. Además, establece los errores involucrados en las distintas mediciones, especialmente aquellas relacionadas con la determinación del CN. Este capítulo también menciona el análisis estadístico que se siguió para establecer la relación matemática entre el CO y el CN

Determinación de CN

Todos los instrumentos de medición de CN utilizan al menos una de las propiedades del carbón. Algunos se basan en sus propiedades físicas, como la extinción óptica de la luz, y otros en las químicas, como los análisis volumétricos y termográficos.

Uno de los métodos físicos más empleados para determinar la concentración de CN atmosférico se basa en la atenuación de la luz que producen algunas partículas; este método puede determinar concentraciones en tiempo real (Petzold et al, 1997), ya que generalmente son las que contienen CN las partículas que absorben luz del aerosol. El carbono es un elemento conductor, por lo que sus electrones pueden absorber energía de una amplia porción del espectro electromagnético. La determinación del CN se basó en esta propiedad y se empleó la ecuación (2.1) para determinar la concentración de carbón negro, [CN], en el aire de cada zona de muestreo:

$$[\text{CN}] = \frac{\sigma_{ab}}{A_E} \quad (2.1)$$

La concentración de CN es igual al coeficiente de absorción de las partículas, σ_{ab} , dividido entre un coeficiente de absorción específica, A_E , de tales partículas. Un fotómetro PSAP proporcionará los datos del coeficiente de absorción; mientras que el coeficiente de absorción específica se determinará a partir de análisis termográficos del contenido de carbón en las partículas recolectadas en las zonas de muestreo, de la concentración de las partículas y de los datos de absorción del fotómetro PSAP (Particle Soot Absorption Photometer).

La ley de Beer-Lambert describe la atenuación de la luz al atravesar un medio filtrante. De un modo similar se puede calcular la variación en la concentración de una sustancia. Si c' es la concentración de referencia y σ es un coeficiente de conversión de esa concentración,

Entonces la atenuación (T) de la luz a una distancia x , al atravesar un medio filtrante de concentración c , se puede calcular como lo indica la ecuación 2.2:

$$\ln(T) = -\sigma \frac{c}{c'} x \quad (2.2)$$

Los coeficientes σ dependen de la composición, de la forma geométrica y del radio de las partículas, así como de su concentración y de un factor de eficiencia cuando el radio de las partículas es menor que la longitud de onda del haz de luz que las analiza.

Cuando la atenuación de la luz se debe a la dispersión, el coeficiente de conversión se llama coeficiente de dispersión (σ_{sc}); si por el contrario se debe a la absorción, entonces es el coeficiente de absorción (σ_{ab}); y si la atenuación de luz se debe a ambos fenómenos, entonces se llama coeficiente de extinción (σ_{ex}). Puesto que la atenuación se debe tanto a la dispersión como a la absorción, el coeficiente de extinción es la suma de los coeficientes de dispersión y de absorción

$$\sigma_{ex} = \sigma_{sc} + \sigma_{ab} \quad (2.3)$$

Estos coeficientes representan la fracción del haz de luz que se pierde por unidad de distancia, debido a la extinción, a la dispersión o a la absorción.

Casi todas las partículas compuestas de CN difieren en tamaño y además contienen otros materiales. Para estas partículas mezcladas, el cálculo exacto de las propiedades de dispersión y absorción sólo es posible bajo ciertas circunstancias; por ejemplo, cuando se trata de partículas esféricas con un tamaño similar y una composición constante.

En términos generales, las partículas con diámetro grande son menos efectivas para atenuar o absorber la luz, ya que sus propiedades ópticas decrecen rápidamente conforme aumenta el tamaño de la partícula. (La figura 2-07 ilustra un ejemplo, al disminuir la absorción específica en función del tipo de partícula que contiene CN y del tamaño de ésta.)

Por otro lado, las partículas pequeñas que absorben luz tienden a dispersarla y absorberla con mayor efectividad, por lo que en ocasiones pequeñas cantidades de estas partículas pueden contribuir considerablemente a atenuar la luz en la atmósfera. Es debido a esto, y a las propiedades de cuerpo negro del carbón, que frecuentemente se emplea el coeficiente de absorción (σ_{ab}) para estimar la concentración de CN en la atmósfera.

Los instrumentos que determinan el coeficiente de absorción de las partículas deben determinar la dispersión y al mismo tiempo determinar el haz de luz que incide en el sensor. Estos tipos generalmente miden algún efecto causado por la absorción (como los métodos gravimétricos y calorimétricos) o miden la transmisión de la luz a través de la muestra; y compensan de alguna manera las pérdidas por la dispersión de la luz, como los métodos de integración de esferas, integración de platos y los etalómetros.

1 Coeficiente de absorción (σ_{ab})

El fotómetro de absorción PSAP mide en tiempo real el coeficiente de absorción de las partículas y puede emplearse para estimar la concentración correspondiente de CN. Las medidas PSAP son continuas conforme las partículas se depositan en el filtro, por lo que con este instrumento se puede obtener una medida de la absorción resuelta en el tiempo. La figura 2-01 muestra el diagrama de funcionamiento del PSAP.

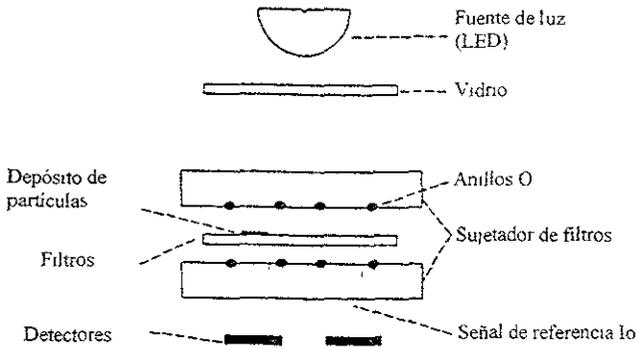


Figura 2-01 Diagrama de funcionamiento del PSAP

El PSAP trabaja en un intervalo de flujo de 0.1-2 LPM y con una fuente de luz (LED) verde con longitud de onda de 565 nm. El haz de luz atraviesa un vidrio y llega hasta uno de los filtros donde las partículas se depositan. El otro filtro sirve de referencia. Los detectores registran el haz de luz que logra atravesar los filtros. El PSAP produce medidas continuas de absorción al registrar los cambios en la transmitancia a través de los filtros. Este instrumento, como cualquier otro método basado en filtros, determina el coeficiente de absorción con la ecuación 2.4:

$$\sigma_{ab} = \frac{A}{V} \ln \left[\frac{I_0}{I} \right] \quad (2.4)$$

Donde A es el área de la mancha en el filtro, V el volumen de aire en un periodo de tiempo dado, I_0 e I son las señales de transmitancia de los filtros de referencia y del detector respectivamente. Este instrumento puede determinar valores de absorción entre $1E-7$ y $1E-2 \text{ m}^{-1}$, con una precisión de $1E-6 \text{ m}^{-1}$. Cuando las señales de transmitancia registradas por el PSAP indican valores inferiores al 50%, las mediciones del aparato dejan de ser confiables, y el filtro o el detector expuesto debe remplazarse por uno nuevo.

Con este instrumento de medición basado en filtros existen muchos factores que pueden dar lugar a una sobre estimación de la absorción. Por ejemplo, el PSAP puede presentar errores si se reduce la transmisión a través del filtro por la dispersión de luz. De hecho, se han reportado casos donde las partículas no absorbentes registran una respuesta similar a la absorción. Este instrumento también responde de diferente manera cuando analiza aerosoles que contienen partículas con distintos tamaños, pues algunas de éstas presentan una "retrodispersión" (backscattering) que altera las lecturas. El dato de absorción reportado por el PSAP incluye una corrección empírica del fabricante que corrige algunos de estos efectos (τ representa la transmisión del filtro)

$$\sigma_{PSAP} = \frac{\sigma_{ab}}{2(0.5398\tau + 0.355)} \quad (2.5)$$

Sin embargo, hay otros modelos empíricos (Bond et al, 1999), que pueden corregir algunos errores de medición del coeficiente de absorción. La ecuación 2.6 corrige el error en la medición de absorción debido a la dispersión de la luz

$$\sigma_{med} = K_1\sigma_{sc} + K_2\sigma_{ab} \quad (2.6)$$

donde los valores de las constantes son $K_1 = 0.02 \pm 0.02$ y $K_2 = 1.22 \pm 0.11$. Estos valores son resultados experimentales de distintas calibraciones de PSAP. Tanto el flujo de alimentación de aire (I_{fluj}) al PSAP, como el diámetro de la mancha en el filtro (I_{mancha}) afectan la medición de absorción, así que también se incluyen dentro del ajuste de medición del coeficiente de absorción

$$\sigma_q = \sigma_{PSAP} \times F_{flujos} \times F_{manchas} \quad (2.7)$$

donde

$$F_{flujos} = \left(\frac{Q_{PSAP}}{Q_{med}} \right) \quad \text{y} \quad F_{manchas} = \left(\frac{D_{med}}{D_{calib}} \right)^2$$

Q_{PSAP} es el flujo determinado por el instrumento y Q_{med} es el flujo determinado con un librador de flujo. De igual forma, D_{med} es el diámetro medido de la mancha en el filtro y D_{calib} un diámetro nominal de 5.1 milímetros.

También debe contemplarse en este ajuste la forma lineal que sigue la absorción (ε_{pend}) y habilidad del instrumento para medir valores cercanos al límite de detección (ε_{ruido})

$$\varepsilon_{pend} = 0.06\sigma_{med} \quad (2.8)$$

$$\text{y} \quad \varepsilon_{ruido} = 0.18\sqrt{t_0/t} \quad (2.9)$$

nde σ_{med} se refiere a la absorción medida por el aparato, t_0 al tiempo de referencia, 24 minutos, y t al tiempo promedio de utilización del instrumento. Por lo tanto, los ajustes a la absorción detectada por el PSAP se resumen en la ecuación 2.10

$$\sigma_{ap} = \frac{\sigma_{aj} + K_1\sigma_x + \varepsilon_{pend} + \varepsilon_{ruido}}{K_2} \quad (2.10)$$

Como se observa en la ecuación 2.10, los datos del coeficiente de dispersión (σ_x) de las partículas también son necesarios para efectuar el ajuste correcto al coeficiente de absorción que se mide con el PSAP

2 Coeficiente de dispersión (σ_{sc})

El nefelómetro M903 es un instrumento que mide el coeficiente de dispersión (σ_{sc}), al replicar la geometría de un nefelómetro de integración normal. La fuente de luz es una lámpara con un filtro óptico definido, cuya longitud de onda es de 530 nm.

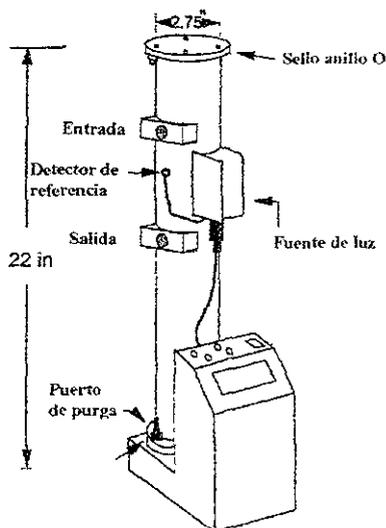


Figura 2-02 Diagrama del nefelómetro M903

La figura 2-02 muestra el diagrama del M903. Este aparato puede registrar medidas de hasta $1E-3 \text{ m}^{-1}$, con una precisión de $1E-6 \text{ m}^{-1}$. Tiene sensores de humedad, presión y temperatura que corrigen automáticamente la dispersión del aire de Rayleigh. Utiliza una muestra de aire con volumen de 0.44 litros. Las mediciones del nefelómetro no necesitan corrección alguna, pues el M903 mide directamente el coeficiente de dispersión (σ_v) de las partículas que pasan por una cámara donde se encuentra la fuente de luz y el detector de referencia. El nefelómetro detecta el coeficiente de dispersión al medir la luz dispersada por el aerosol y restar la luz dispersada por el aire, las paredes del instrumento y el ruido de fondo del sistema.

1.3 Impactador de partículas (MOUDI)

El MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor Modelo 100) es un impactador de cascada para muestreo de aerosoles. Tiene 8 etapas con diámetros aerodinámicos de 18, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32 y 0.18 μm . El MOUDI tiene micro orificios que permiten recolectar partículas a velocidades de flujo relativamente bajas y evitan caídas excesivas de presión a lo largo de las etapas del impactador. La figura 2-03 muestra parte del arreglo interetapas del impactador MOUDI.

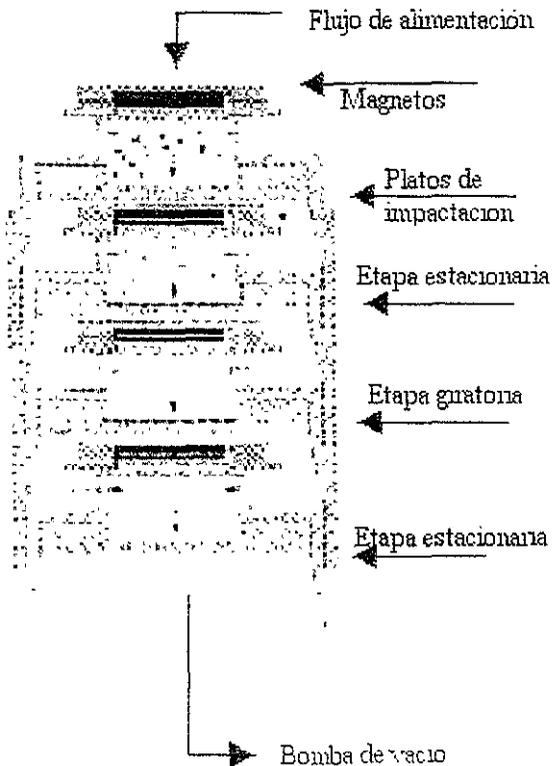


Figura 2-03. Corte vertical del impactador MOUDI

Las etapas giratorias hacen rotar los orificios para obtener depósitos uniformes sobre los platos. El giro relativo de las etapas giratorias y estacionarias del MOUDI permite obtener depósitos uniformes de partículas sobre todos los platos de impactación. Tanto los platos de impactación, como los sujetadores de filtros son intercambiables, de modo que los primeros se pueden cargar en un laboratorio mientras se descarga el sustrato. Además, el MOUDI cuenta con cubiertas selladas para transportar los filtros y los platos de impactación, y de este modo evitar pérdidas por evaporación o reacciones químicas con otros gases. El impactador se coloca en un gabinete, el cual hace girar las distintas etapas. Este gabinete también cuenta con dos manómetros que indican la caída de presión en las etapas 18-1.8 μm y 1.0-0.18 μm . El aumento de la caída de presión indica que algunos micro orificios de esas etapas están obstruidos. Como muestra la figura 2-04, la pérdida interetapas de material es mayor conforme las partículas son más grandes; es decir, en etapas con diámetro aerodinámico superior a 15 μm , la pérdida puede llegar a ser hasta de 20%, pero en las etapas de 3.2-0.18 μm , la pérdida de material es cercana al 0% (Marple et al, 1991)

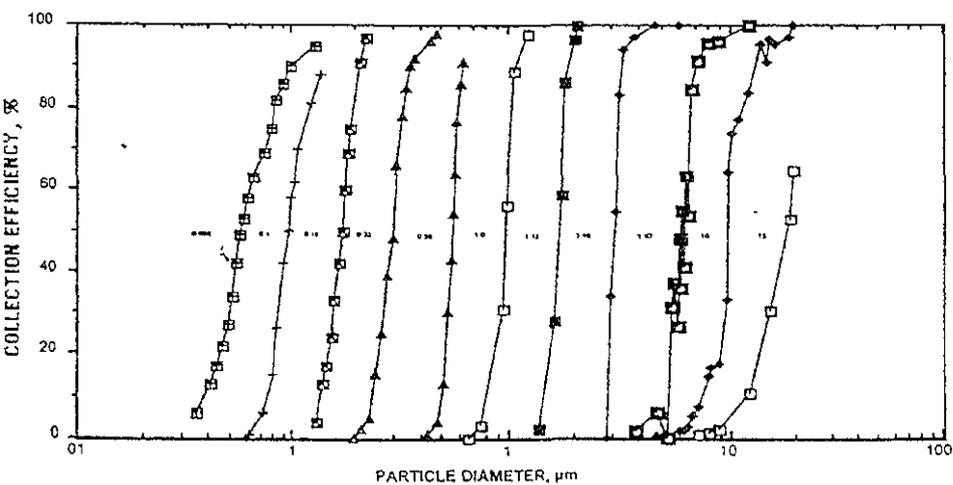


Figura 2-04 Eficiencia de recolección del MOUDI según el diámetro aerodinámico de las partículas (Marple et al 1991)

El MOUDI tiene un flujo de alimentación de aire de $Q_{moudi} = 30$ LPM. Con este flujo, y la cantidad de materia que se deposita en cada plato de impactación, puede estimarse la concentración de las partículas en el ambiente según su diámetro aerodinámico. (El impactador solo clasifica las partículas por tamaños, por lo que los datos del MOUDI únicamente se refieren a la concentración total de partículas según su diámetro aerodinámico, y no distinguen las partículas con CN de otras de la población de aerosoles cuya composición química es diferente.) La concentración de partículas en el ambiente se determina de la siguiente manera:

$$\text{material total en el plato} = \text{peso plato}_{final} - \text{peso plato}_{inicial}$$

$$\text{Concentración, } \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] = \frac{\text{material total en el plato}}{Q_{moudi} \times \Delta \text{ tiempo de uso MOUDI}} \quad (2.11)$$

La figura 2-05 ilustra la concentración total de materia, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, según los diámetros aerodinámicos de las partículas y la fecha en que se realizó cada recolección de muestras. Las etapas del impactador que se emplearon en este trabajo fueron: 0.18, 0.32, 0.56, 1.0 y 1.8 μm . Se consideró que las partículas con diámetros superiores no se originaron directamente en procesos de combustión (Seinfeld & Pandis, 1998). Las distintas concentraciones de partículas se determinaron con el tiempo de operación del MOUDI y con la cantidad total de materia colectada en cada plato.

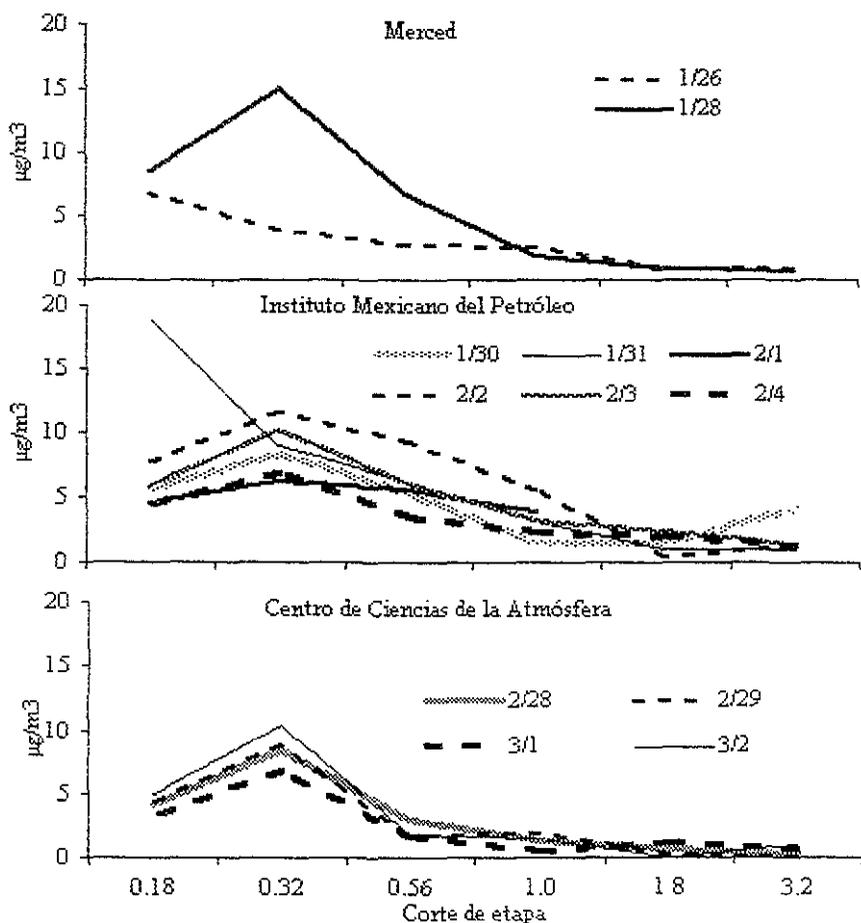


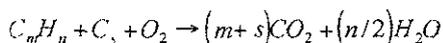
Figura 2-05 Concentración de materia recolectada con el MOUDI según diámetro de las partículas en micras

Análisis del contenido de carbón de las partículas

El MEGA es un analizador de carbono que con un exceso de O_2 oxida la muestra en un reactor catalítico y mide la cantidad de CO_2 que desprende dicha reacción. Después, el instrumento determina la cantidad de carbono contenido en la muestra a partir de la cantidad de CO_2 que se desprende durante la oxidación. Este instrumento, al analizar las muestras

colectadas con el impactador MOUDI, hace un análisis directo del contenido de CE de las partículas recolectadas

La reacción que se efectúa en el horno es la siguiente (donde C_nH_m es el compuesto orgánico y C , es el carbón elemental):



El MEGA crea un termograma de CO_2 contra temperatura, donde el área bajo la curva termograma representa el contenido de carbón que contiene la muestra. La figura 2-06 muestra los termogramas de las partículas recolectadas en cuatro etapas de corte (0.18, 0.32, 0.56 y 0.90 μm) con el MOUDI, en la estación Merced el 28 de enero de 2000.

La temperatura de oxidación es determinante para conocer la procedencia del CO_2 . Los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles tienen una temperatura de oxidación inferior a los $500^\circ C$, mientras que el CE se oxida a temperaturas más altas.

El MEGA se calibró antes de analizar las muestras. Se emplearon tres sustancias orgánicas para determinar el porcentaje de recuperación de carbón y la precisión en la tasa de calentamiento de la muestra. Se prepararon 3 soluciones de fialato de potasio, alanina y sacarosa a una concentración conocida, y se emplearon alícuotas de estas soluciones para analizar su contenido de carbón. Las alícuotas se colocaban en filtros previamente preparados en una mufla (en este modo, se eliminaba cualquier rastro previo de carbón en los filtros). Con la cantidad estequiométrica de carbón contenida en cada alícuota, y el resultado del análisis de carbón, se determinó el porcentaje de recuperación del MEGA. El porcentaje de recuperación de carbón de las muestras fue 81.8%, y la precisión en la tasa de calentamiento fue de $\pm 2.7^\circ C/min$. También se cambió la velocidad de calentamiento de las muestras en $30^\circ C/min$. De igual forma, se calibró el flujo de alimentación de O_2 al horno catalítico.

Algunas especies químicas probablemente presentes en las muestras, como el Na y el K, pueden modificar la temperatura de oxidación, ya que catalizan la oxidación de los compuestos orgánicos y del CE (Novakov & Corrigan, 1995) y desplazan en algún sentido las curvas de oxidación de CO₂. Este tipo de desplazamientos no es fácil de eliminar, puesto que estas especies acompañan a los productos de combustión desde su formación y es difícil removerlos de las muestras sin alterar el estado del resto de los compuestos; además, la actividad catalítica de estas especies depende en gran medida de su abundancia en la muestra.

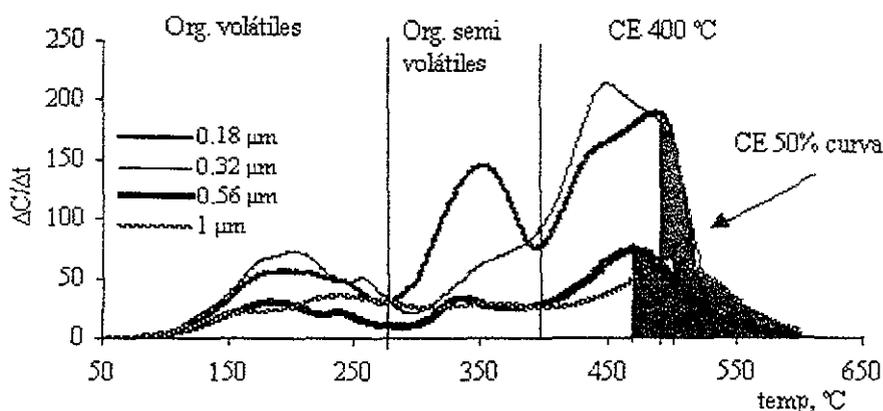


Figura 2-06. Termograma de las etapas 0.32 y 0.18 μm Estación Merced (28 de enero)

Existen dos técnicas básicas para determinar la cantidad de carbón elemental en la muestra a partir de los termogramas del MEGA. La primera técnica consiste en considerar como todo material que se oxide a partir de los 400°C, que es la temperatura de oxidación del CE (El área gris claro de la figura 2-06 muestra la cantidad de CE que se determinaría con la primera técnica). La segunda técnica consiste en integrar solamente la mitad de la última curva del termograma y posteriormente multiplicarla por 2 para calcular el total del área bajo la curva. (En la figura 2-06, se muestra la mitad de las áreas en gris oscuro). La segunda técnica evita que se considere como CE a ciertos compuestos orgánicos semivolátiles que se oxidan a temperaturas

arcanas a los 400°C. Sin embargo, es probable que en ocasiones esta técnica subestime la cantidad de CE en la muestra, pues no siempre considera al CE que se oxida a temperaturas arcanas a los 400°C.

Puesto que la determinación de la cantidad exacta de CE no es trivial, ya que algunos compuestos pueden alterar el proceso de oxidación, se empleó el promedio de los resultados de ambas técnicas de integración para determinar el contenido de CE en cada muestra analizada. En la literatura se indica que la oxidación del CE ocurre a temperaturas superiores a los 400°C; sin embargo, existen diversas sustancias químicas que pueden catalizar la reacción y alterar la temperatura de oxidación del CE. Además, compuestos como los carbonatos, cuya temperatura de oxidación es superior a los 400°C, pueden estar presentes en las muestras.

5 Coeficiente de absorción específica (A_E)

En la atmósfera existen diversas partículas con propiedades ópticas similares a las del CN. Para diferenciar unas de otras y tener plena certidumbre de que las mediciones del coeficiente de absorción (σ_{ab}) sólo corresponden a CN, es necesario ajustar el valor del coeficiente de absorción específica, A_E .

Los valores reportados de coeficientes de absorción específica oscilan entre 4 y 20 m²/g, el valor intermedio de 10 m²/g se emplea como estándar en algunos instrumentos para determinar concentraciones ambientales de CN. El A_E discrepa básicamente de un estudio a otro por los siguientes motivos (Fuller et al, 1999)

Las partículas con CN no tienen una morfología definida y muchas veces son aglomerados de partículas y no esferas individuales.

Generalmente hay errores en la determinación del índice de refracción del CN.

Las partículas con CN no tienen densidad uniforme.

La composición química y el contenido de agua cambia de una partícula a otra.

El coeficiente de absorción cambia según la longitud de onda con la que se determine (Horvath, 1993).

La distribución de tamaños de las partículas influye de manera determinante en el coeficiente de absorción específica.

Estos aspectos se refieren específicamente al tipo de compuestos que acompañan al CN, como a las condiciones atmosféricas que existen cuando se producen estas partículas. La figura 2-07 muestra el comportamiento del A_E en función del tipo de partículas y del radio de las partículas. Los términos Soot H25 y Soot H50 corresponden a partículas de hollín con una relación en carbono-carbono 25:75 y 50:50, respectivamente. Soot A, B y G se refieren a modelos de aerosoles, donde el último, Soot G, representa al grafito (Fuller, 1999). Como se ve en esta figura, el coeficiente de absorción específica cambia según el tipo y el diámetro de la partícula, y un valor de $10 \text{ m}^2/\text{g}$ corresponde sólo a cierto tipo de aerosol que contiene carbón negro (Horvath, 1993). Por esta razón, se determinó un A_E para cada sitio de muestreo, puesto que cada lugar es diferente en cuanto a su población de aerosoles, a la cantidad de vehículos que generan partículas de CN, al tipo de combustibles que emplean y a las condiciones meteorológicas del sitio.

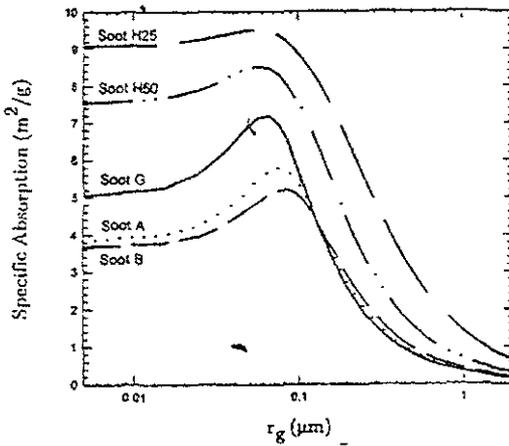


Figura 2-07 Absorción específica (A_E) de hollín en función del tipo y del radio de la partícula (Fuller, 1999)

Para calcular la concentración de CN, el PSAP asume un coeficiente de absorción específica equivalente a $10 \text{ m}^2/\text{g}$ y emplea la ecuación 2.1 para determinar la concentración de CN ambiental. Esta misma relación se empleará para determinar las concentraciones de CN en distintos sitios de muestreo, a partir de datos del coeficiente de absorción proporcionados por el PSAP y de la absorción específica, que resultará del CE determinado con el MEGA y de la concentración de partículas capturadas con el MOUDI.

Determinación de monóxido de carbono (CO)

Algunas de las mediciones de CO se obtuvieron con un analizador de CO Modelo 48 de Teledyne Electrochem que mide CO ambiental en tiempo real. Para la detección del gas, este aparato utiliza un detector de radiación IR que mide la alteración de radiación por la presencia del monóxido de carbono. Este instrumento tiene un programa con la curva de calibración, por lo que las mediciones de CO se corrigen automáticamente, sin que las altere la presión, la

temperatura o la presencia de otros gases. El analizador trabaja dentro de un intervalo de 0-50 °C, entre 20-30°C. El valor mínimo de detección de este aparato es de 0.1 ppm, aunque puede ajustarse para que mida valores inferiores. El instrumento reporta las mediciones de CO en partes por millón (ppm), por lo que los datos deben convertirse a valores de concentración, con las siguientes ecuaciones

$$ppm = \frac{V_{CO}}{V_{air}} \quad (2.12)$$

En la ecuación 2.12, el volumen de CO, V_{CO} , puede expresarse como una función de la ecuación de estado 2.13

$$V_{CO} = n_{CO} \frac{RT}{P} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, al sustituir las ecuaciones 2.12 en 2.13 se puede calcular la concentración de CO en $\mu\text{g}/\text{L}$. de la siguiente manera

$$\frac{m_{CO}}{V_{air}} = \frac{M_{CO}P}{RT} \times ppm \quad (2.14)$$

Donde M_{CO} es el peso molecular del monóxido de carbono, P es la presión, T la temperatura, R la constante universal de los gases y m_{CO} la masa del monóxido de carbono.

3 Propagación de errores

En la atmósfera existen otras sustancias que interfieren en la medición de absorción del CN (por ejemplo el polvo y algunos metales, que también absorben radiación a 550 nm) y a veces los instrumentos las cuantifican como parte de la concentración de CN. Esto generalmente se convierte en un error intrínseco en las mediciones. Además, como la composición y el tamaño del CN cambia según las condiciones atmosféricas, el tipo y la cantidad de emisiones, etc., no es fácil eliminar estas fuentes de error, pues los instrumentos no siempre analizan el mismo tipo de CN.

La sola determinación del coeficiente de absorción no implica un cálculo exacto del CN ambiental, por eso otros instrumentos se emplearon para poder reducir la incertidumbre en las mediciones. Tanto la precisión de los instrumentos, como los errores aleatorios, la incertidumbre de los datos y los errores sistemáticos afectan la medición correcta de los distintos parámetros. Esta propagación de errores se puede ver como una combinación de distintas fuentes de error en la misma medición. La tabla 2-01 muestra los intervalos de detección y la precisión de los instrumentos utilizados en este trabajo.

Tabla 2-01 Precisión de los instrumentos

Instrumento	Intervalo de detección	Precisión
PSAP	$1E-7 - 1E-2 \text{ m}^{-1}$	$< 1E-6 \text{ m}^{-1}$
Nefelómetro	$1E-6 - 1E-3 \text{ m}^{-1}$	$< 1E-6 \text{ m}^{-1}$
Analizador CO	0.1 - 50 ppm	$\pm 0.1 \text{ ppm}$
MOUDI	1.8 - 18 μm diámetro aero	$> 98\%$ recolección
MEGA horno cat	50 - 700°C	$\pm 2.7^\circ\text{C}/\text{min}$
MEGA analizador CO ₂	0.1 - 400 ppm	$\pm 0.1 \text{ ppm}$

Una forma de determinar este tipo de errores es considerar que la medición de una variable z (que no se puede medir directamente) depende de otras, por ejemplo x e y , que sí

den medirse. Ahora, si σ_x y σ_y son los errores de medición de cada variable, entonces la propagación del error de la variable z , σ_z , se puede determinar como en la ecuación 2.15:

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \quad (2.15)$$

En otras palabras, las posibles fuentes de error se suman al resultado final de la variable medida, que en este caso es la concentración de CN. La base del cálculo para determinar el CN atmosférico relaciona el coeficiente de absorción con la absorción específica, de la siguiente manera:

$CN = \frac{\sigma_{ab}}{A_E}$ es decir, la propagación de errores es

$$\sigma_{CN}^2 = \sigma_{ab}^2 + \sigma_{A_E}^2 \quad (2.16)$$

$$\text{donde } \sigma_{ab}^2 = \sigma_{mancha}^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_{fluj}^2 + \sigma_{bep}^2 \quad (2.17)$$

Como se ve en la ecuación 2.17, el error en la determinación de la absorción, σ_{ab}^2 , depende a su vez de errores de medición del diámetro de la mancha, de la dispersión producida por las partículas, del flujo de alimentación al PSAP y de la medida de absorción misma, respectivamente.

En el caso del error en la determinación del coeficiente de absorción específica, $\sigma_{A_E}^2$, las posibles fuentes de error son:

$$\sigma_{AE}^2 = \sigma_{ab}^2 + \sigma_{MOUDI}^2 + \sigma_{MEGA}^2 \quad (2.18)$$

donde

$$\sigma_{MOUDI}^2 = \sigma_{Eficiencia}^2 + \sigma_{Flujo}^2 + \sigma_{Pérdidas}^2 \quad (2.19)$$

$$\sigma_{MEGA}^2 = \sigma_{Integración}^2 + \sigma_{CO_2}^2 + \sigma_{Pérdidas}^2 \quad (2.20)$$

Es decir, la absorción específica depende de los valores obtenidos por el PSAP, el MOUDI y el MEGA. En el caso de la ecuación 2.19 del MOUDI, los errores corresponden a la eficiencia de recolección de las etapas, al flujo de alimentación de aire y a las pérdidas de material durante el transporte de los filtros, respectivamente. En la ecuación 2.20 del MEGA, los errores corresponden al método de integración de los termogramas para determinar el CN, al instrumento que analiza CO₂ y a las pérdidas de material, pues en algunos casos se cortaron los filtros por la mitad, ya que la cantidad de partículas que contenían era muy grande y el analizador de CO₂ del MEGA podría rebasar su capacidad de detección.

Al sustituir estos valores en σ_{CV}^2 se obtiene la ecuación 2.21 global de propagación de errores en la determinación de concentraciones de CN

$$\sigma_{CV} = \sqrt{2\sigma_{ab}^2 + \sigma_{Eficiencia}^2 + \sigma_{Flujo}^2 + \sigma_{Pérdidas}^2 + \sigma_{Integración}^2 + \sigma_{CO_2}^2 + \sigma_{Pérdidas}^2} \quad (2.21)$$

Donde el primer término de la ecuación 2.21 corresponde a la absorción, los siguientes 3 MOUDI y los restantes al MEGA. La tabla 2-02 muestra el resultado total de esta ecuación y propagación de errores de los instrumentos empleados

Tabla 2-02. Propagación de errores en cada sitio de muestreo

<i>Fuentes de error</i>	Sitio de muestreo		
	Merced	IMP	CCA
	<i>Error relativa, %</i>		
Absorción PSAP	6	6	6
Diam. de mancha en filtro PSAP	2	2	2
Flujo de alimentación PSAP	7	7	7
Dispersión NEFELOMETRO	2	2	2
Eficiencia de recolección MOUDI	4	4	4
Flujo alimentación MOUDI	5	5	5
Pérdidas por transporte MOUDI	1	1	1
Método de integración MEGA	29	10	16
Analizador de CO ₂ MEGA	5	5	5
Pérdidas por transporte MEGA	1	1	1
[ecuación 2.21] σ_{CN} =	32	16	20

Como se observa en la tabla 2-02, el método de integración de los termogramas del MEGA es la fuente de error más relevante; esto se debe a que en ocasiones los resultados de la integración de CN a 400°C con la primera técnica no coincidían plenamente con los resultados de la integración del 50% de la curva de la segunda técnica. Además, la cantidad de muestras colectadas en algunos sitios no fue lo suficientemente grande como para reducir el error producido por ambas técnicas de integración.

Otras mediciones

La Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) participaron en este trabajo al proporcionar algunos datos de mediciones de gases (O₃, O₂, NO, NO_x, SO₂), partículas (PM10) y parámetros meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y presión atmosférica). El equipo que realizó las

liciones pertenece a estas instituciones, por lo que las calibraciones de estos instrumentos les compete exclusivamente a ellas.

Sitios de muestreo

Se escogieron tres sitios de la Ciudad de México que fueran característicos de la ciudad por su posición geográfica, actividades humanas, cantidad y tipo de vehículos, así como por las actividades que presentaban para realizar los análisis de gases y partículas.

La figura 2-08 muestra la ubicación geográfica de los sitios de muestreo. Estos sitios presentan zonas predominantemente comerciales (Estación Merced), industriales (Instituto Mexicano del Petróleo) y residenciales (Centro de Ciencias de la Atmósfera).



Figura 2-08 Ubicación de los sitios de muestreo

Estación Merced (MER)

La estación Merced (long. $99^{\circ}07'10''$ lat $19^{\circ}25'20''$ alt. 2240m) se encuentra en Av. Congreso de la Unión #148, en la zona centro de la Ciudad de México. La estación cuenta con analizadores de CO , O_3 , NO_x , NO , SO_2 , H_2S y PM_{10} . La subestación meteorológica mide dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

La estación de monitoreo se localiza en el techo de un Centro de Salud; alrededor de este se encuentran comercios relacionados con el Mercado de la Merced, edificios habitacionales de desarrollo vertical y el deportivo Venustiano Carranza, el cual tiene áreas sin cubierta vegetal permanente.

El flujo de vehículos en las avenidas y calles que rodean al centro de salud es alto, y por ahí circulan autos particulares, camiones de carga, autobuses y microbuses. El metro elevado se encuentra a unos 15 m de la estación y su altura rebasa a la toma de muestras.

Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)

La estación del IMP (long. 99°08'50" lat. 19°29'25" alt. 2240 m) se encuentra en Avenida Instituto Mexicano del Petróleo #152, en la zona noroeste de la Ciudad de México. El analizador de CO le pertenece a la RAMA, el resto de los analizadores (O₃, NO_x, NO, SO₂, H₂S y PM10) son propiedad del IMP. La subestación meteorológica mide dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

La estación de monitoreo se encuentra sobre un edificio de dos plantas que pertenece al Instituto Mexicano del Petróleo. A un costado de este edificio hay un campo deportivo cubierto de césped y en el lado norte se encuentra un edificio de tres plantas.

En las inmediaciones del IMP el uso de suelo es principalmente habitacional, con áreas donde existen casas de 2 plantas y otras con edificios de varios niveles; el área cuenta con servicios educativos, que incluyen escuelas, centros de salud, centros recreativos y comerciales. Cerca del IMP se localiza la zona industrial Vallejo. Dentro de las instalaciones del IMP el flujo de vehículos es bajo, pero en las calles que lo rodean es alto y circulan en éstas autos, autobuses y camiones de carga.

Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

El CCA (long. 99°12'15" lat. 19°19'20" alt. 2340 m) se encuentra en Av. Insurgentes Sur, en la zona sudoeste de la Ciudad de México. El CCA cuenta con analizadores de CO, O₃ y O₂. La subestación meteorológica mide dirección y velocidad del viento, presión, temperatura y humedad relativa. El CCA está dentro de la zona de institutos de Ciudad Universitaria. El edificio tiene dos niveles y se encuentra aproximadamente a 500 m del metro Universidad. El tipo de suelo en la zona es básicamente habitacional. Además de los edificios de la UNAM que cuentan con jardines y áreas verdes con una cubierta vegetal permanente, hay casas de dos o tres niveles. El flujo de vehículos en las calles adyacentes es bajo y predominan los autos particulares. Sin embargo, los alrededores del metro Universidad tienen un flujo relativamente alto la mayor parte del día.

Pese a que las instalaciones donde se realizaron las mediciones contaban con todo el equipo necesario, éste no siempre funcionó de manera adecuada. En ocasiones, el equipo no operó apropiadamente o sólo trabajaba durante ciertos intervalos de tiempo. La tabla 2-03 muestra los parámetros que se midieron en cada lugar, así como la fecha y la hora en que se realizaron los muestreos. El símbolo 1/2 en la tabla indica cuándo el equipo no operó adecuadamente o realizaba mediciones intermitentes o incompletas. Por el contrario, el símbolo 1 indica cuándo el equipo funcionaba de manera apropiada. Finalmente, los espacios en blanco indican los momentos en que los instrumentos no estaban en operación. Como se puede ver en la tabla 2-03, en términos generales el equipo operó de manera adecuada en las tres estaciones. Sin embargo, en la estación Merced hubo diversas interrupciones al momento de medir los parámetros. En promedio, el equipo de esta estación operó 3 horas diarias. A pesar de estos problemas, se consideró que los datos obtenidos en la estación eran suficientes para realizar los análisis posteriores.

Estación	CCla	Flotado	U _{ab}	U _{se}	CO	O ₃	SO ₂	NO	NO _x	MOGDI	P	T	HK	VV	DV
MER	25/01	0741-2359	+	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2		1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	26/01	0001-2359	+	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2		1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	27/01	0000-2359	+	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2		1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	28/01	0001-2359	+	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	29/01	0000-1637	+	+	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2		1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
IMP	30/01	1334-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	31/01	0834-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	01/02	0000-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	02/02	0000-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	03/02	0000-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	04/02	0000-2359	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	05/02	0000-1034	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+
CCA	22/02	1051-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	23/02	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	24/02	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	25/02	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	26/02	0829-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	27/02	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	29/02	0807-2359	+	+	+	+				+	+	+		+	+
	01/03	0000-2359	+	+	+	+				+	+	+		+	+
	02/03	0000-0414	+	+	+	+				+	+	+		+	+
	03/03	0820-2359	+	+	+	+				+	+	+		+	+
	04/03	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	05/03	0000-0820	1/2	1/2	1/2	1/2					1/2	1/2		1/2	1/2
	06/03	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	07/03	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
	08/03	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+
09/03	0000-2359	+	+	+	+					+	+		+	+	
10/03	0000-1800	+	+	+	+					+	+		+	+	

Los parámetros que se muestran en la tabla 2-03 son: coeficiente de dispersión (σ_{sc}), coeficiente de absorción (σ_{ab}), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), óxido de nitrógeno (NO), óxidos de nitrógeno (NO_x), bióxido de azufre (SO_2), impactador de partículas MOUDI (PM_{10}), presión barométrica (P), temperatura ambiente (T), humedad relativa del ambiente (HR), velocidad del viento (VV) y dirección del viento (DV).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos comienza con una de las herramientas más fundamentales: la serie de tiempo. Algunos instrumentos empleados en este trabajo tenían tiempos de respuesta muy diferentes, y con el fin de homogeneizar los datos, se utilizó en las series de tiempo el promedio en bloque y el promedio móvil. La figura 2-09 ilustra una serie de tiempo, con el promedio en bloque y el promedio móvil de los datos.

El promedio en bloque reduce la población de datos, pues un solo valor representa un intervalo de tiempo determinado. El manejo de muestras más pequeñas de datos facilita en gran medida los análisis estadísticos posteriores, sin embargo, esta reducción de la muestra de datos puede resultar en la eliminación de aspectos importantes del comportamiento general de los parámetros. Por el contrario, el promedio móvil conserva la población original de datos, pues se calcula en el orden sucesivo de valores. La ecuación 2.22 se empleó para calcular el promedio móvil (F) de los valores (X)

$$F_{(t+i)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{t+i+j} \quad (2.22)$$

El método de promedio móvil también elimina las pequeñas fluctuaciones que no son relevantes para el problema y simplifica la búsqueda de comportamientos comunes en los datos medidos.

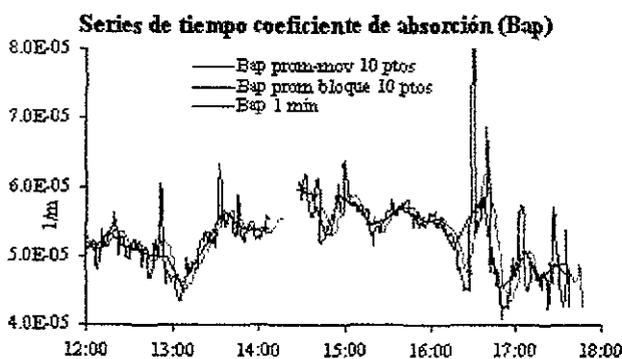


Figura 2-09 Serie de tiempo, promedio en bloques y promedio móvil del coeficiente de absorción (σ_{as})

Sin embargo, la relación entre los valores sucesivos depende del intervalo de tiempo empleado. Es decir, mientras más corto sea el intervalo de tiempo empleado en el promedio móvil, más probable que los valores estén más relacionados entre sí.

El método del promedio móvil no disminuye la población de datos, pero en muchos casos, al contar con una población muy grande de datos, aumenta la probabilidad de caer en errores de apreciación porque se puede dar importancia a eventos insignificantes para el objetivo del estudio.

La distribución de frecuencias es otra herramienta de análisis estadístico. En términos generales, es un resumen gráfico de una muestra de datos ordenada en clases y frecuencias de los datos. Los gráficos se componen al trazar Z que representa el valor del promedio de la muestra menos el dato X , divididos por la desviación de la muestra s . En el otro eje se traza la frecuencia de eventos f_i del datos X , dividida entre el número total de eventos $\sum f_i$.

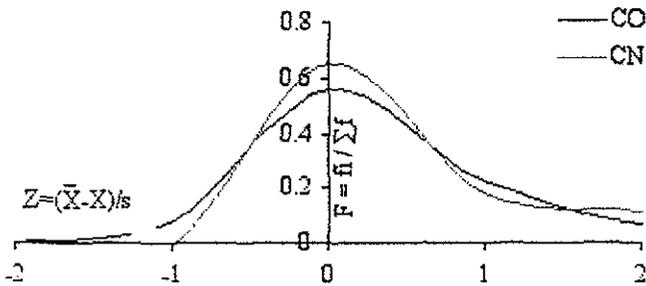


Figura 2-10. Distribución normalizada de datos

Como lo muestra la figura 2-10, un aspecto importante de la distribución de frecuencias que con base en la forma de la distribución se puede establecer el tipo de la muestra de datos, así como las ecuaciones más apropiadas para análisis estadísticos posteriores, como el coeficiente de correlación y el análisis de regresión. En el caso de las curvas normalizadas, como la de la figura 2-10, donde $Z = (\bar{X} - X)/s$, los valores cercanos al promedio de la muestra están alrededor del 0 y las unidades de Z representan la distribución de datos alejados del valor promedio, en unidades de desviaciones estándar. Este tipo de gráficos permite comparar ambas variables en la misma escala. La forma de las curvas de distribución es importante, pues cualquier relación entre 2 variables con una distribución normal es estrictamente una relación lineal. Y también es una medida para diferenciar las varianzas de cada muestra de datos.

El análisis de correlación, R , determina el grado de covariabilidad de dos variables. La correlación indica si las variables cambian en la misma dirección. Cuando ésta es positiva, entonces las variables tienen una relación positiva, y ambos valores aumentan en la misma proporción. Cuando es cercana a cero, significa que las variables se distribuyen al azar, aunque esto no significa que deban ser independientes. Del mismo modo, cuando una correlación es menor que cero, quiere decir que una de las variables aumenta mientras la otra disminuye. Al

que en una correlación positiva, esto indica que puede haber una dependencia entre las variables, aunque la correlación en sí no implica que existan razones de tal dependencia.

Otro aspecto importante es el nivel de significancia (P) que muestra la correlación y la muestra de datos. El nivel de significancia determina la probabilidad de que la correlación sea representativa de la muestra de datos, con base en los grados de libertad que tiene dicha muestra. Después el nivel de significancia se acerque más a la unidad, entonces la correlación de la muestra será más representativa. Los grados de libertad, ϕ , se calculan de la manera siguiente: $\phi = N - 2$, donde N representa el número de datos que contiene la muestra.

El cuadrado del coeficiente de correlación es la proporción de la varianza que responde a la regresión lineal. Este valor se denomina coeficiente de determinación, R^2 . El valor del coeficiente de correlación, no el signo, es el que determina la proporción de la varianza que responde a la regresión lineal. El conocimiento de la variable independiente no permite predecir exactamente la dependiente, a menos que la correlación sea igual a 1 o a -1.

El análisis de regresión se aplica generalmente en casos donde existe una correlación o dirección en la dependencia, y al igual que en el caso CO-CN de la figura 2-11, la regresión puede determinar una relación entre dos o más variables ligadas de un modo causal.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el análisis de regresión muestra una relación estadística, por lo que cuando se asigna un valor a la variable independiente, la regresión proporcionará un valor esperado (promedio) que dependerá de la desviación de los datos y no precisamente un valor observado.

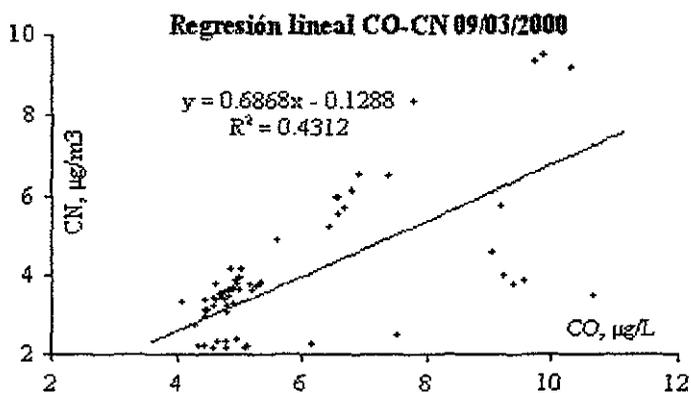


Figura 2-11. Regresión lineal de datos y coeficiente de determinación

Además, el análisis de regresión considera que la relación entre ambas variables se mantiene sin cambios y que los valores de la variable dependiente no constituyen una nueva distribución, esto implica que los valores se pueden interpolar y extrapolar dentro y más allá de la población misma.

título 3. Resultados

En este capítulo se presenta el tratamiento preliminar de los datos obtenidos. Una vez que diversos instrumentos median los parámetros y se registraban en archivos, se trazaron series de tiempo de estos datos. De estas series, se estableció el comportamiento cíclico del monóxido de carbono y del coeficiente de absorción de las partículas. Además, se registraron otros parámetros como el O_3 y SO_2 , junto con algunos datos de las condiciones meteorológicas del momento de muestreo. Las series de tiempo contienen valores comparativos de la humedad relativa del ambiente y la dirección del viento, pues son factores que pueden afectar directamente la relación entre el CO y el CN.

La recolección de partículas del MOUDI y los análisis de carbón del MEGA indicaron la concentración y la fracción de carbón orgánico y negro en éstas. Con estos resultados, y el promedio diario del coeficiente de absorción, σ_{ab} , se derivó una absorción específica, A_E , en cada sitio de muestreo.

Después, los diagramas de distribución de frecuencias permitieron determinar el tipo estadístico de las muestras de datos, de modo que las mismas muestras determinasen el método estadístico más apropiado para analizarlas. Además, la distribución de frecuencias puede ayudar a determinar si las muestras de datos vienen o no de la misma población.

Series de tiempo

Se trazaron series de tiempo con promedios en bloque y promedios móviles de los datos (humedad relativa, velocidad y dirección del viento, O_3 , SO_2 , CO, y σ_{ab}). Este documento sólo

muestra los gráficos de promedios en bloque de cada sitio de muestreo, puesto que no hubo grandes diferencias entre los resultados de un método y el otro. Los gráficos contienen los siguientes parámetros: humedad relativa (HR), dirección del viento (Dir Viento), velocidad del viento (Vel Viento), coeficiente de absorción (Bap) y monóxido de carbono (CO). Estos dos últimos parámetros se trazaron en la misma figura para facilitar su comparación. Cada gráfico cubre una semana, de domingo a sábado, y tiene marcas de separación en intervalos de 4 horas entre un día y otro. Además, para facilitar las comparaciones de un sitio de muestreo con otro, la escala de unidades de las figuras es la misma. En este tratamiento preliminar de datos se eliminaron todos aquellos que eran incongruentes o incorrectos con el método de adquisición de datos. De manera especial, todos aquellos datos del PSAP que presentaban una transmitancia inferior al 50% fueron eliminados, ya que los valores del coeficiente de absorción cuya transmitancia sea inferior a este valor no se consideran confiables.

1 Merced

La figura 3-01 muestra las series de tiempo de la estación Merced. Estas series comienzan el domingo 23 de enero (1/23) y terminan al sábado 29 de enero (1/29). En estas series, la humedad relativa (HR) muestra picos máximos (80%) en las primeras horas del día (00:00) y disminuye gradualmente hasta 10% a las 18:00. El comportamiento cíclico que sigue la humedad relativa se debe al enfriamiento (aumento de humedad) y calentamiento (disminución de la humedad) de la capa límite atmosférica. La dirección del viento (Dir Viento) muestra que los vientos del este (90°) predominan en la estación Merced. Por otro lado, la velocidad del viento (Vel Viento) se mantiene generalmente abajo de los 5 m/s y es constante a lo largo del

Esta baja intensidad en la velocidad del viento aumenta la incertidumbre sobre los datos de dirección del viento. La figura 3-01 muestra el comportamiento general de estos parámetros.

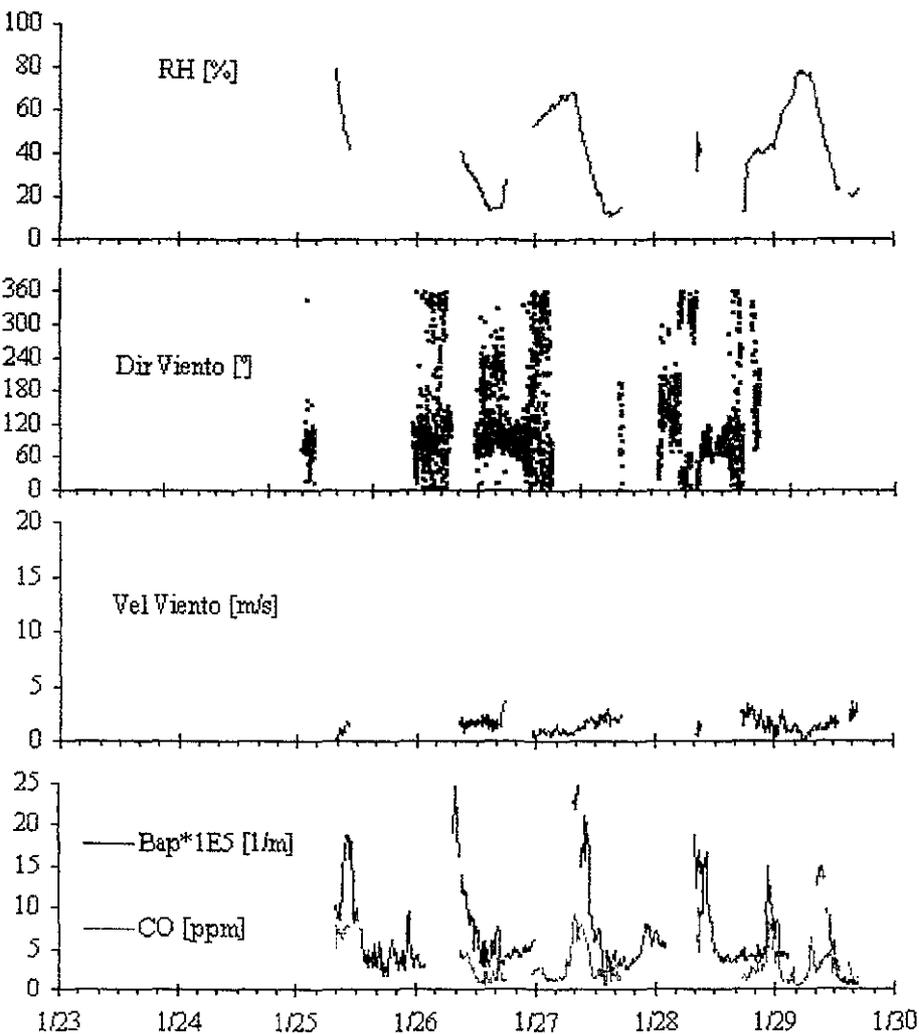


Figura 3-01 Serie de tiempo promedio en bloque de 10 pto. Estación Merced

El monóxido de carbono (CO) tiene un comportamiento oscilatorio con actividad máxima entre las 10:00 y las 21:00. El valor máximo registrado en la Merced fue 10 ppm. Los ciclos del CO son regulares, con valores muy altos durante las mañanas y las noches.

El coeficiente de absorción (σ_{ab}) presenta un comportamiento periódico muy definido y en ciertos momentos en fase con el CO. Lamentablemente, es difícil saber si este comportamiento en sí se mantiene durante todo el día, pues la insuficiencia de datos impide conocer la evolución completa del CO a lo largo del día. El coeficiente de absorción, al igual que el CO, decrece considerablemente el sábado. Este comportamiento es en cierta forma justificable, ya que los sábados disminuyen las actividades comerciales y el tránsito de vehículos en la Merced.

Otro aspecto relevante es que el día 28 de enero, hubo un paro de vehículos organizado por el Departamento de Policía Auxiliar del D.F. en Av. Congreso de la Unión. Sin embargo, este incidente no aparece en los gráficos porque la estación de la RAMA no registró dato alguno durante ese tiempo. En términos generales, esta serie de tiempo no muestra relación alguna entre el CO y σ_{ab} con el resto de los parámetros medidos, probablemente porque la cantidad de datos es insuficiente. En la estación Merced, salvo la línea del metro elevado, no había construcciones de mayor altitud a la estación en un radio aproximado de 30 metros, sin embargo, es probable que las construcciones a esa distancia impidiesen el flujo libre del aire y disminuyeran la velocidad del viento. Por otro lado, la estación Merced se encontraba muy cerca de las avenidas que la rodeaban, a escasos 10 metros, lo que puede influir positivamente en la relación entre el coeficiente de absorción (B_{ap}) y el CO.

La figura 3-02 muestra las series de tiempo del IMP. Estas series comienzan el domingo 1 de enero (1/30) y terminan al sábado 6 de febrero (2/6). En el IMP la humedad relativa normalmente es cercana al 80% a las 4:00, mientras que a las 18:00, presenta valores cercanos al 100%. Aquí predominan los vientos del norte. Al igual que en la Merced, la dirección del viento en el IMP es errática. La velocidad del viento disminuye durante las noches y después aumenta gradualmente a lo largo del día. Los máximos frecuentemente se dan por las tardes con una velocidad superior a 8.0 m/s.

En el IMP, el CO normalmente tiene dos máximos diarios, el primero como a las 10:00 y el segundo como a las 21:00. En ocasiones, los valores de CO superan los 8 ppm, pero en otros días generales el valor del CO es casi siempre menor a 4 ppm. Hay un crecimiento constante de los niveles de este gas conforme avanza la semana. Algo relevante es el hecho de que el domingo hay un incremento de CO en comparación con el resto de la semana, que coincide con un aumento en la velocidad del viento y un aumento en la humedad relativa.

El coeficiente de absorción tiene un comportamiento periódico similar al CO, los dos se encuentran en fase, sus episodios máximos llegan a superar los $8E-5m^{-1}$. Al igual que los demás contaminantes, su presencia disminuye durante los fines de semana. Algo relevante es que el coeficiente de absorción parece estar en fase con el CO a lo largo de la semana, con excepción de los días 4 por la tarde y el sábado 5 de febrero.

En comparación con la Merced, en el IMP los valores del σ_{ab} no son tan grandes. Esto se debe a varias razones, la primera es que el tipo de actividades y la cantidad de vehículos que circulan por la zona difieren a las Merced; además, en el IMP la velocidad del viento es mucho mayor que en la Merced, lo que ayuda a una rápida dispersión de las partículas

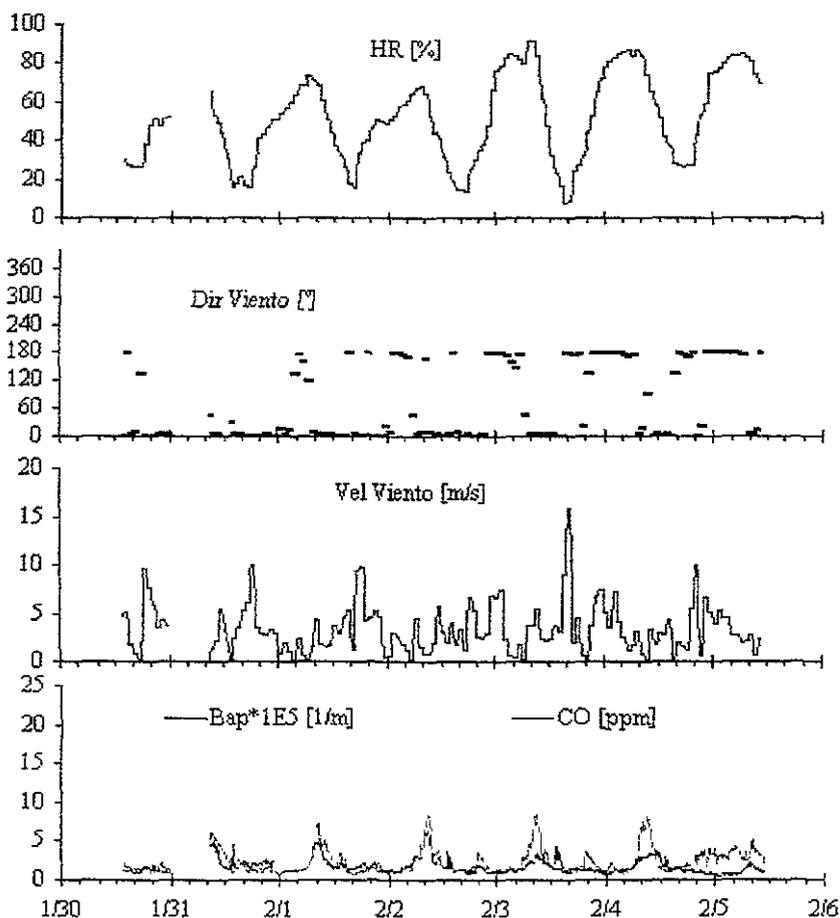


Figura 3-02 Sene de tiempo promedio en bloque 10 pto. Estación IMP

En términos generales, se obtuvieron más datos en el IMP que en la Merced; sin embargo, tampoco se evidenció alguna relación del CO y el Bap con los demás parámetros. La estación del IMP estaba despejada en un radio aproximado de 50 m; sin embargo, algunos árboles se encontraban cerca de la estación, y probablemente afectaban los datos registrados en ese lugar. Además, la estación se encuentra a unos 100 metros de calles y avenidas.

Las series de tiempo de la figura 3-03 abarcan los días comprendidos entre el domingo 20 (2/20) y el sábado 26 (2/26) de febrero. La figura 3-04 ilustra las series de tiempo del domingo 27 (2/27) al sábado 4 de marzo (3/4). Y finalmente, la figura 3-05 muestra las series de tiempo del domingo 5 (3/5) al sábado 11 (3/11) de marzo. En el CCA no se contó con datos instrumentales de humedad relativa (HR), por ese motivo se emplearon los registros de humedad relativa que proporcionaba el nefelómetro. En términos generales, la humedad relativa se comportó de igual manera en las tres estaciones; sin embargo, como lo muestran las figuras 3-03, 3-04 y 3-05, en el CCA los valores de HR son inferiores en comparación con las otras estaciones. Esto se debe a que el nefelómetro estaba conectado a un secador que redujo la cantidad de agua en el aire que entraba al equipo. La velocidad del viento oscila entre 0 y 5 m/s, sus mínimos se presentan cerca de las 4:00 y los máximos cerca de las 18:00. Por otro lado, la dirección del viento en el CCA muestra un patrón muy definido, el viento proviene del este por las noches y por las primeras horas del día, y del noreste por las tardes. Este comportamiento parece estar en fase con la humedad relativa de modo tal, que podría decirse que el viento que proviene del norte tiene una humedad relativa baja, mientras que el del este es más húmedo.

La evolución diaria del CO tiene generalmente dos picos máximos, el primero es cerca de las 0:00 y el segundo a las 21:00, ambos picos presentan valores superiores a los 6 ppm. Los días de semana decrecen las actividades, y pese a que las condiciones meteorológicas se comportaron de manera habitual, los niveles del CO atmosférico no muestran sus picos característicos. La evolución del σ_{ab} (Bap) es muy similar a la del CO; sin embargo, en algunas ocasiones el σ_{ab} presenta máximos donde el CO tiene una actividad normal, pero estos eventos son frecuentes.

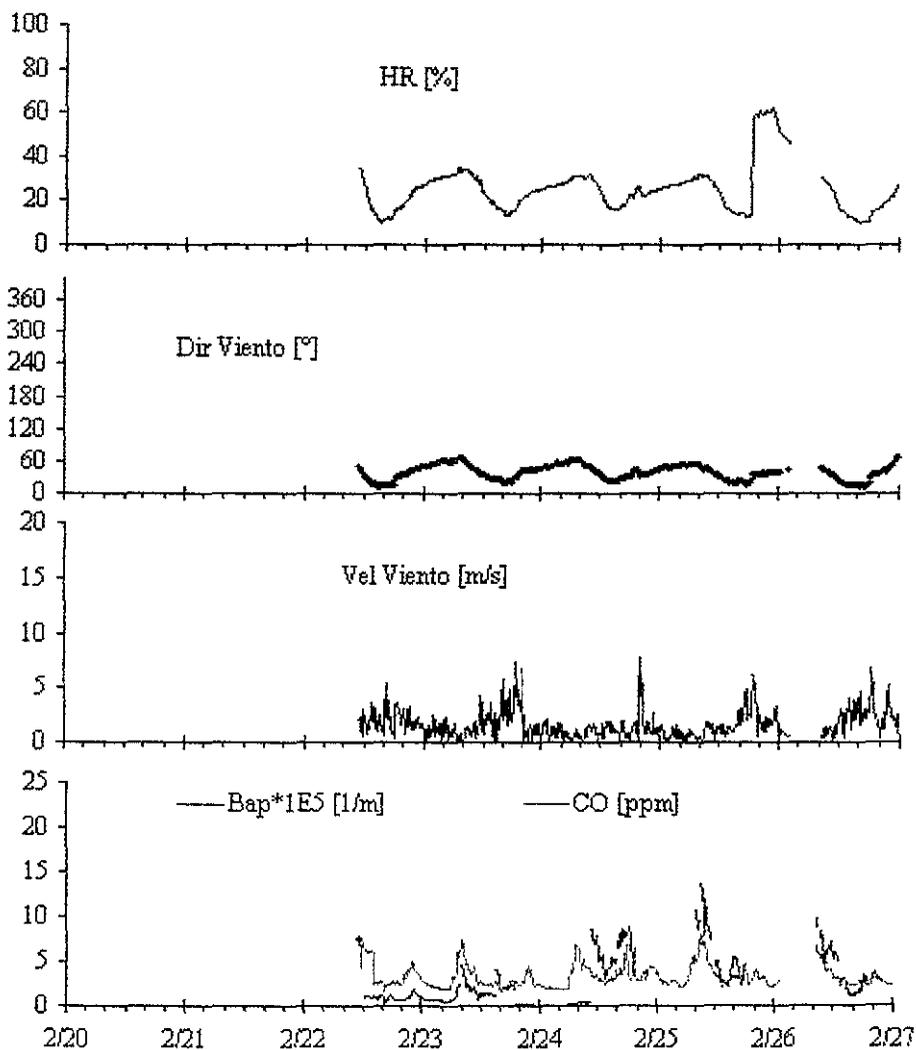


Figura 3-03 Serie de tiempo promedios en bloque 10 pto Estación CCA

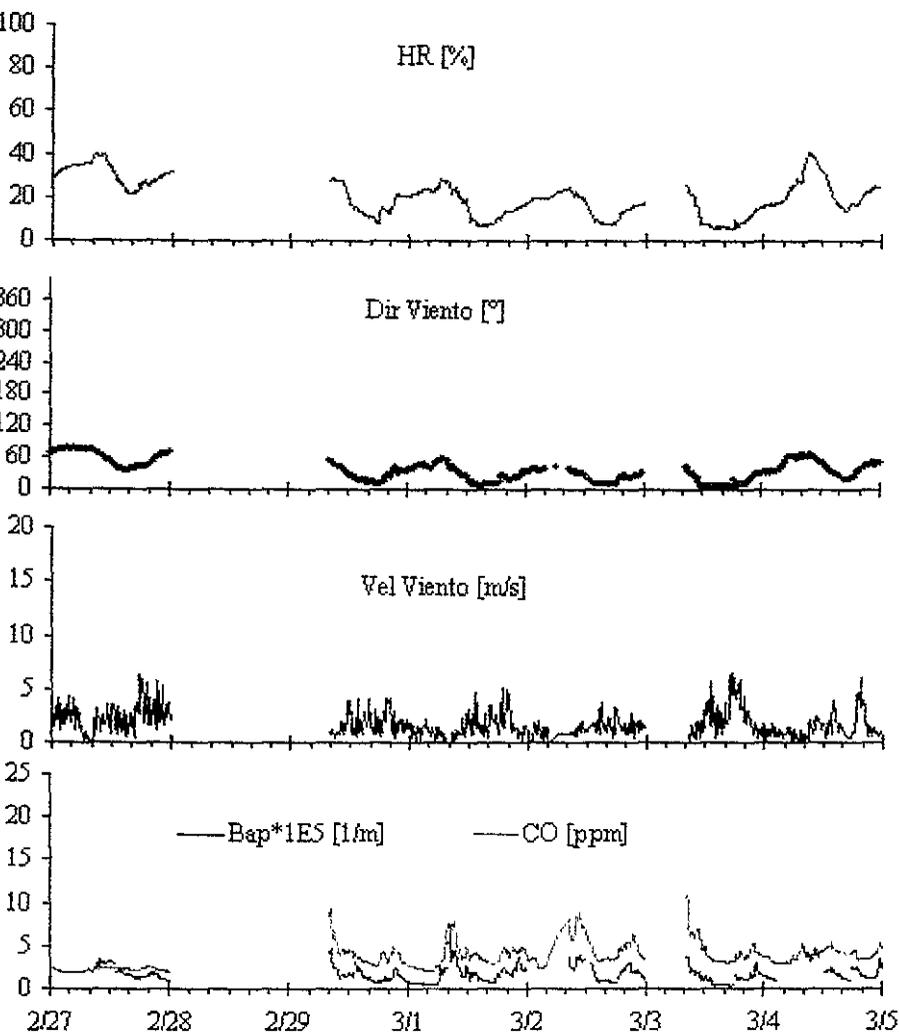


Figura 3-04 Serie de tiempo promedios en bloque 10 ptos. Estación CCA

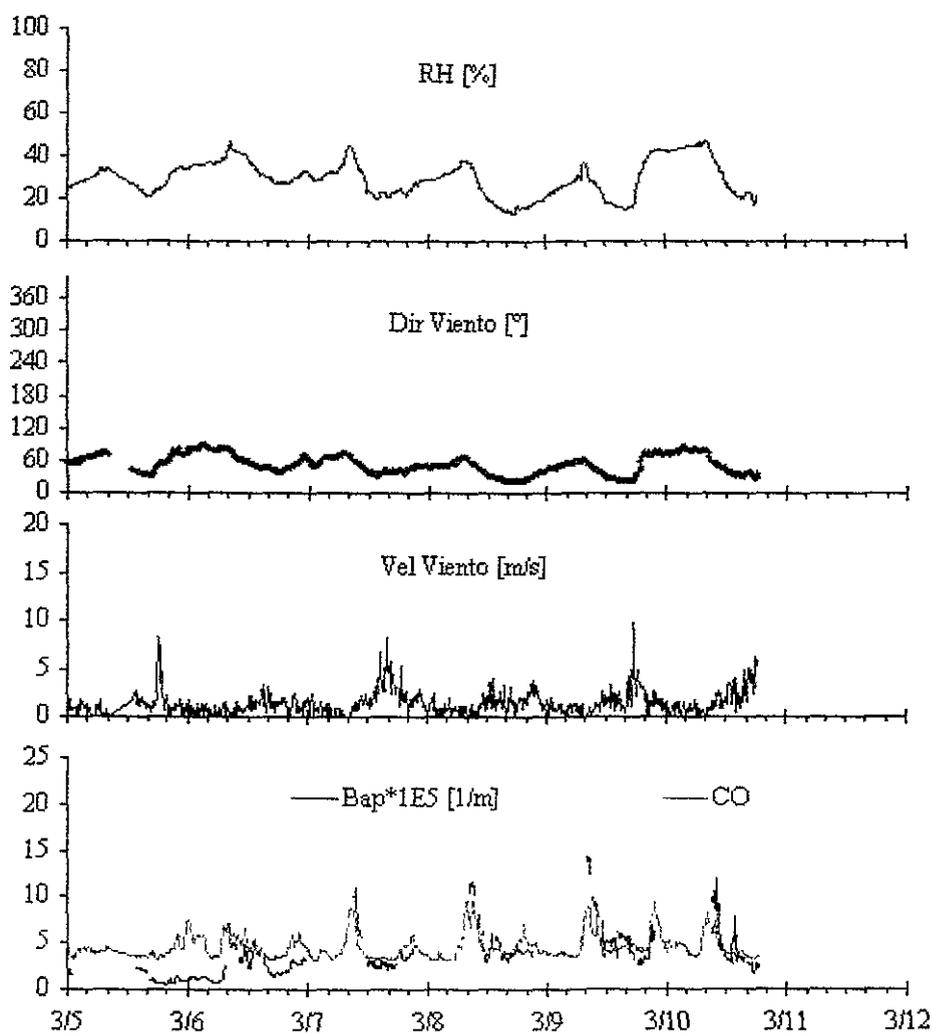


Figura 3-05. Serie de tiempo promedios en bloque 10 ptos Estación CCA

Análisis de las muestras

En el análisis de las muestras recolectadas con el MOUDI se desecharon las primeras dos placas, y se analizaron las siguientes: 1.8, 1.0, 0.56, 0.32 y 0.18 μm . Sólo se analizaron estos tamaños de partículas porque se consideró que las partículas con diámetro mayor provienen de procesos distintos a los de la combustión (Seinfeld & Pandis, 1998). La tabla 3-02 muestra los resultados del análisis de las placas. Esta tabla indica la cantidad de materia total ($M. total$) determinada con el MOUDI, así como el contenido de carbón total ($C. total$), orgánico ($C. org$) y negro ($C. negro$) determinados con el MEGA para cada día de muestreo. También se calculó el promedio del monóxido de carbono y del coeficiente de absorción (σ_{ab}) para esos días. Con estos datos, se determinó el coeficiente de absorción específica (A_E) de cada muestreo, con la ecuación 2.1:

$$A_E = \frac{\bar{\sigma}_{ab}}{[CN]} \quad (2.1)$$

Después, los distintos valores de A_E se promediaron para calcular el coeficiente de absorción específica de cada lugar. El promedio de estos resultados y el error estándar del A_E se muestran en la tabla 3-01. Estos fueron los valores que se emplearon para convertir los datos de absorción a unidades de concentración de carbón negro.

La figura 3-06 muestra las concentraciones de carbón negro determinadas con el MEGA, a partir de las placas analizadas con el MOUDI. En la figura se ve que las partículas con un tamaño de 0.32 μm contenían la mayor cantidad de CN. En la Merced se recolectó la mayor cantidad de partículas con carbón negro. Esto puede explicarse si se toma en cuenta que la zona principalmente comercial, tiene una alta densidad de población y circulan continuamente

vehículos de carga y automóviles. Además, la estación se encontraba a 10 metros de calles y avenidas. Por otro lado, la existencia de grandes cantidades de carbón negro es acorde con el promedio del σ_{ab} que se determinó en esa zona.

El IMP presenta características muy especiales, como se ve en la figura 3-06, la concentración de CN en partículas con diámetro de 0.56, 1.0 y 1.8 μm es mayor que en el CCA. La concentración de CN en partículas mayores a 0.56 μm quizá se deba a la proximidad de la zona industrial Vallejo al sitio de muestreo. La presencia de CN en partículas menores que 0.56 μm es característica de vehículos que utilizan gasolina y diesel (Perkins, 1974), así que es muy probable que la Terminal de Autobuses del Norte, a 2 km del sitio, contribuya con la generación de partículas de este tamaño. Los análisis de CN realizados a las placas del CCA tienen un patrón muy definido. El CCA presenta una gran concentración de CN en las partículas con diámetros de 0.18 y 0.32 μm , y como se ve en la figura 3-06, los diámetros de partículas mayores que 0.32 μm contienen una menor cantidad de CN.

Como se mencionó anteriormente, se promediaron los valores de A_E determinados con ambos métodos de integración de termogramas para calcular una absorción específica de cada sitio de muestreo. Los resultados se resumen en la tabla 3-01:

Tabla 3-01 Promedio de A_E para cada sitio

<i>Sitio de muestreo</i>	<i>Absorción específica, m^2/g</i>
Merced	15.68 ± 3.33
Instituto Mexicano del Petróleo	6.62 ± 2.31
Centro de Ciencias de la Atmósfera	15.37 ± 12.06

Las diferencias entre los coeficientes de absorción específica (A_E) determinados en cada sitio puede deberse a varios motivos, como la edad, el tamaño, la densidad y el origen de las partículas, el contenido agua en éstas, etcétera. En el caso del IMP, es probable que el tipo de

combustible empleado en la zona influya directamente en la determinación del A_E (Fuller et al, 99).

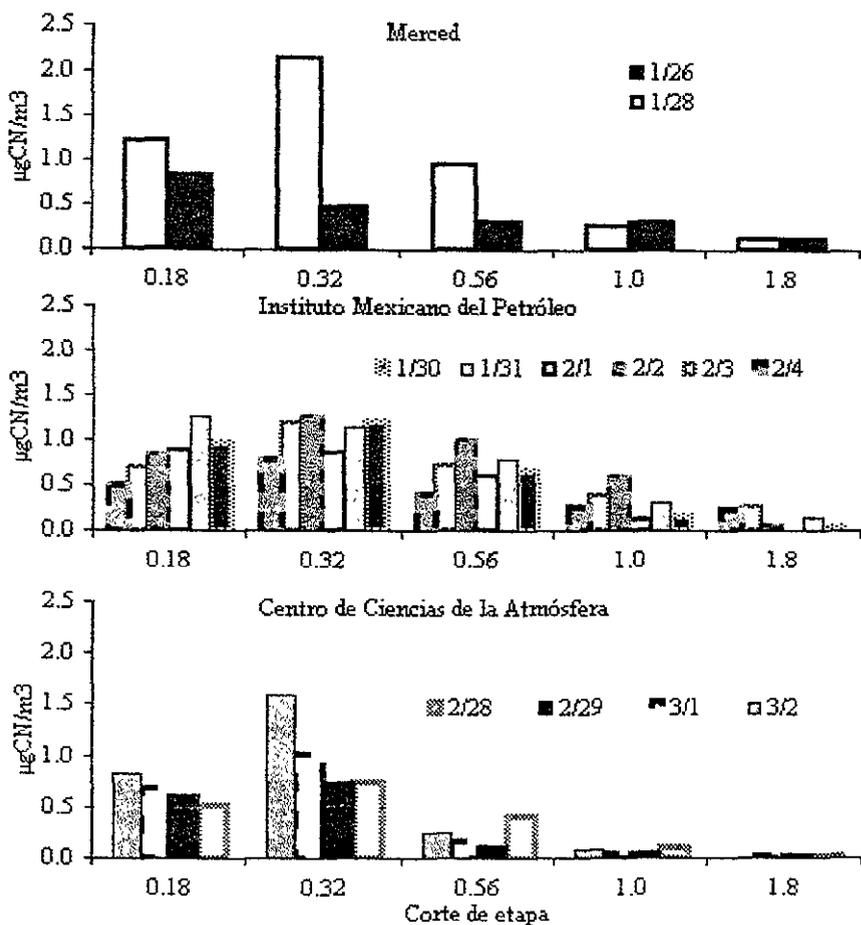


Figura 3-06 Concentración de CN según el diámetro de las partículas en micras

Tabla 3-02 Coeficientes de absorción específica (AE)

		MOUDI	MEGA						
			Integración 50% curva				Integración 400-600°C		
Fecha	Estación	M. total, μg	C. total, μg	C. negro, μg	C. org, μg	A_E , m^2/g	C. negro, μg	C. org, μg	A_E , m^2/g
24-ener-00	Merced		707.58	128.12	579.37		244.38	453.43	
26-ener-00	Merced	716	190.81	85.96	104.85	37.95	90.62	100.19	36.00
28-ener-00	Merced	1437	408.30	174.72	233.58	18.03	236.38	171.92	13.33
<i>Promedio</i>		<i>1076</i>	<i>435.56</i>	<i>129.60</i>	<i>305.93</i>	<i>27.99</i>	<i>190.46</i>	<i>241.85</i>	<i>24.67</i>
<i>Desviación</i>		<i>509</i>	<i>259.46</i>	<i>44.40</i>	<i>245.39</i>	<i>14.09</i>	<i>86.56</i>	<i>186.71</i>	<i>16.03</i>
30-ener-00	IMP	998	271.04	118.74	152.3	7.90	154.29	116.75	6.08
31-ener-00	IMP	1565	308.86	104.60	204.26	10.35	192.47	116.39	5.62
1-febr-00	IMP	861	243.76	79.40	164.36	11.69	133.07	110.69	6.98
2-febr-00	IMP	1405	269.27	143.56	125.71	4.61	160.57	108.7	4.12
3-febr-00	IMP	1158	262.53	124.78	137.75	6.29	146.47	116.06	5.36
4-febr-00	IMP	723	163.56	78.92	84.64	5.51	88.28	75.28	4.92
<i>Promedio</i>		<i>1118</i>	<i>253.17</i>	<i>108.33</i>	<i>144.84</i>	<i>7.73</i>	<i>145.86</i>	<i>107.31</i>	<i>5.51</i>
<i>Desviación</i>		<i>322</i>	<i>48.76</i>	<i>25.83</i>	<i>40.02</i>	<i>2.80</i>	<i>34.47</i>	<i>16.05</i>	<i>0.98</i>
28-febr-00	CCA	760	255.05	22.70	232.35	30.09	130.33	124.72	5.24
29-febr-00	CCA	710	200.42	17.76	182.66	36.29	106.57	93.85	6.05
1-marz-00	CCA	570	262.02	45.30	216.72	19.77	120.57	141.45	7.43
2-marz-00	CCA	790	305.53	70.58	234.95	11.42	120.79	184.74	6.68
<i>Promedio</i>		<i>707</i>	<i>255.76</i>	<i>39.09</i>	<i>216.67</i>	<i>24.39</i>	<i>119.57</i>	<i>136.19</i>	<i>6.35</i>
<i>Desviación</i>		<i>97</i>	<i>43.12</i>	<i>24.18</i>	<i>24.06</i>	<i>11.01</i>	<i>9.79</i>	<i>37.90</i>	<i>0.93</i>

En el caso específico de la Merced, se ignoraron los resultados del 26 de enero, porque el UDI indicó un nivel abajo del normal en uno de sus manómetros de vacío, quizá debido a una pequeña fuga entre las etapas o a que algunos de sus micro orificios estaban bloqueados. Se verificó que los valores obtenidos del A_E difieren entre sí, concuerdan con otros valores reportados en la literatura, $4 < A_E < 20 \text{ m}^2/\text{g}$. Con estos valores, se determinó el contenido de carbón negro de acuerdo a un lugar con base en el σ_{ob} . Todos los cálculos posteriores se realizaron con esta conversión de unidades.

Distribución de frecuencias

Antes de aplicar otros análisis estadísticos como coeficientes de correlación (R) y análisis de regresión, se trazaron las distribuciones de frecuencias de los datos de CO y CN. La distribución de frecuencias puede ayudar a conocer mejor el comportamiento de los datos y a seleccionar los análisis estadísticos más apropiados. La figura 3-07 muestra la distribución normalizada de datos en la estación Merced. Las curvas de CN en las distribuciones son similares casi todos los días. Existen muchos datos que son 2 o 3 desviaciones estándar más allá del promedio ($Z = -3, -2$). Estos datos representan los picos de máxima actividad, y normalmente corresponden a los episodios de las mañanas. En cuanto al CO, sus curvas en las distribuciones no son constantes a través de los días, esto se debe principalmente a que los datos proporcionados por la RAMA no estaban completos, pues sólo eran fracciones de algunas horas. Sin embargo, se puede ver que las curvas en las distribuciones de los días 27 y 28 de enero son similares entre sí. De hecho, las curvas en la distribución de toda la semana (Semana de Merced) muestra un comportamiento muy parecido entre ambas especies. Las curvas en las

distribuciones tienen forma de campana y la mayor parte de los datos se agrupa cerca del valor promedio ($Z=0$).

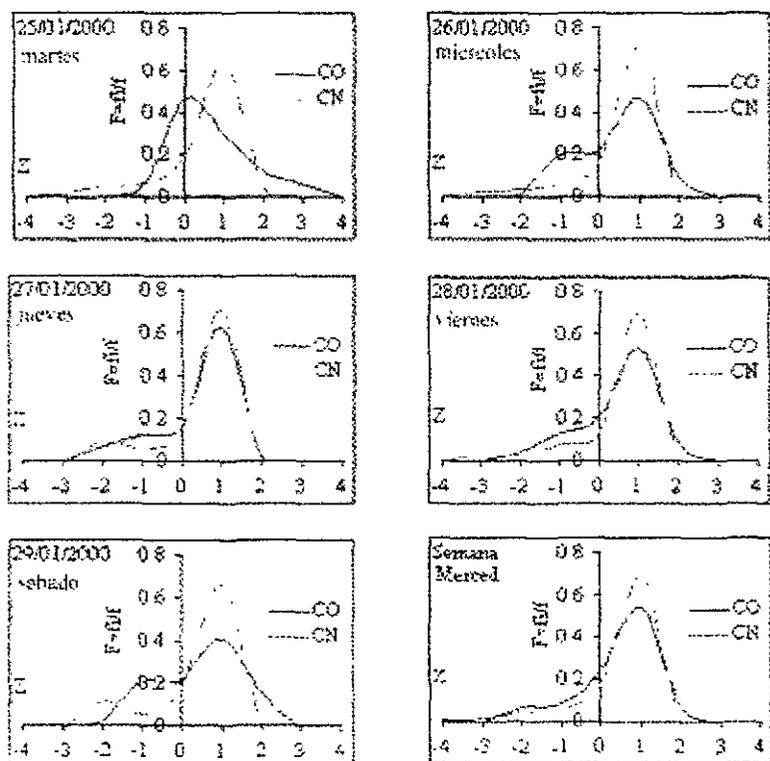


Figura 3-07 Distribución normalizada de datos de CO y CN en la Merced, 25 al 29 de enero

En términos generales, ambas especies parecen seguir el mismo comportamiento, salvo los días martes 25 y sábado 29 de enero. Esto probablemente se debe a que la cantidad disponible de datos de CO el 25 de enero fue muy pobre y no es posible realizar un análisis comparativo de ambas especies en ese día. Del mismo modo, el sábado las especies tienden a comportarse de manera muy distinta al resto de la semana, por lo que estos datos no se tomarán en cuenta para análisis posteriores.

La figura 3-08 muestra las distribuciones de datos en el IMP. A diferencia de la Merced, IMP las muestras de datos del CO son similares a las del CN, y abarcan la mayor parte del tiempo. Como se ve en la figura, las distribuciones de ambas especies tienden a parecerse en la mayoría de los días, con excepción de las distribuciones del domingo 30 de enero, viernes 4 y sábado 5 de febrero. De nuevo, los datos que corresponden al fin de semana presentan un comportamiento atípico. Sin embargo, las curvas en la distribución de los datos a lo largo de la semana son bastante parecidas entre sí, lo que puede ser un indicador positivo de que existe un vínculo entre las especies.

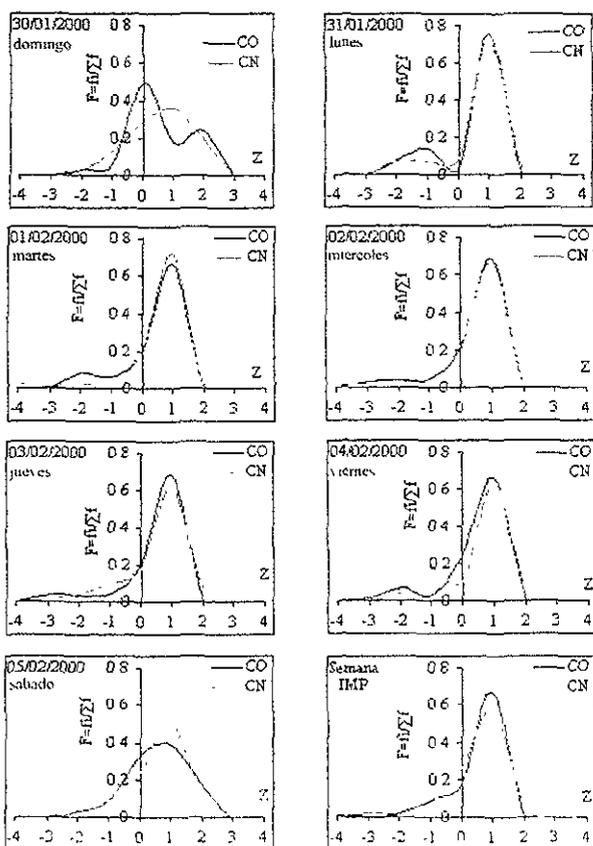


Figura 3-08 Distribución de datos de CO y CN en el IMP, 30 de enero al 5 de febrero

En el caso del CCA, las figuras 3-09, 3-10 y 3-11 muestran las distribuciones de tres semanas. A diferencia de la Merced y el IMP, en el CCA las distribuciones son ligeramente más altas ($F < 0.4$), esto quiere decir que una mayor proporción de datos está más alejada del medio ($Z=0$) y éstos tienen una distribución más uniforme ($Z=-2, -1, 1, 2$, etc.).

La figura 3-09 muestra el caso de la semana 01, del 22 al 26 de febrero, donde algunas veces en las distribuciones no tienen la misma forma. Por ejemplo, los días 24 y 25 de febrero, las curvas en las distribuciones son muy diferentes. Esto probablemente afectará los coeficientes de correlación y los análisis de regresión. Sin embargo, las distribuciones de los datos de toda la semana (Semana CCA01) son muy parecidas, lo cual es un buen indicador de que el vínculo CO-CN se mantuvo esta semana.

La figura 3-10 muestra las distribuciones de la semana 02, del 27 de febrero al 4 de marzo. Las curvas de CO y CN en las distribuciones no se parecen entre sí, salvo los días miércoles 1 y sábado 4. Esto ya se presentó en las otras estaciones. Las curvas en la distribución del 29 de febrero, 2 y 3 de marzo no tienen una explicación aparente, puesto que las series de tiempo no indican nada extraordinario como para justificar un comportamiento así.

La figura 3-11 presenta la semana 03. Las curvas de CO y CN en las distribuciones se parecen más, en comparación con las dos semanas anteriores. El domingo 5 y el lunes 6 de marzo las curvas de CO y CN en las distribuciones no se parecen entre sí; sin embargo, el comportamiento del 5 de marzo es considerado normal, puesto que se trata de un domingo, pero los datos del 6 no tienen una explicación aparente. Afortunadamente, las curvas de CO y CN en las demás distribuciones sí se parecen entre sí (martes 7, miércoles 8, jueves 9, viernes 10 y sábado 11 de la semana CCA03), lo cual indica que ambas especies se comportaron de manera similar.

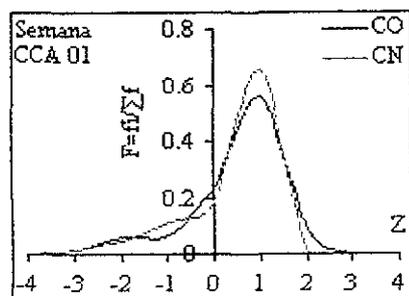
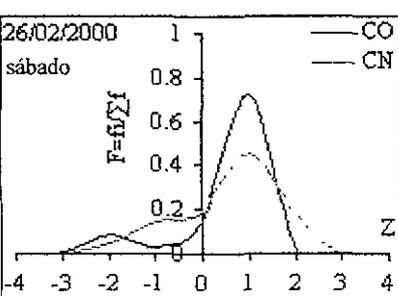
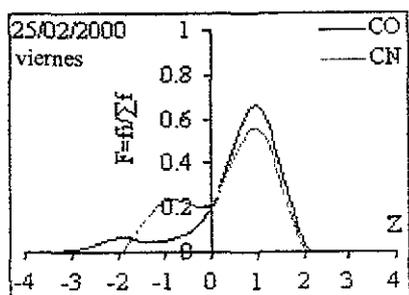
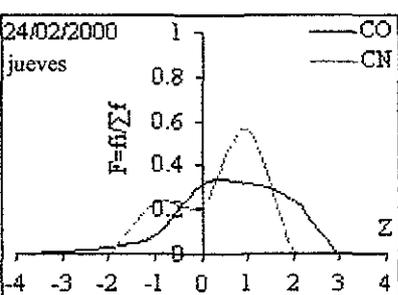
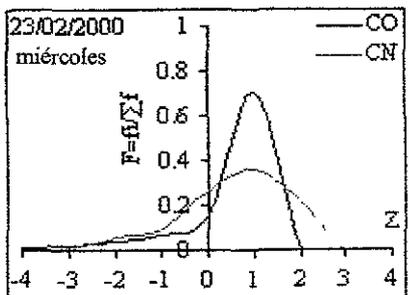
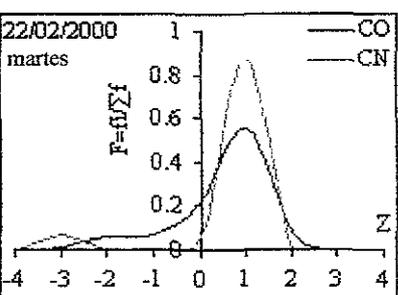


Figura 3-09 Distribución de datos CO y CN, estación CCA 22-26 de febrero

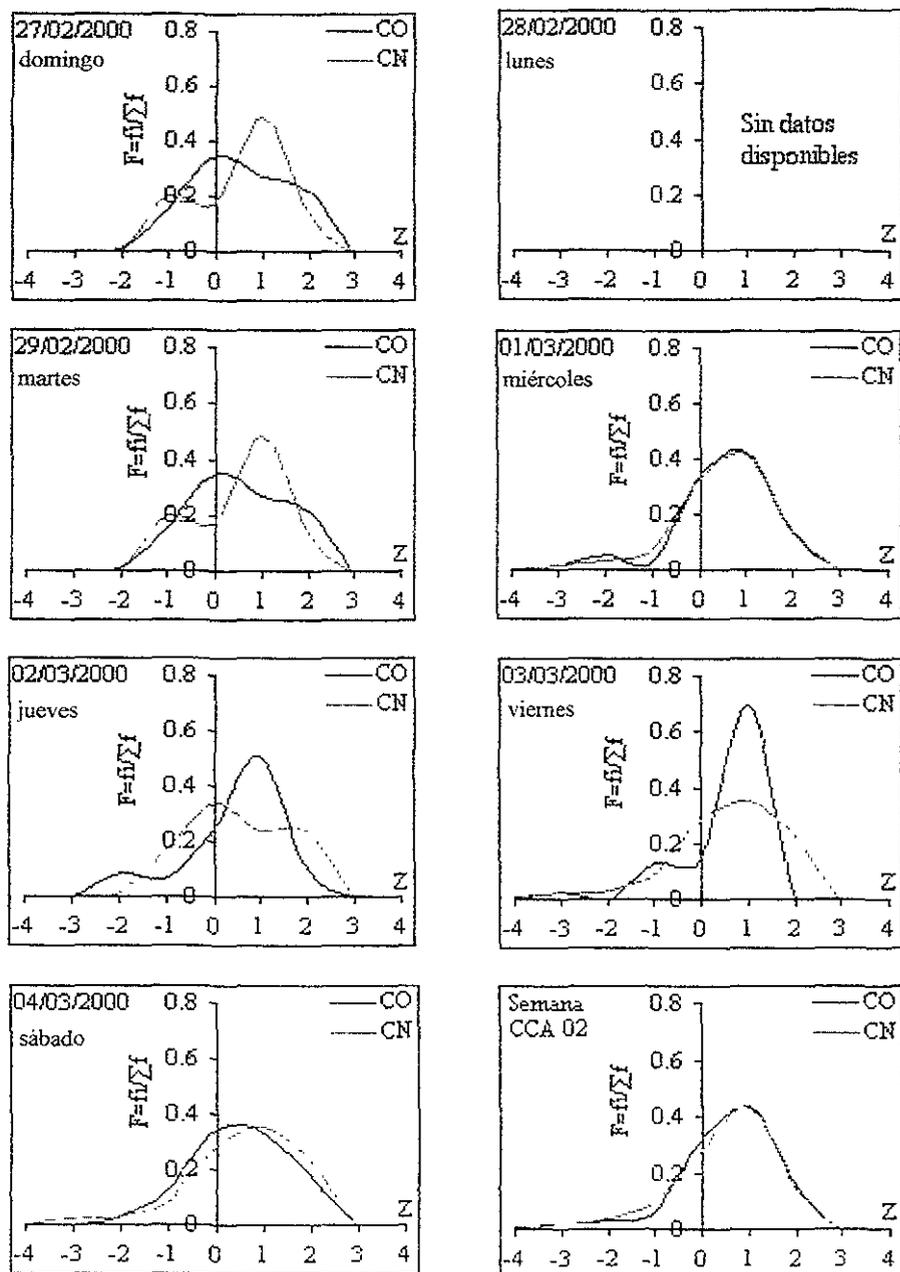


Figura 3-10 Distribución de datos de CO y CN, estación CCA 27 de febrero-4 de marzo

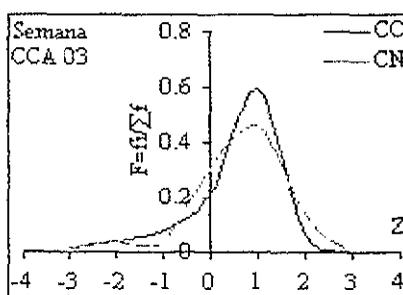
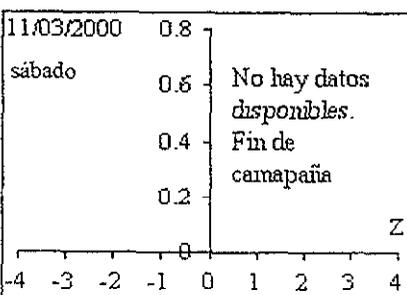
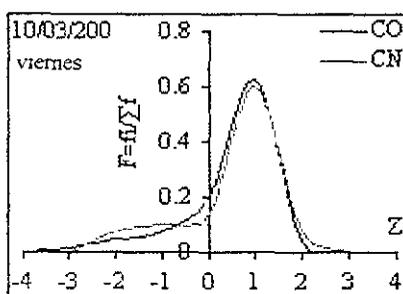
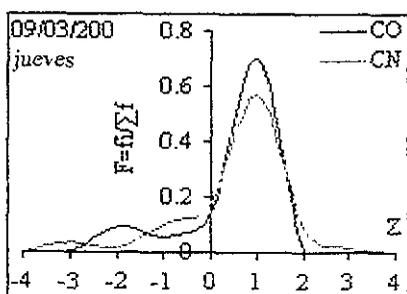
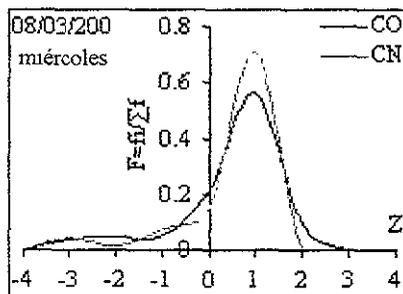
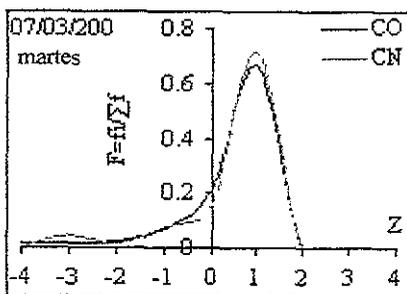
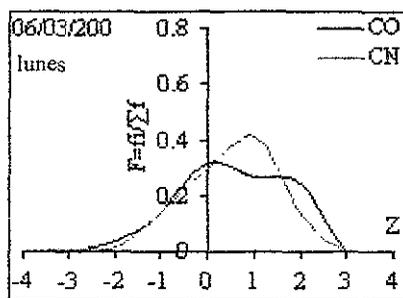
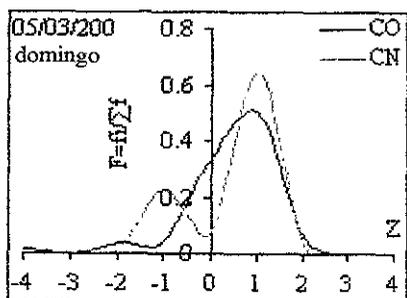


Figura 3-11 Distribución de datos CO v CN, estación CCA 5 -10 de marzo

Salvo los fines de semana y muy pocos días más, las curvas de CO y CN en las distribuciones muestran una forma similar; esto es importante porque se comprueba en cierta medida que ambas especies están relacionadas entre sí.

Se eliminaron los datos que corresponden a sábados y domingos, ya que su distribución de datos no es similar a los demás días y las curvas en las distribuciones; tampoco se parecen entre sí. Por lo tanto, las semanas quedaron conformadas de la siguiente manera: Merced (26, 27 y 28 de enero), IMP (31 de enero, 1, 2 y 3 de febrero), CCA01 (22, 23, 24 y 25 de febrero), CCA02 (29 de febrero y 1, 2 y 3 de marzo) y CCA03 (6, 7, 8, 9 y 10 de marzo).

Posiblemente otros parámetros puedan influir en la relación entre el CO y el CN, por tal motivo los datos se reagruparon en los siguientes subgrupos: datos por sitio de muestreo, por semana, por día, por hora, con humedad relativa inferior a 50 y superior a 50, por velocidad y por dirección del viento.

título 4. Análisis de resultados

En el Capítulo 3 se observó que los datos de CO y de CN generalmente muestran un comportamiento similar. Este comportamiento facilita el análisis estadístico, ya que las muestras de datos semejan distribuciones teóricas. El Capítulo 4 muestra las correlaciones y las regresiones lineales de los datos para cada sitio de muestreo. Los datos se reagruparon por lugar, hora del día (general, 00:00-23:59; mañanas, 06:00-13:59; tardes, 14:00-21:59; y noches, 22:00-05:59), humedad relativa (HR) y dirección del viento (DV). De este modo, se facilita el análisis de estos factores en la relación CO-CN. Los intervalos de tiempo de los subgrupos de mañanas, tardes y noches se establecieron con base en las distribuciones de datos. En repetidas ocasiones, las figuras muestran datos que superan por 2 o 3 ($Z=-3, -2$) desviaciones estándar a la media de la muestra de datos ($Z=0$); éstos datos con frecuencia corresponden a intervalos de tiempo entre las 06:00 y las 13:59. Del mismo modo, los datos de las tardes se acercaban a la media de la muestra, así que se estableció este otro subgrupo de las 14:00 a las 21:59. Finalmente, las actividades que generan CO y CN disminuyen durante las noches, por lo que este subgrupo se estableció entre las 22:00 y las 05:59 del día siguiente.

El siguiente subgrupo, la humedad relativa (HR), se estableció debido a que la presencia de agua puede alterar en alguna forma la determinación de las concentraciones de CN y CO. Por otro lado, la dirección del viento (DV) puede ser un factor importante de influencia en la relación CO-CN ya que altera la ruta que siguen ambas especies desde las diversas fuentes hasta los puntos de medición.

El coeficiente de correlación (R) da una idea de la relación lineal entre ambas variables e indica si éstas evolucionan en la misma dirección. Si el valor del coeficiente de correlación es

cercano a 1, entonces los valores altos de una variable están relacionados con los valores altos de otra. En este caso, se tiene una relación positiva y la pendiente de la línea de regresión será positiva. Si por el contrario, la correlación es cercana a cero, entonces las variables no tienen una relación aparente y se distribuyen al azar. Por otro lado, si la correlación es cercana a -1, los valores altos de una de las variables se relacionan con los valores bajos de la otra, y aunque la relación lineal de ambas variables se mantiene, en este caso la pendiente de la línea de regresión será negativa

El análisis de regresión lineal de dos variables proporciona una expresión matemática para estimar una variable a partir de la otra. Sin embargo, esta expresión sólo proporciona un valor estimado, no un valor real, que dependerá del ajuste de la expresión matemática a los datos reales. En este caso, el coeficiente de determinación (R^2) de dicha regresión especificará el grado del ajuste o varianza de la línea a los datos reales. El coeficiente de determinación también se define como el cuadrado del valor del coeficiente de correlación; por lo tanto, si hay dos poblaciones con correlaciones -0.75 y 0.75 cada una, ambas tendrán el mismo coeficiente de determinación, $R^2=0.562$, pues el ajuste de la regresión lineal a los datos será el mismo.

A lo largo de este capítulo se presentan tablas con los coeficientes lineales de cada subgrupo, junto con la probabilidad del nivel de significancia de cada correlación. En general, los subgrupos contienen diferentes cantidades de datos. Por esta razón se muestra la probabilidad como una medida de que la correlación determinada sea significativa para esa muestra o subgrupo de tamaño N ; además, una probabilidad alta indica que la correlación no viene de una muestra aleatoria. Para calcular esta probabilidad existen tablas de valores de R para diferentes niveles de significancia con $\phi = N-2$ grados de libertad.

Las tablas muestran los resultados de los análisis estadísticos con la fecha y el sitio de muestreo. Para facilitar su ubicación, las figuras de los diagramas de dispersión tienen el mismo

ero que su tabla correspondiente. Estas figuras muestran la línea de regresión, la ecuación de la recta, el coeficiente de determinación R^2 , así como algunas barras de error en la determinación de CO y CN (tabla 2-02) que corresponden a cada sitio de muestreo. Las barras de error que corresponden a la determinación de CO no se incluyeron porque la incertidumbre es menor al

Merced

En la Merced sólo se reagruparon los datos por días, debido a que no hubo una cantidad suficiente como para realizar los análisis estadísticos de los demás subgrupos. Para determinar la regresión lineal del CO y el CN en la Merced, se emplearon los datos del miércoles 26, jueves 27 y viernes 28 de enero. Los datos que corresponden al martes 25 y al domingo 29 de enero se eliminaron del cálculo porque no eran suficientes y presentaban un comportamiento anormal, en comparación con el resto de la semana. La tabla y la figura 4-01 muestran las regresiones lineales del CO y el CN en la estación Merced a lo largo del día. Por lo general, las correlaciones de los datos de CO y CN son mayores que 0.80, pero en este caso la insuficiencia de datos impide conocer con más detalle otros factores que pueden influir en la relación entre ambas variables.

Tabla 4-01 Coeficientes lineales Merced Datos 0000-2359

Fecha	R^2	R	Pendiente	Ordenada	N	P
26/1/2000	0.65	0.81	1.26	1.29	60	0.999
27/1/2000	0.79	0.85	1.74	-0.20	102	0.999
28/1/2000	0.77	0.88	0.96	0.43	45	0.999
Semana	0.65	0.81	1.28	0.73	207	0.999

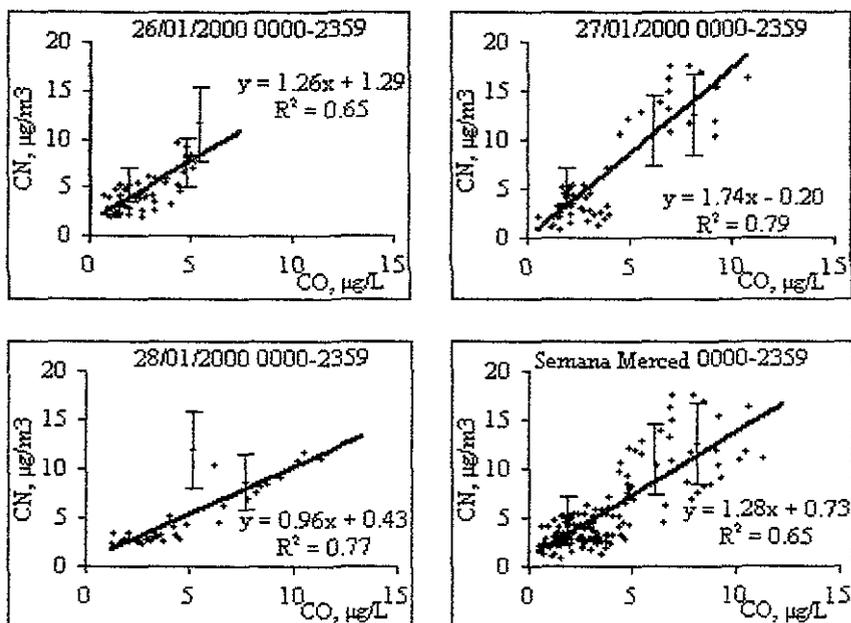


Figura 4-01 Diagrama de dispersión Merced. Datos 0000-2359

Las pendientes de las rectas son cercanas o superiores a 1 y los valores de la ordenada en todos positivos, con excepción del 27 de enero. Sin embargo, este valor de -0.20 cae dentro del error de determinación del CN, y es probable que este valor se deba a este motivo. Por otro lado, la discrepancia de los valores de un día a otro en las pendientes y las ordenadas también puede deberse a los efectos de transporte de materia debido al viento (el CO es un gas, mientras que el CN es el componente de partículas de diversos tamaños) o a la concentración remanente de alguna de las especies en el ambiente. También puede haber otras causas; por ejemplo, quizá las fuentes de CO y CN variaban tanto en su número como en la cantidad de contaminantes que inician a la atmósfera; todo esto explicaría las diferencias de las pendientes (de 0.96 a 1.74) y las ordenadas (de -0.20 a 1.73) en la Merced. De igual modo, los intervalos de tiempo en los que se

Eliminaron ambas especies también pueden influir en la relación CO-CN, puesto que sólo se usó un uso de datos por algunas horas al día.

Instituto Mexicano del Petróleo

Los datos de los días lunes 31 de enero, martes 1, miércoles 2 y jueves 3 de febrero se utilizaron en el cálculo de los coeficientes de correlación y de regresión lineal en la estación del IMP. Los datos que se eliminaron del análisis corresponden a los siguientes días: domingo 30 de enero, viernes 4 y sábado 5 de febrero. Los datos del domingo 30 y del sábado 5 se eliminaron porque no eran suficientes; además, al igual que en la Merced, durante los fines de semana la relación entre el CO y el CN se desvía de su comportamiento general, probablemente porque cambian las actividades que los generan. Los datos del viernes 4 de febrero se eliminaron porque presentaban un comportamiento no acorde con los demás días de la semana.

La tabla y la figura 4-02 muestran respectivamente los resultados del análisis estadístico en los diagramas de dispersión general en el IMP. Todos los valores de los coeficientes de correlación y de determinación son significativos. Las pendientes tienden a ser menos pronunciadas y las ordenadas más grandes que en la Merced. La relación lineal entre el CO y el CN se mantiene, tanto en la Merced como en el IMP. Los valores que adquiere la ordenada al interceptar el eje de las ordenadas pueden deberse al error en la determinación del CN, a efectos del transporte de las especies o a la presencia de un remanente de CN o CO en el ambiente. El hecho de que las pendientes y las ordenadas sean parecidas de un día a otro, muestra que el número de fuentes y la cantidad de emisiones de CO y CN, al parecer, se mantuvieron constantes a lo largo de la semana. La tabla y la figura 4-03 muestran los resultados obtenidos para el subgrupo de las mediciones, de 06:00 a 13:59 horas. Los coeficientes de determinación del 31 de enero y del 1 de

brero son menores a 0.50, por lo que no se consideran como significativos. Los coeficientes de los dos días restantes, del 2 y 3 de febrero muestran un aumento con respecto al subgrupo general. La pendiente del 2 de febrero aumenta, pero la del 3 disminuye; del mismo modo, la ordenada del 2 de febrero disminuye, pero la del 3 aumenta, así que es difícil llegar a una conclusión concreta sobre este subgrupo. En las tardes, sólo la regresión del 2 de febrero es significativa, la correlación de datos disminuye, pero la pendiente y la ordenada aumentan. En las noches las condiciones cambian, pues todas las regresiones son significativas, salvo la del 2 de febrero; de hecho, las regresiones son tan significativas como las generales. No obstante, las pendientes no muestran una evolución definida, pues una de ellas aumenta y la otra disminuye en comparación con el subgrupo general.

Con una $HR < 50\%$, sólo las correlaciones correspondientes a los días 1 y 2 de febrero son significativas, y en ambos casos las pendientes disminuyeron y las ordenadas aumentaron. Por otro lado, con una $HR > 50\%$, las correlaciones de datos mejoran sustancialmente; una humedad relativa alta mejora la relación CO-CN; las pendientes diarias tienden a aumentar, sin embargo, los periodos de tiempo con una $HR > 50\%$ se presentan temprano por la mañana, precisamente cuando la correlación de datos es buena. Es probable que en ocasiones este hecho influya más que la sola influencia de la HR. Puede observarse que las pendientes con una $HR > 50\%$ son muy cercanas a las del subgrupo de las mañanas, por lo que no puede concluirse que la humedad relativa tenga una influencia directa en la relación entre ambas especies, ya que probablemente se trata de los mismos datos clasificados en distintos subgrupos.

En la tabla 4-09 se puede observar que sólo dos correlaciones son significativas cuando el viento proviene de la dirección $30^\circ - 90^\circ$ ($90^\circ > DV > 30^\circ$). Por el contrario, cuando la dirección del viento es entre $0^\circ - 30^\circ$ ($0^\circ < DV < 30^\circ$), las correlaciones mejoran sensiblemente, quizá porque en esta dirección está la Av. Politécnico Nacional, que es una fuente importante de CO y CN.

Tabla 4-02. Coeficientes lineales del IMP. Datos 0000-2359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.64	0.80	1.04	1.68	71	0.999
1/2/2000	0.64	0.80	1.13	0.60	87	0.999
2/2/2000	0.80	0.89	0.76	1.21	125	0.999
3/2/2000	0.72	0.85	0.83	1.39	130	0.999
Semana	0.65	0.81	0.89	1.23	413	0.999

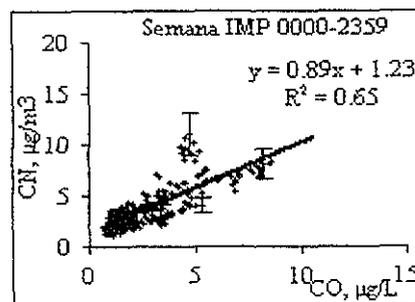
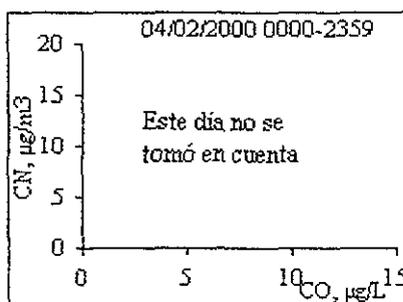
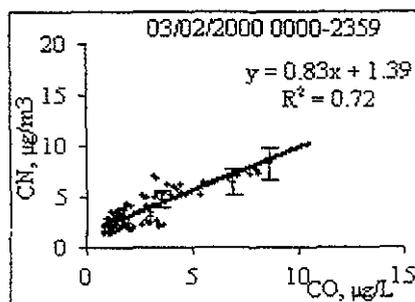
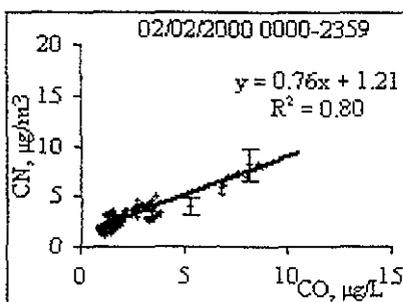
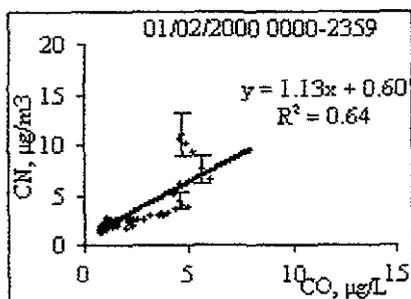
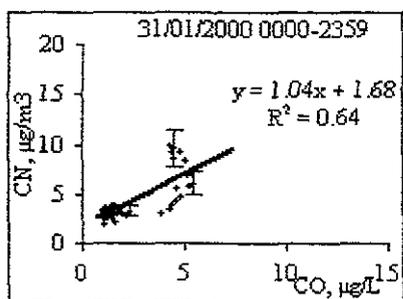


Figura 4-02 Diagrama de dispersion del IMP Datos 0000-2359

Tabla 4-03. Coeficientes lineales del IMP Datos 0600-1359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.33	0.57	1.28	0.56	19	0.98
1/2/2000	0.50	0.71	1.63	-1.51	27	0.999
2/2/2000	0.92	0.96	0.82	0.64	35	0.999
3/2/2000	0.76	0.87	0.54	3.33	38	0.999
Semana	0.49	0.70	0.87	1.44	119	0.999

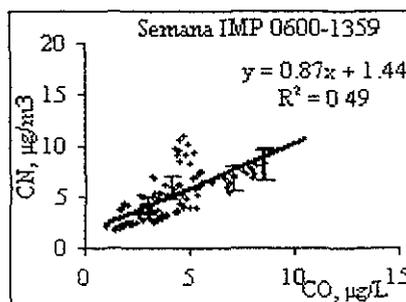
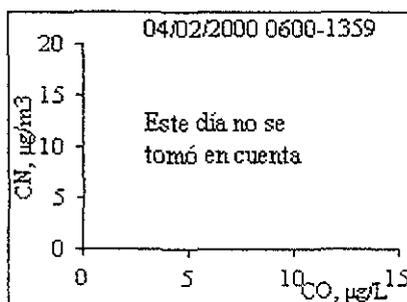
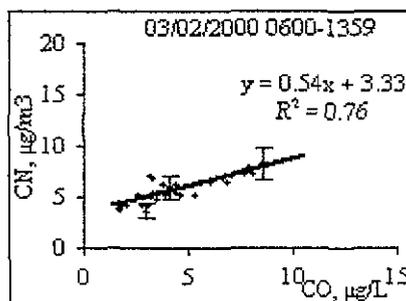
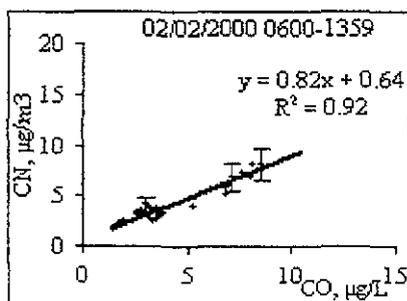
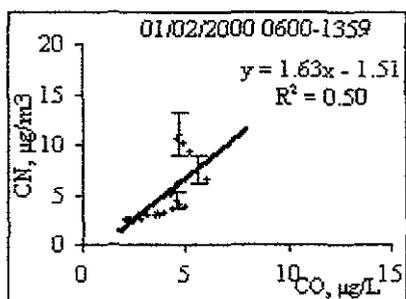
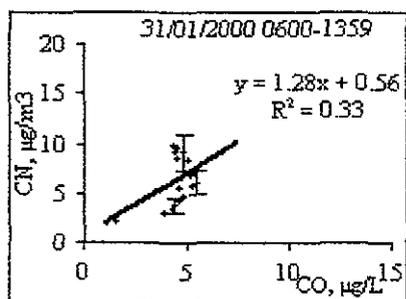


Figura 4-03 Diagrama de dispersion del IMP Datos 0600-1359

Tabla 4-04. Coeficientes lineales del IMP. Datos 1400-2159

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.10	0.32	0.38	2.60	47	0.95
1/2/2000	0.07	0.26	0.26	1.77	48	0.9
2/2/2000	0.77	0.88	0.97	1.35	41	0.999
3/2/2000	0.02	0.14	0.07	2.14	44	< 0.9
Semana	0.20	0.45	0.50	1.87	180	0.999

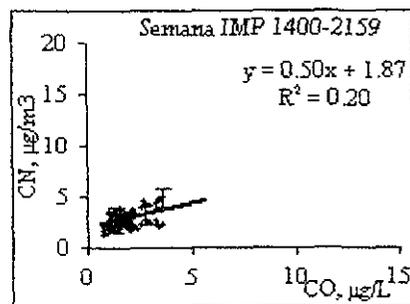
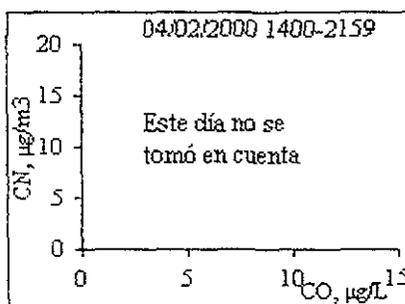
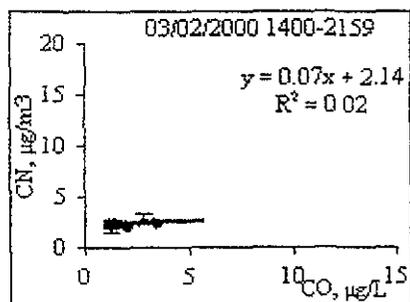
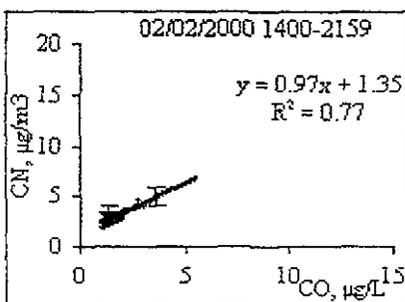
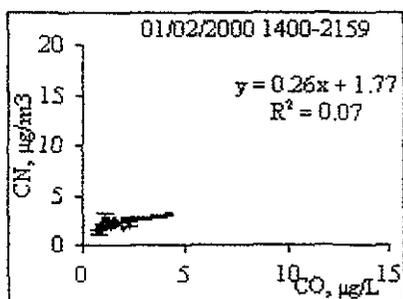
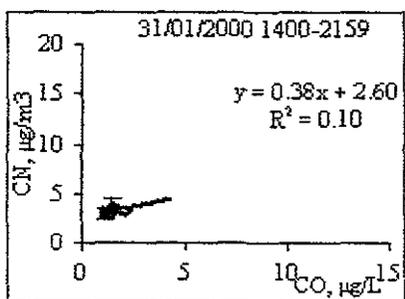


Figura 4-04 Diagrama de dispersión del IMP. Datos 1400-2159

Tabla 4-05. Coeficientes lineales del IMP. Datos 2200-0559

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.91	-0.95	-3.00	6.93	5	0.99
1/2/2000	0.64	0.80	1.36	0.15	48	0.999
2/2/2000	0.20	0.45	0.67	1.76	49	0.99
3/2/2000	0.72	0.85	0.72	0.86	12	0.999
Semana	0.31	0.56	1.10	0.83	114	0.999

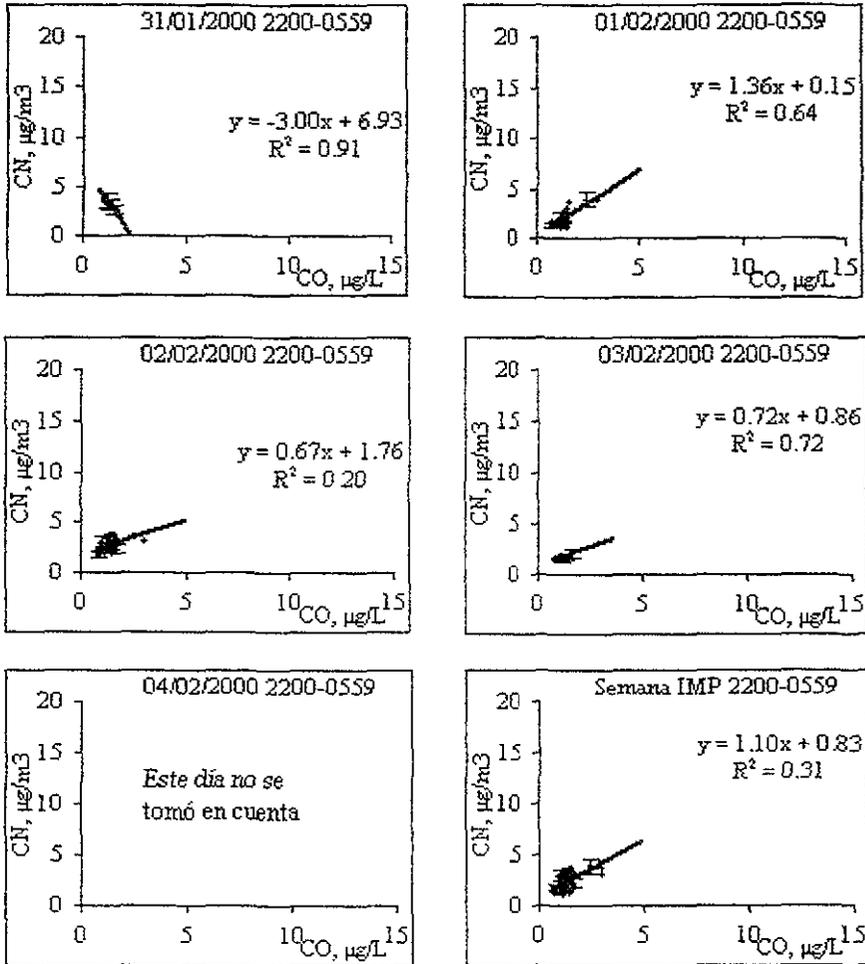


Figura 4-05 Diagrama de dispersion del IMP Datos 2200-0559

Tabla 4-06. Coeficientes lineales del IMP Datos HR<50%

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.10	0.32	0.18	2.83	52	0.95
1/2/2000	0.39	0.62	0.45	1.45	58	0.999
2/2/2000	0.39	0.62	0.61	1.68	66	0.999
3/2/2000	0.07	0.26	0.29	2.09	46	0.9
Semana	0.23	0.48	0.47	1.87	222	0.999

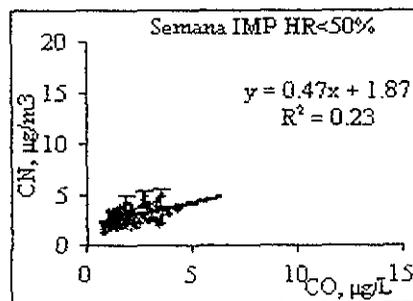
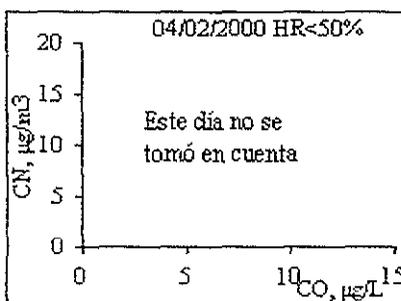
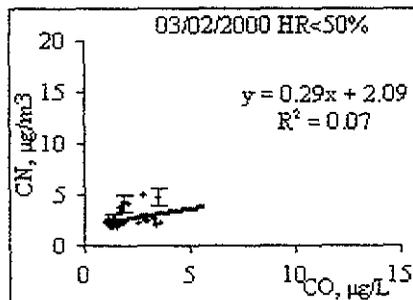
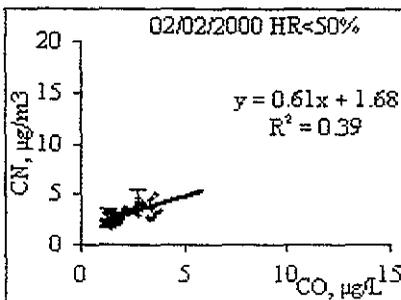
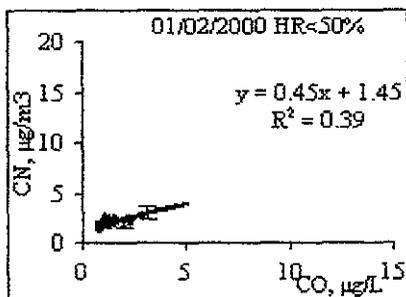
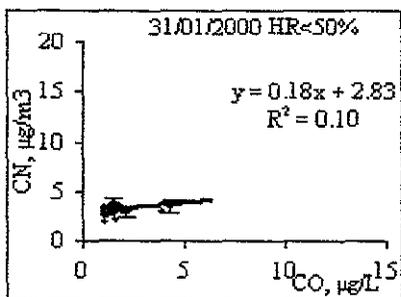


Figura 4-06 Diagrama de dispersión del IMP Datos HR<50%

Tabla 4-07. Coeficientes lineales del IMP Datos HR>50%

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.48	0.69	1.10	2.33	19	0.99
1/2/2000	0.55	0.74	1.20	0.49	29	0.999
2/2/2000	0.91	0.95	0.80	0.94	59	0.999
3/2/2000	0.80	0.89	0.84	1.53	84	0.999
Semana	0.69	0.83	0.69	1.21	191	0.999

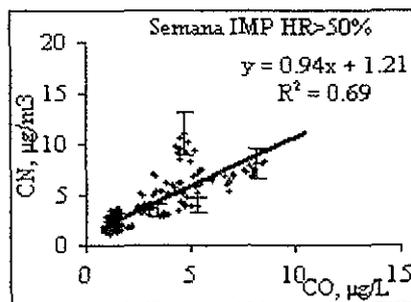
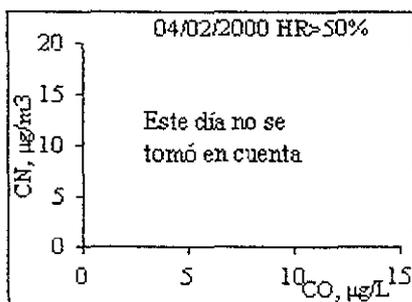
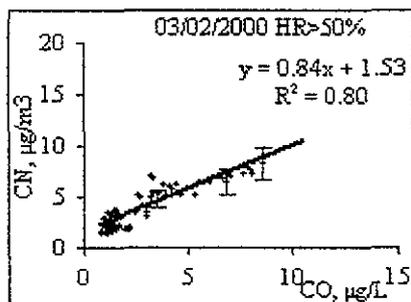
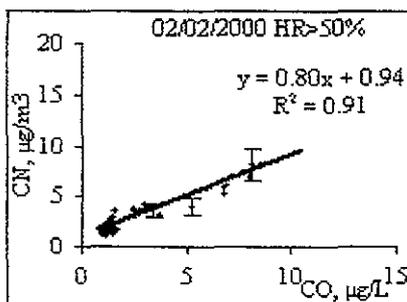
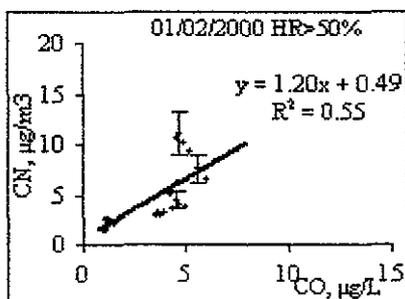
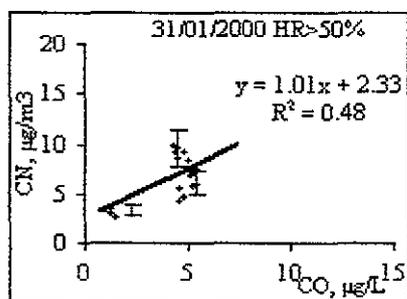


Figura 4-07 Diagrama de dispersión del IMP Datos HR>50%

Tabla 4-08 Coeficientes lineales del IMP. Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Fecha	R2	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000	0.62	0.79	0.55	2.37	61	0.999
1/2/2000	0.59	0.77	1.14	0.55	62	0.999
2/2/2000	0.37	0.61	0.59	1.82	60	0.999
3/2/2000	0.75	0.87	0.56	3.24	33	0.999
Semana	0.62	0.79	0.82	1.58	216	0.999

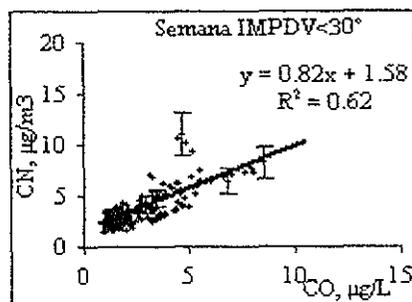
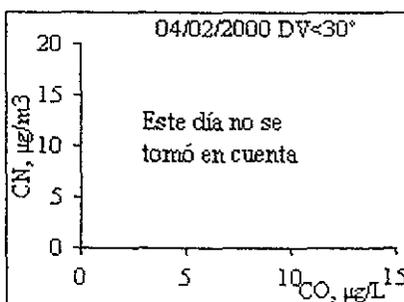
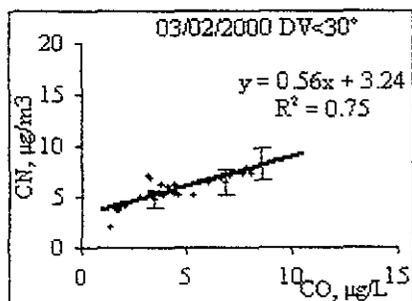
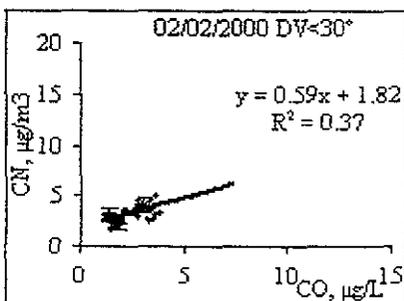
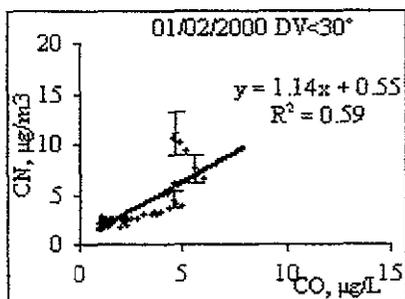
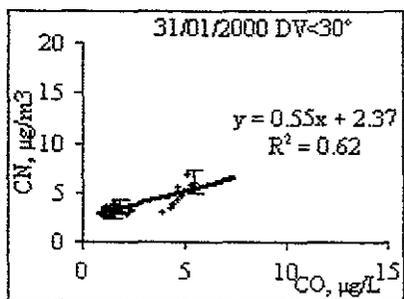


Figura 4-08 Diagrama de dispersión del IMP Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Tabla 4-09 Coeficientes lineales del IMP. Datos 90°>DV>30°

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
31/1/2000						
1/2/2000	0.26	0.51	0.33	1.40	14	0.9
2/2/2000	0.35	0.59	1.14	0.46	31	0.99
3/2/2000	0.06	0.24	0.34	1.84	68	0.9
Semana	0.16	0.40	0.60	1.33	113	0.999

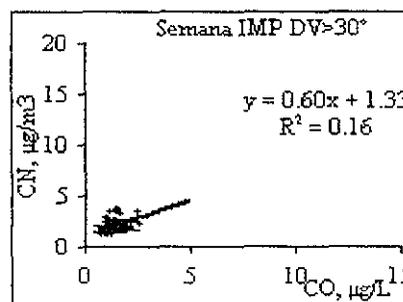
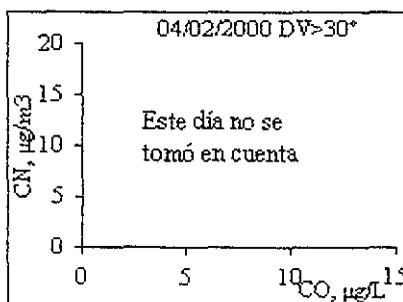
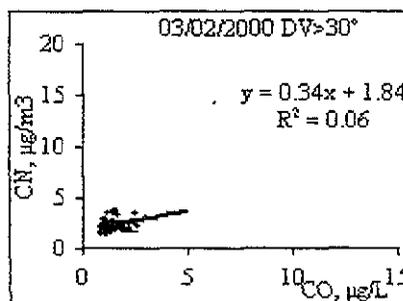
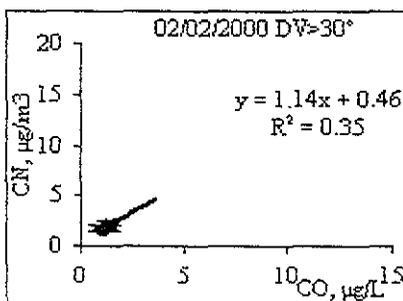
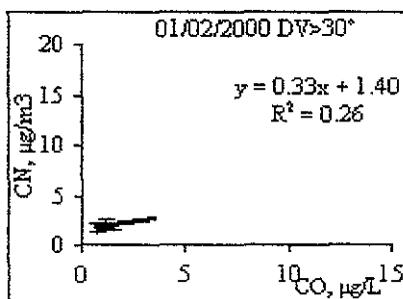
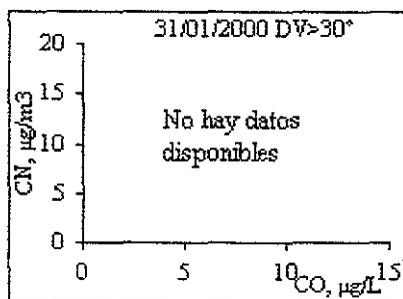


Figura 4-09 Diagrama de dispersión del IMP. Datos 90°>DV>30°

Centro de Ciencias de la Atmósfera

Al igual que con los datos de la Merced y el IMP, en el CCA se eliminaron de los análisis de regresión los que corresponden a sábados y domingos. Por lo tanto, la semana 01 abarca los días comprendidos entre el martes 22 y el viernes 25 de febrero, la semana 02 abarca los días comprendidos entre el lunes 29 de febrero y el jueves 3 de marzo, y la semana 03 comprende los datos entre el viernes 6 y el viernes 10 de marzo. Cabe mencionar que durante las semanas 01 y 02 Ciudad Universitaria permaneció cerrada y, por lo tanto, la cantidad de fuentes de emisión disminuyó en gran medida. Otro aspecto importante es la humedad del ambiente; en el CCA los datos de humedad relativa se obtuvieron directamente del nefelómetro, el cual estaba conectado a un secador por el cual se pasaba previamente el aire. Por tal motivo se eliminó el análisis estadístico de la humedad relativa en este sitio de muestreo. Los demás parámetros se midieron normalmente.

Las correlaciones generales (00:00-23:59) de la semana 01, tabla y figura 4-10, muestran que sólo son significativas las que corresponden a los días 22, 23 y 25 de febrero. Se puede observar que las pendientes de esta semana son más pequeñas que las determinadas en la Merced y el IMP. De hecho, algunas ordenadas al origen son negativas o cercanas a cero.

El subgrupo de las mañanas (06:00-13:59) de la semana 01, tabla y figura 4-11, muestra una mejoría en las correlaciones de los días 23, 24 y 25 de febrero. De hecho, resalta la correlación del 24, que cambia radicalmente en comparación con el subgrupo general, de 0.28 a 0.95. Algunos días tienen cambios radicales las pendientes de las mañanas en comparación con las correlaciones generales.

En el subgrupo de las tardes (14:00-21:59) de la semana 01, sólo la correlación de datos correspondiente al 24 de febrero es significativa; este suceso es paradójico, puesto que la correlación general de datos de este día es de 0.28 y la de la mañana es 0.95. La pendiente de la correlación cambia de un valor de 2.61 en la mañana, a un valor de 0.65 en la tarde.

El subgrupo de las noches (22:00-05:59) de la semana 01 muestra dos correlaciones significativas, la del 22 y la del 25 de febrero. En la tabla 4-13 se puede ver que el 22 de febrero tiene una correlación de 0.96, lamentablemente en la tarde y en la mañana las correlaciones fueron pobres. El 25 de febrero tiene una pendiente de 2.26, que es mayor que la determinada por la mañana de 1.15.

La dirección del viento parece influir en la relación CO-CN, como se ve en las tablas y las figuras 4-14 y 4-15. La tabla 4-14, que corresponde al subgrupo $0^\circ < DV < 30^\circ$, muestra que sólo las correlaciones de los días 22 y 24 de febrero son significativas. En cambio, cuando la dirección del viento es entre $30^\circ > DV > 90^\circ$, las correlaciones entre ambas especies mejoran. En este caso, los días 22, 23 y 25 tienen correlaciones significativas. En el caso del 22 de febrero la pendiente aumenta cuando el viento proviene de esta dirección, probablemente la razón es que el paradero de autobuses y la estación del metro Universidad se encuentran en esa dirección. Sin embargo, en la serie de tiempo del Capítulo 3, figura 3-03, se puede ver que la dirección del viento tiene un patrón cíclico, que parece estar vinculado a la hora del día, y por lo tanto, probablemente suceda lo mismo que con la HR en el IMP, donde la influencia de la hora quizás es más significativa que la humedad relativa en sí.

Tabla 4-10 Coeficientes lineales CCA 01. Datos 0000-2359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.25	0.50	0.29	-0.35	75	0.999
23/2/2000	0.34	0.58	0.28	0.07	110	0.99
24/2/2000	0.08	0.28	0.40	2.17	78	<0.99
25/2/2000	0.65	0.81	1.16	-1.29	134	0.999
Semana	0.25	0.50	0.67	-0.27	397	0.999

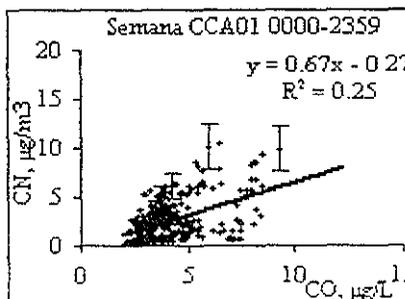
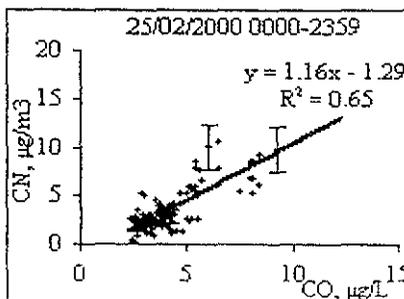
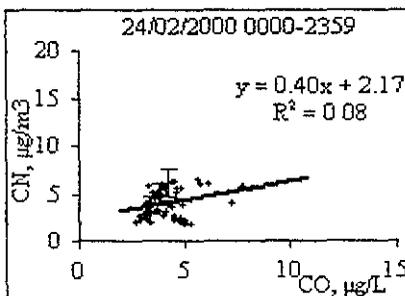
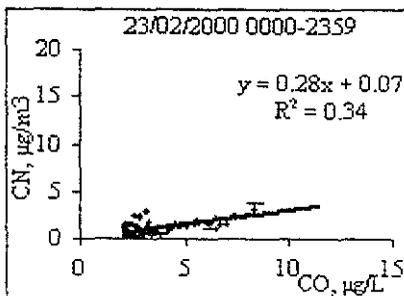
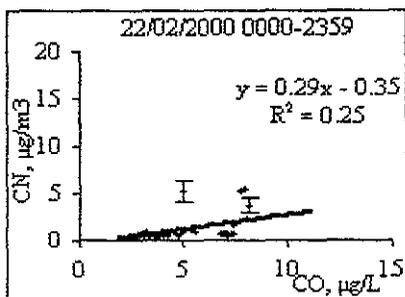
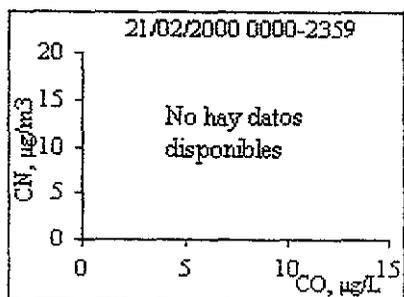


Figura 4-10 Diagrama de dispersion del CCA 01. Datos 0000-2359

Tabla 4-11. Coeficientes lineales CCA 01 Datos 0600-1359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.00	0.00	0.05	1.50	16	<0.9
23/2/2000	0.80	0.89	0.34	-0.29	47	0.999
24/2/2000	0.91	0.95	2.61	-4.93	20	0.999
25/2/2000	0.70	0.84	1.15	-0.80	45	0.999
Semana	0.17	0.41	0.57	0.39	128	0.999

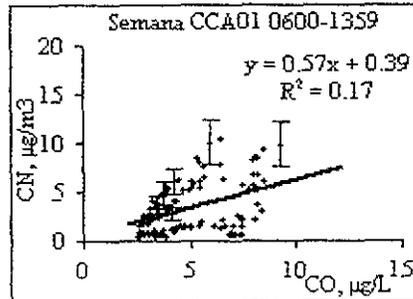
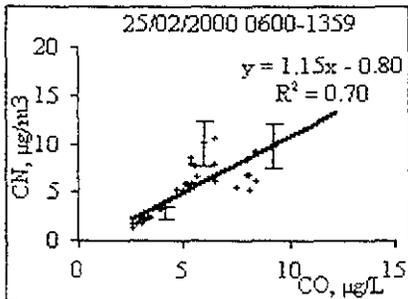
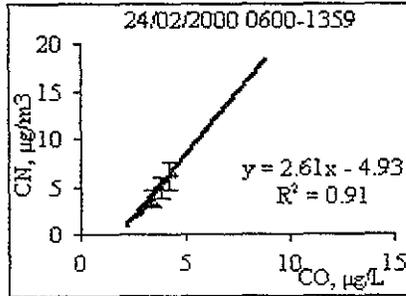
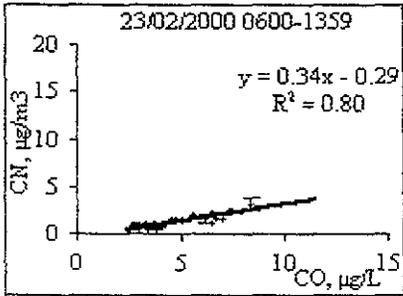
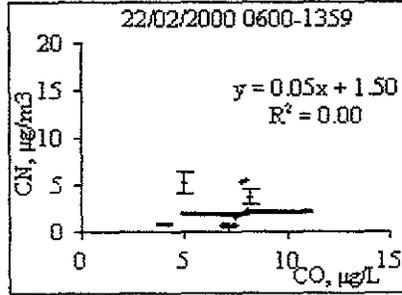
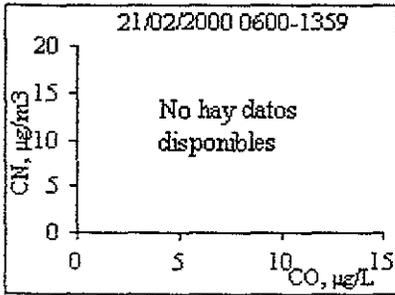


Figura 4-11 Diagrama de dispersion del CCA 01 Datos 0600-1359

Tabla 4-12 Coeficientes lineales CCA 01. Datos 1400-2159

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.20	0.45	0.08	0.29	47	0.99
23/2/2000	0.07	0.26	0.46	0.26	27	< 0.9
24/2/2000	0.28	0.53	0.65	1.34	46	0.999
25/2/2000	0.01	0.10	0.13	1.89	41	< 0.9
Semana	0.25	0.50	0.85	-0.83	161	0.999

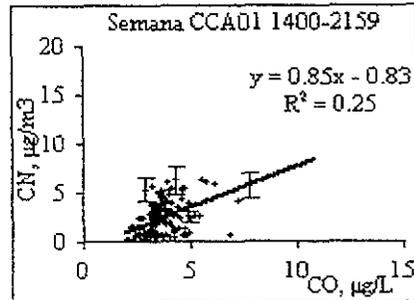
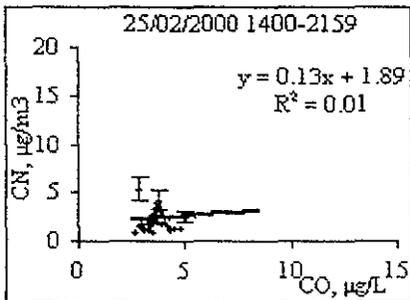
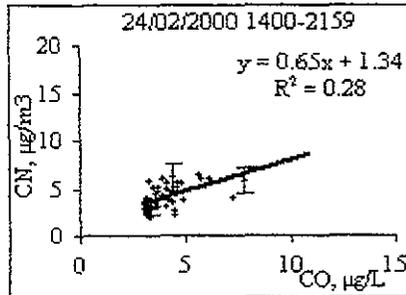
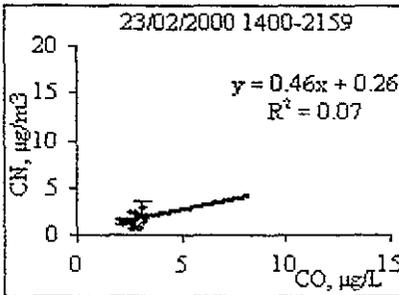
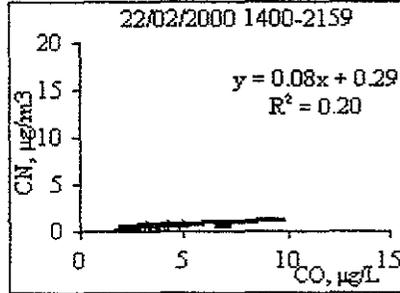
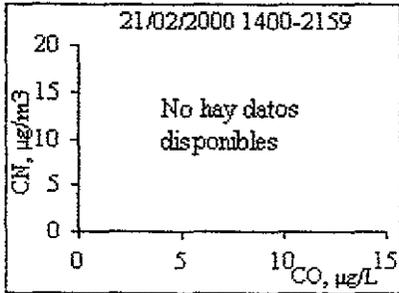


Figura 4-12 Diagrama de dispersion del CCA 01 Datos 1400-2159

Tabla 4-13 Coeficientes lineales CCA 01. Datos 2200-0559

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.93	0.96	0.24	-0.19	48	0.999
23/2/2000						
24/2/2000	0.01	-0.10	-0.05	2.68	48	< 0.9
25/2/2000	0.43	0.66	2.26	-4.55	12	0.95
Semana	0.11	0.33	0.44	0.17	108	0.999

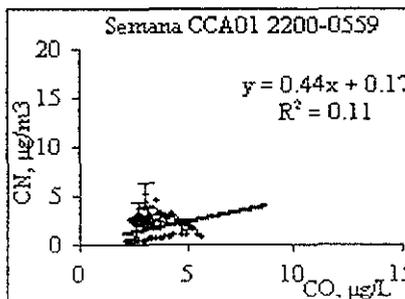
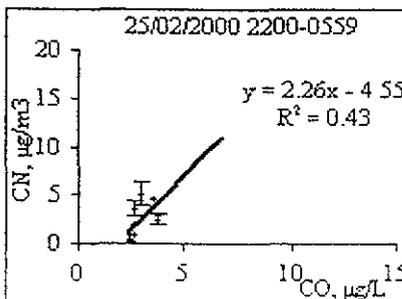
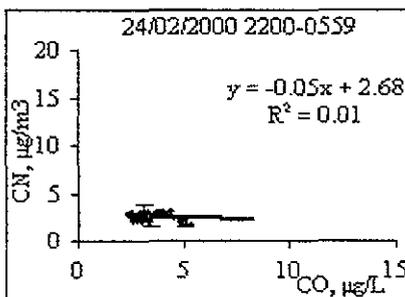
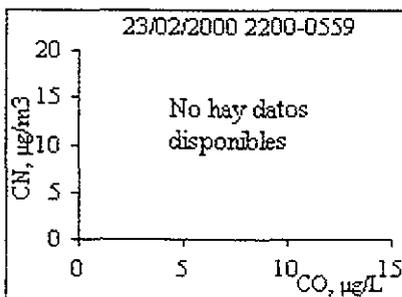
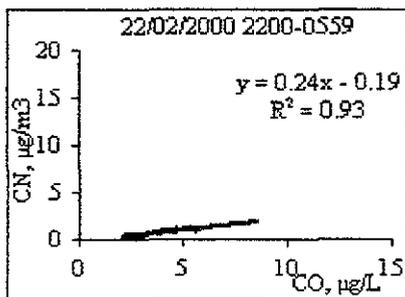
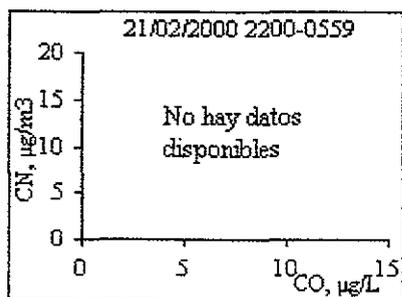


Figura 4-13 Diagrama de dispersión del CCA 01 Datos 2200-0559

Tabla 4-14. Coeficientes lineales CCA 01 Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$

Fecha	R2	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.34	0.58	0.05	0.37	22	0.99
23/2/2000	0.09	0.30	0.56	0.03	23	< 0.9
24/2/2000	0.79	0.89	2.21	-3.85	10	0.999
25/2/2000	0.04	-0.20	-0.27	3.95	21	< 0.9
Semana	0.00	0.00	0.05	1.66	76	

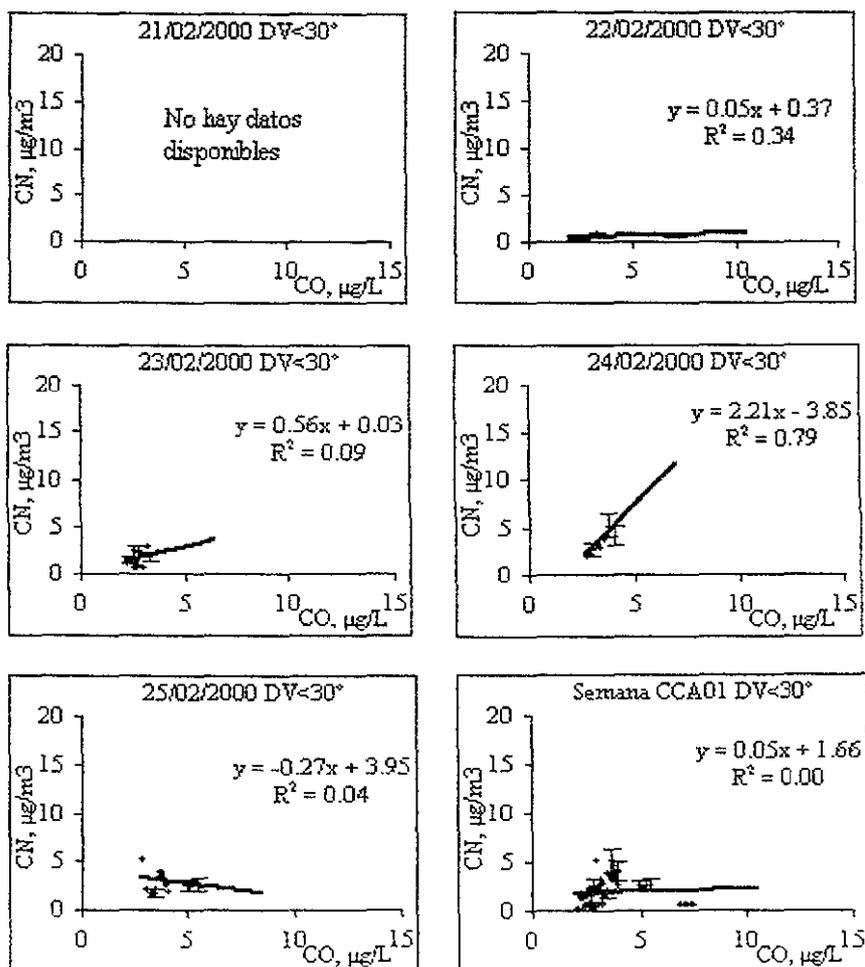


Figura 4-14 Diagrama de dispersion del CCA 01 Datos $0^\circ < DV < 30^\circ$

Tabla 4-15 Coeficientes lineales CCA 01. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
21/2/2000						
22/2/2000	0.66	0.81	0.54	-1.37	30	0.999
23/2/2000	0.55	0.74	0.43	-0.52	23	0.999
24/2/2000	0.00	0.00	0.02	3.55	15	
25/2/2000	0.71	0.84	1.14	-1.58	29	0.999
Semana	0.34	0.58	0.74	-0.9	97	0.999

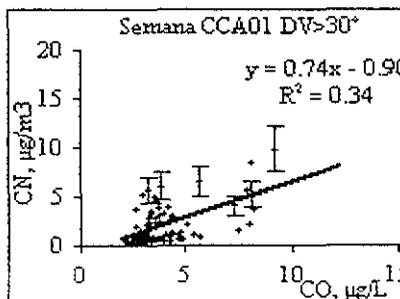
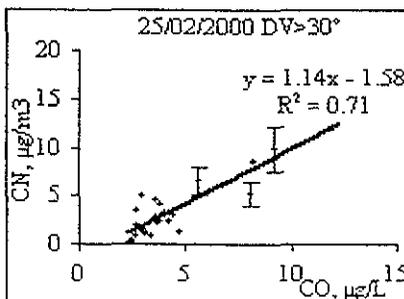
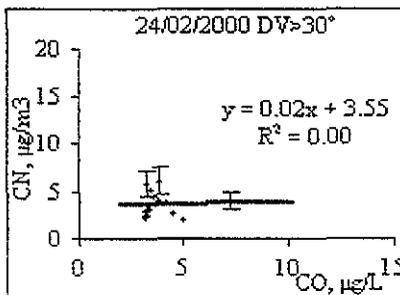
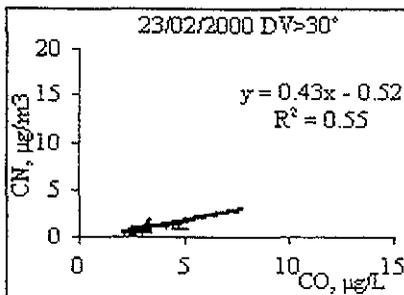
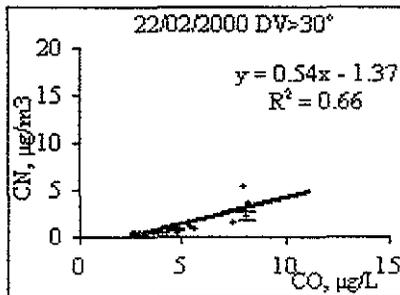
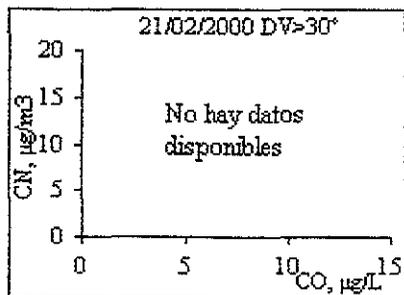


Figura 4-15 Diagrama de dispersion del CCA 01. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$

La semana 02 comprende los días entre el martes 29 de febrero y el viernes 3 de marzo. Las correlaciones generales de los datos que se muestran en la tabla y la figura 4-16, muestran relaciones significativas. Al igual que en la semana 01, las pendientes de la semana 02 son menores que las del IMP y de la Merced. Estas pendientes también son parecidas entre sí, lo que probablemente indica que el número de fuentes y la cantidad de emisiones de CO y CN cercanos al CCA se mantuvieron constantes. Un aspecto importante es que todos los días de la semana 02 las ordenadas al origen tienen valores negativos; estos valores son cercanos a cero, por lo que probablemente están más relacionados con el error intrínseco en la determinación del CN que con algún significado físico. Las correlaciones de datos de las mañanas, como lo indican la tabla y la figura 4-17, muestran valores significativos. Las pendientes mantienen valores parecidos al grupo general y predominan las ordenadas negativas, salvo la mañana del 2 de marzo. Es probable que en este subgrupo también los valores de las ordenadas se deban a los errores derivados de la determinación del CN, puesto que son cercanos a cero. Las correlaciones del subgrupo de las 14:00-21.59 presentan valores significativos. La tabla y la figura 4-18 muestran que los cambios en el valor de las pendientes son mínimos, al igual que en las ordenadas al origen. Incluso durante las noches, como lo muestran la tabla y la figura 4-19, las correlaciones de los datos son significativas. Las pendientes sufren pequeños cambios, lo que indica que la relación entre el CO y el CN fue consistente durante toda la semana. La dirección del viento, como lo muestran las tablas y las figuras 4-20 y 4-21, tiene una influencia en la relación CO-CN. Las correlaciones de los días 1 y 2 de marzo mejoran cuando el viento proviene del este; aunque los cambios en las pendientes no son relevantes. Sin embargo, no hay que olvidar que la dirección del viento en el CCA está ligada en alguna forma con la hora del día, y como se ve en la figura 3-04 de Capítulo 3, los episodios con $DV > 30^\circ$ ocurren en las primeras horas de la mañana.

Tabla 4-16 Coeficientes lineales CCA 02. Datos 0000-2359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.66	0.81	0.30	-0.24	94	0.999
1/3/00	0.89	0.94	0.49	-0.97	139	0.999
2/3/00	0.83	0.91	0.31	-0.41	86	0.999
3/3/00	0.71	0.84	0.25	-0.42	92	0.999
Semana	0.68	0.82	0.33	-0.44	411	0.999

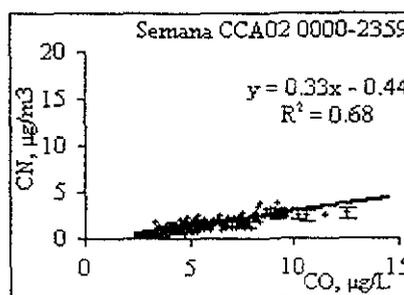
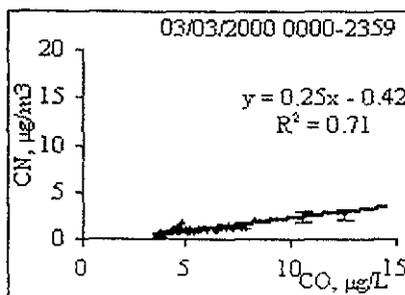
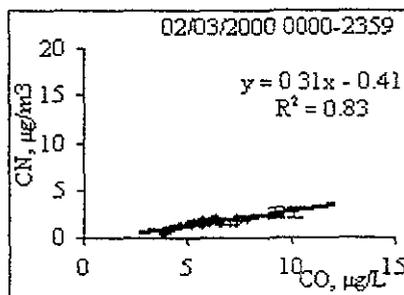
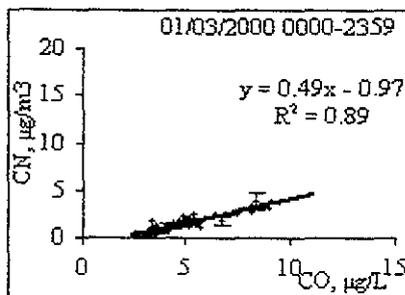
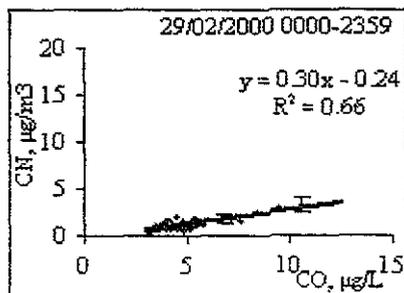
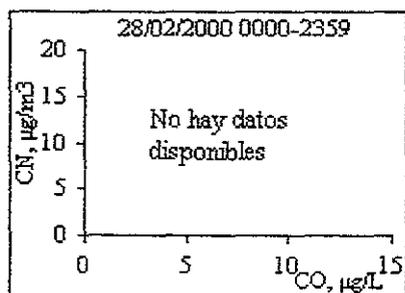


Figura 4-16 Diagrama de dispersión del CCA 01 Datos 0000-2359

Tabla 4-17. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 0600-1359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.67	0.82	0.30	-0.22	35	0.999
1/3/00	0.88	0.94	0.47	-0.81	46	0.999
2/3/00	0.88	0.94	0.25	0.09	27	0.999
3/3/00	0.93	0.96	0.27	-0.62	34	0.999
Semana	0.60	0.77	0.29	-0.21	142	0.999

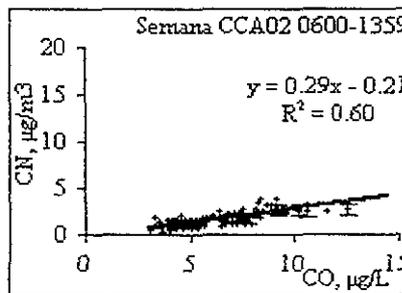
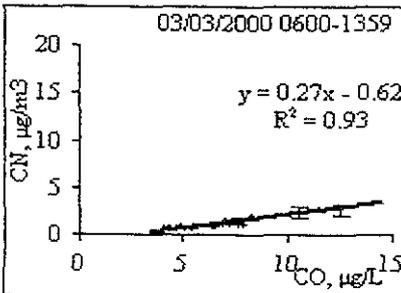
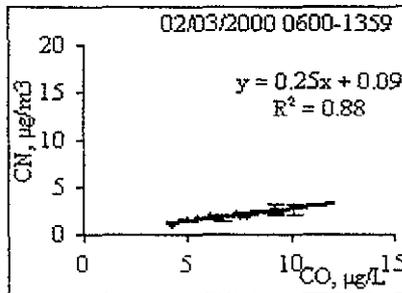
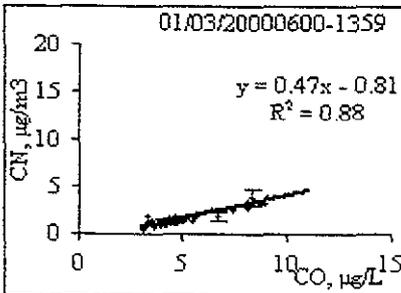
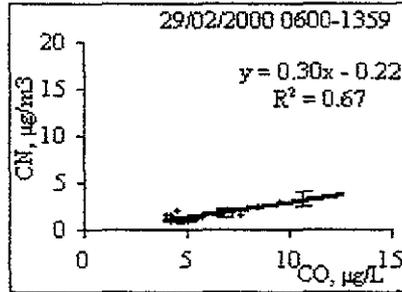
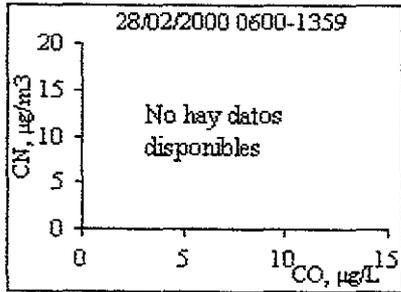


Figura 4-17 Diagrama de dispersion CCA 02 Datos 0600-1359

Tabla 4-18. Coeficientes lineales CCA 02 Datos 1400-2159

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.31	0.56	0.26	-0.11	47	0.999
1/3/00	0.71	0.84	0.49	-1.11	46	0.999
2/3/00	0.76	0.87	0.42	0.76	47	0.999
3/3/00	0.68	0.82	0.36	-0.93	46	0.999
Semana	0.55	0.74	0.38	-0.76	186	0.999

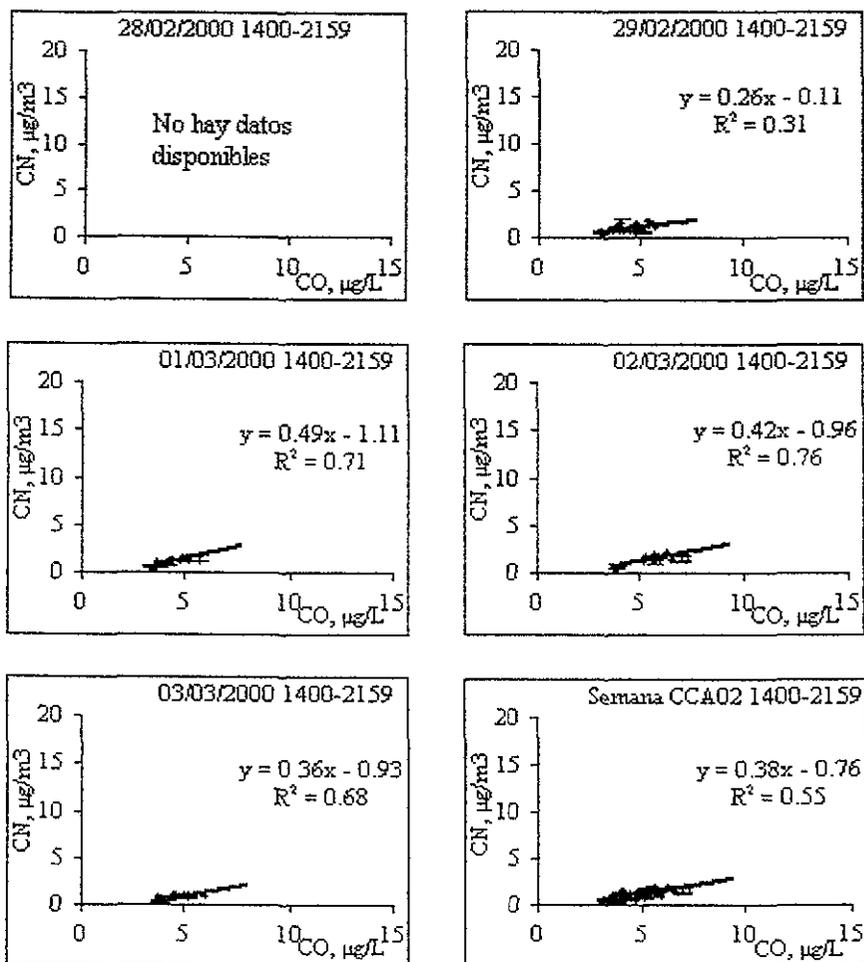


Figura 4-18 Diagrama de dispersion CCA 02 Datos 1400-2159

Tabla 4-19 Coeficientes lineales CCA02. Datos 2200-0559

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.66	0.81	0.30	-0.24	12	0.99
1/3/00	0.89	0.94	0.49	-0.97	47	0.999
2/3/00	0.83	0.91	0.31	-0.41	12	0.999
3/3/00	0.71	0.84	0.25	-0.42	13	0.999
Semana	0.68	0.82	0.33	-0.44	84	0.999

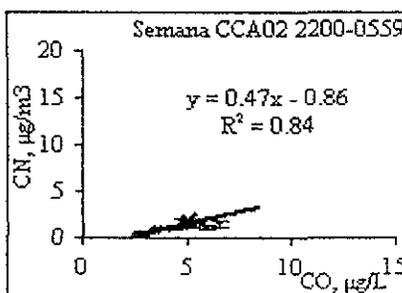
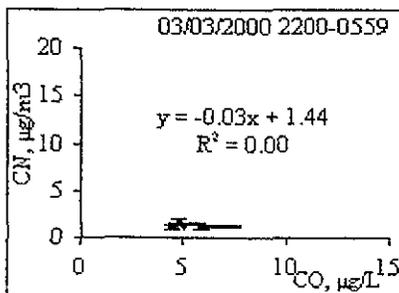
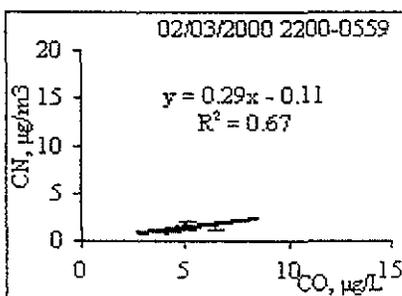
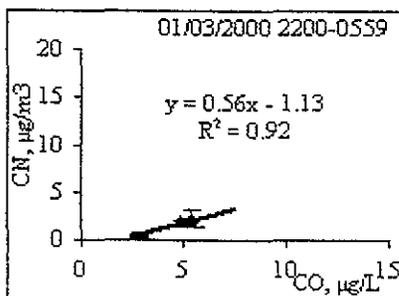
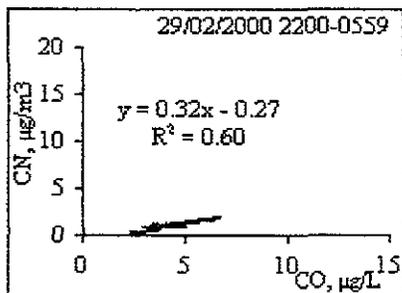
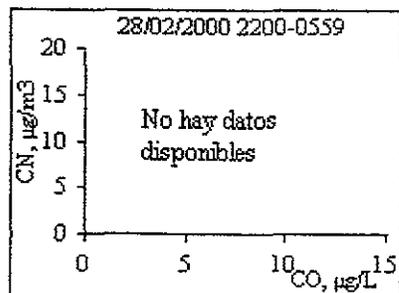


Figura 4-19 Diagrama de dispersion CCA 02 Datos 2200-0559

Tabla 4-20 Coeficientes lineales CCA 02 Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.05	0.22	0.11	0.46	30	< 0.9
1/3/00	0.74	0.86	0.46	-0.97	44	0.999
2/3/00	0.67	0.82	0.37	-0.71	32	0.999
3/3/00	0.52	0.72	0.24	-0.41	57	0.999
Semana	0.39	0.62	0.29	-0.38	163	0.999

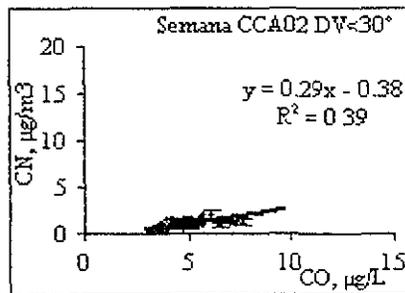
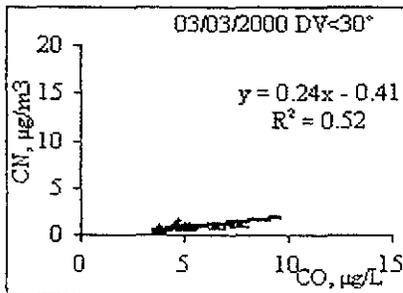
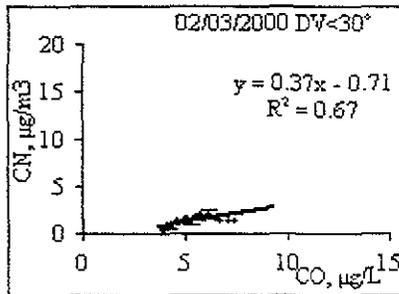
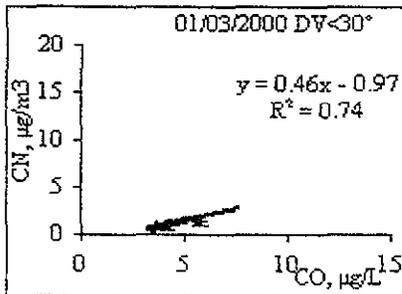
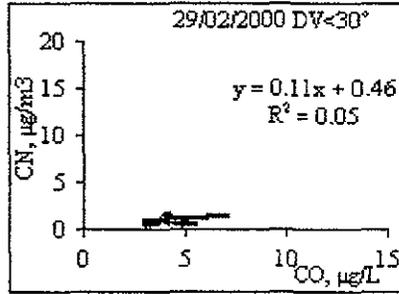
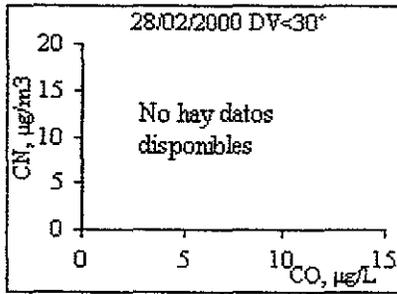


Figura 4-20. Diagrama de dispersión CCA 02 Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Tabla 4-21. Coeficientes lineales CCA 02. Datos 90°>DV>30°

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
28/2/00						
29/2/00	0.37	0.61	0.21	0.13	20	0.999
1/3/00	0.97	0.98	0.47	-0.83	13	0.999
2/3/00	0.99	0.99	0.28	-0.19	6	0.999
3/3/00						
Semana	0.87	0.93	0.29	-0.24	40	0.999

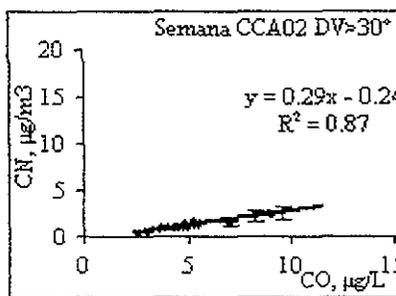
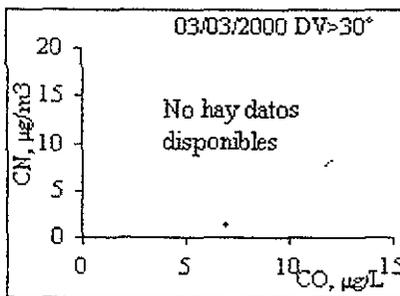
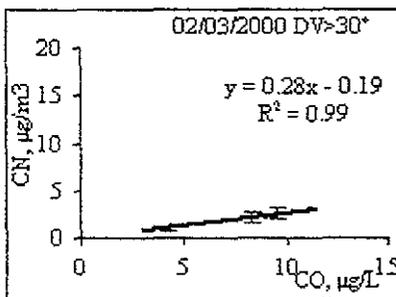
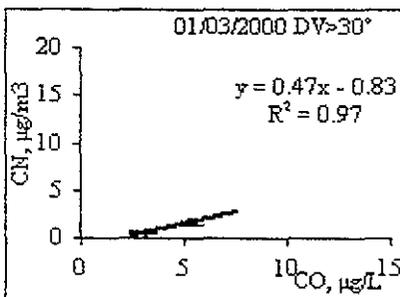
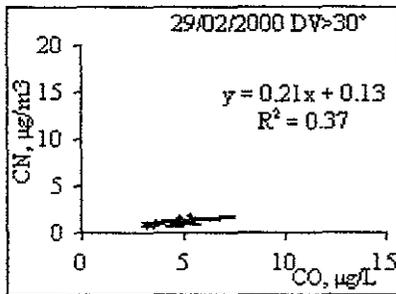
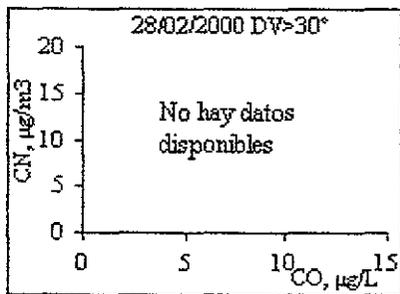


Figura 4-21 Diagrama de dispersión CCA 02 Datos 90°>DV>30°

La semana 03 comprende los días del lunes 6 al viernes 10 de marzo. Las regresiones reales de esta semana indican relaciones CO-CN distintas a las semanas 01 y 02. Esto puede deberse a que cambiaron las condiciones de los alrededores en comparación con las semanas previas, pues las actividades en CU retomaron su curso normal el 6 de marzo. La tabla y la figura 4-22 muestran correlaciones diarias superiores a 0.5. Se puede observar también que el valor de las pendientes tiende a ser más grande que en las semanas 01 y 02. El valor de las correlaciones indica que la relación entre el CN y el CO mejoró durante esta semana, probablemente por la presencia de una mayor cantidad de fuentes de emisión de CO y CN.

En esta semana, salvo el 6 de marzo, las correlaciones de las mañanas muestran una relación CO-CN fuerte; además, las pendientes tienden a ser más grandes que las del subgrupo general.

En el subgrupo de 14:00-21:59 sólo las correlaciones del 6, 7 y 10 de marzo son significativas. Un hecho relevante es que las pendientes de estos dos últimos días son menores en el subgrupo de las 06.00-13:59, lo que indica que los diversos procesos de combustión que generan CO y CN también disminuyen por las tardes.

Lamentablemente no puede decirse casi nada sobre el subgrupo de las noches, ya que la ausencia de datos impide analizar este subgrupo con más detalle, como lo muestran la tabla y la figura 4-25.

Al igual que en las semanas anteriores, el viento que proviene de $90^\circ > DV > 30^\circ$ mejora la relación CO-CN. Este subgrupo tiene cuatro correlaciones significativas, como lo muestran la tabla y la figura 4-27. Lamentablemente no se contó con resultados significativos en el subgrupo $DV < 30^\circ$ para comparar ambos subgrupos, ya que éste último presenta sólo un día con una relación significativa.

Tabla 4-22 Coeficientes lineales CCA 03. Datos 0000-2359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00	0.41	0.64	0.54	-1.05	112	0.999
7/3/00	0.70	0.84	0.89	-1.63	71	0.999
8/3/00	0.72	0.85	0.83	-1.44	70	0.999
9/3/00	0.49	0.70	0.79	-0.45	80	0.999
10/3/00	0.85	0.92	1.71	-5.19	57	0.999
Semana	0.53	0.73	0.95	-2.12	390	0.999

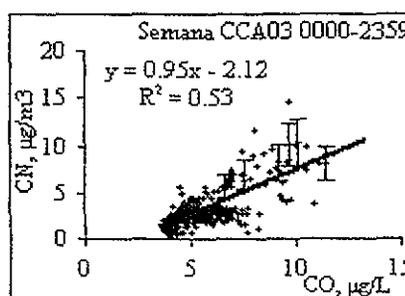
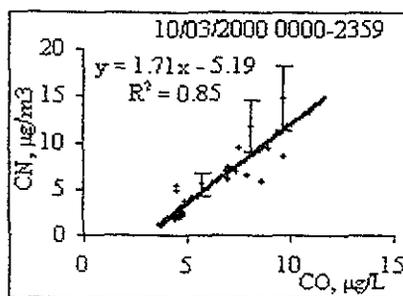
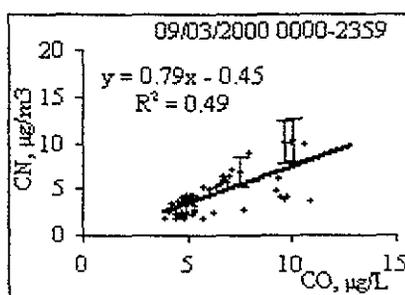
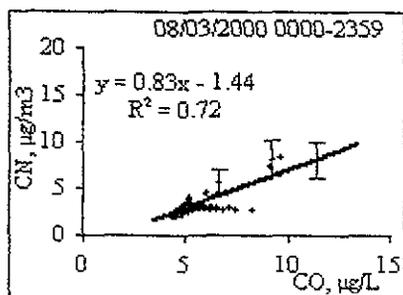
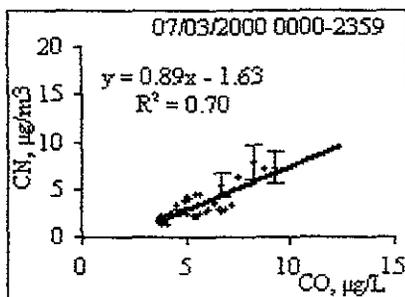
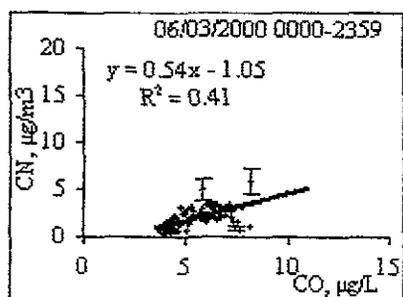


Figura 4-22 Diagrama de dispersión CCA 03 Datos 0000-2359

Tabla 4-23. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 0600-1359

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00	0.22	0.47	0.52	-0.80	44	0.99
7/3/00	0.94	0.97	1.16	-2.39	29	0.999
8/3/00	0.91	0.95	0.92	-1.43	28	0.999
9/3/00	0.90	0.95	1.19	-2.07	36	0.999
10/3/00	0.80	0.89	1.63	-4.58	33	0.999
Semana	0.59	0.77	1.10	-2.52	170	0.999

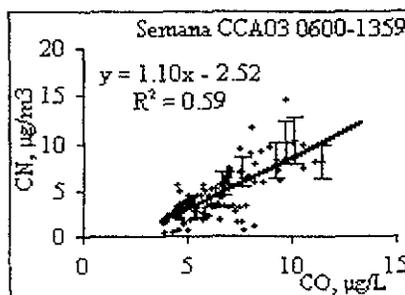
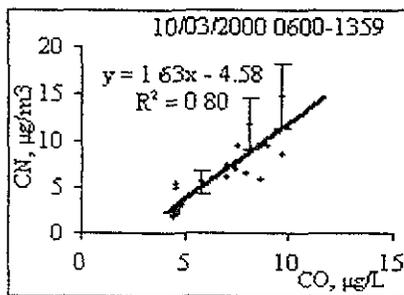
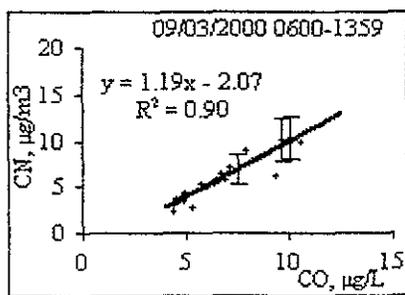
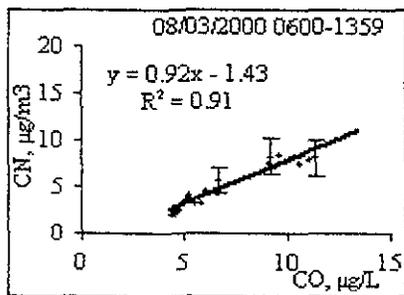
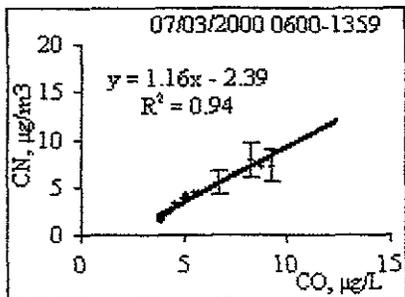
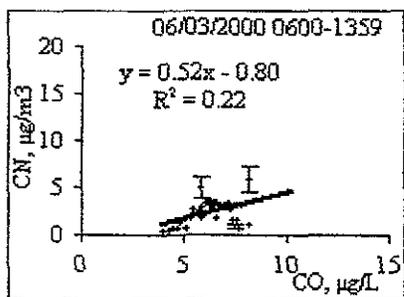


Figura 4-23 Diagrama de dispersión CCA 03 Datos 0600-1359

Tabla 4-24. Coeficientes lineales CCA 03 Datos 1400-2159

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00	0.37	0.61	0.42	-0.32	47	0.999
7/3/00	0.73	0.85	0.41	0.24	42	0.999
8/3/00	0.09	0.30	0.13	2.08	42	0.95
9/3/00	0.16	0.40	0.22	2.01	44	0.99
10/3/00	0.83	0.91	1.00	-2.41	24	0.999
Semana	0.35	0.59	0.43	0.25	199	0.999

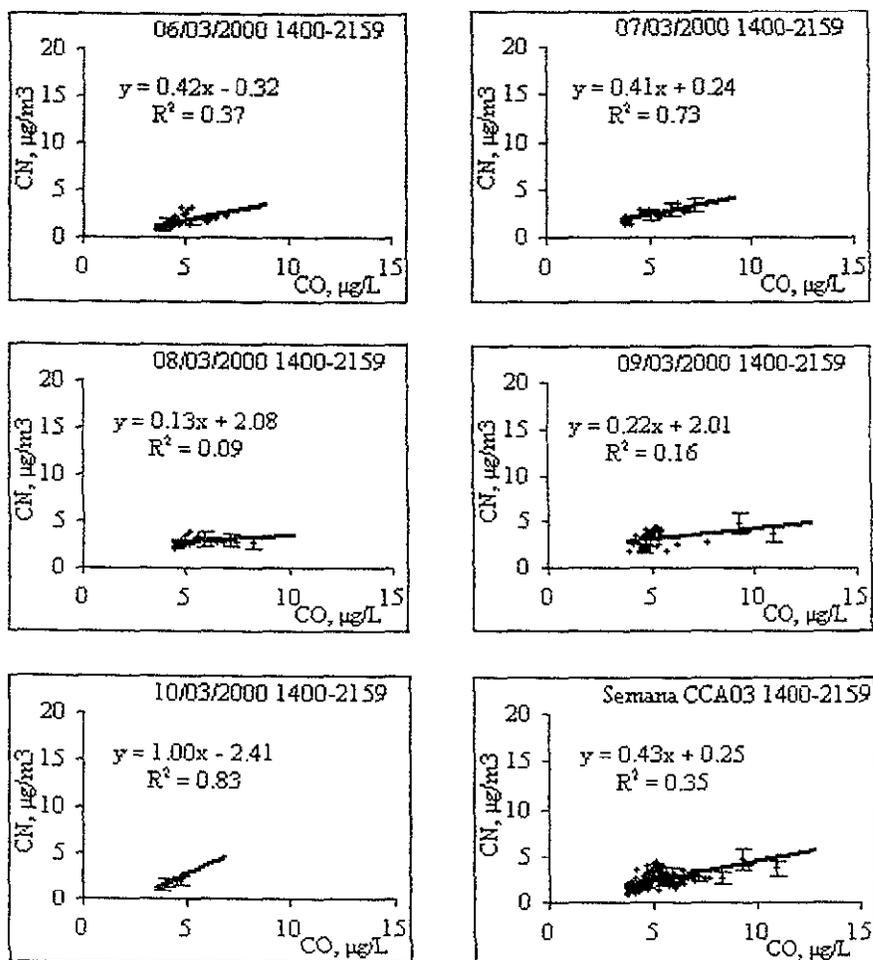


Figura 4-24 Diagrama de dispersion CCA 03 Datos 1400-2159

Tabla 4-25. Coeficientes lineales CCA 03. Datos 2200-0559

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00	0.09	0.30	0.16	-0.16	12	< 0.9
7/3/00	0.64	0.80	-0.22	3.58	9	0.99
8/3/00						
9/3/00						
10/3/00						
Semana	0.79	0.89	0.70	-2.27	21	

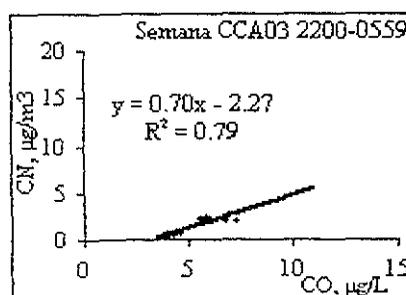
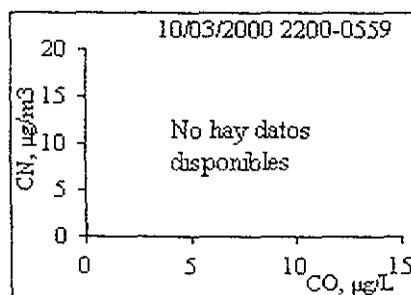
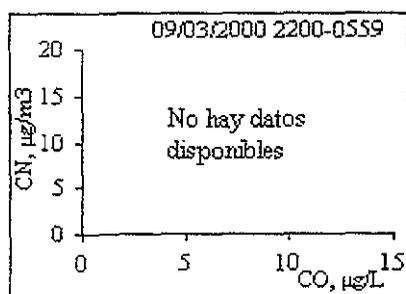
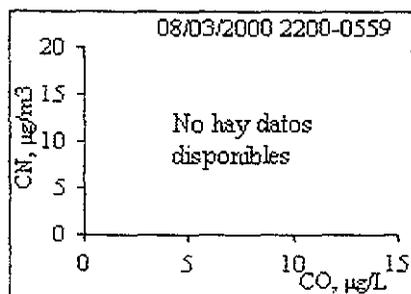
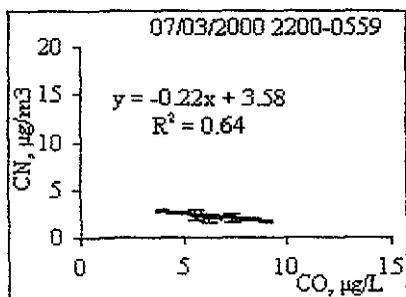
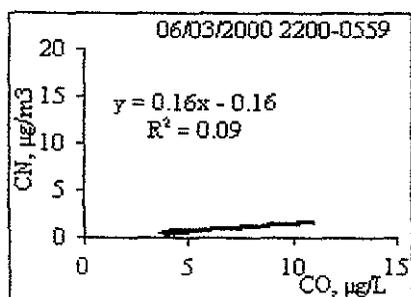


Figura 4-25 Diagrama de dispersión CCA 03 Datos 2200-0559

Tabla 4-26. Coeficientes lineales CCA 03. Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00						
7/3/00						
8/3/00	0.00	0.00	-0.01	2.95	22	
9/3/00	0.07	0.26	0.71	0.44	5	< 0.9
10/3/00	0.99	0.99	1.76	-5.54	4	0.99
Semana	0.13	0.36	0.32	1.14	31	< 0.9

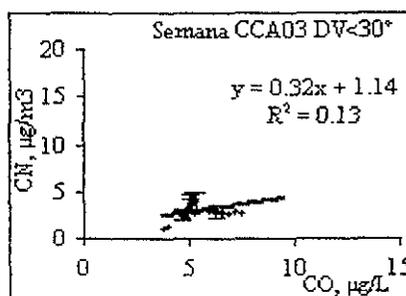
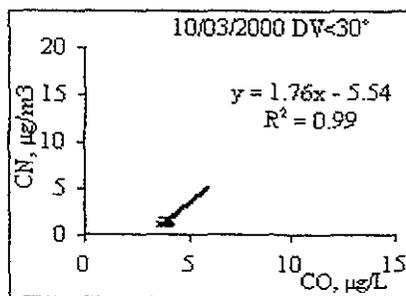
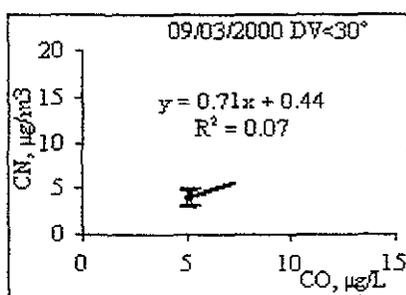
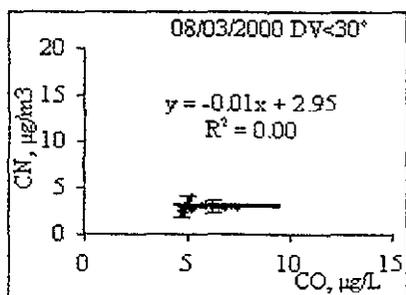
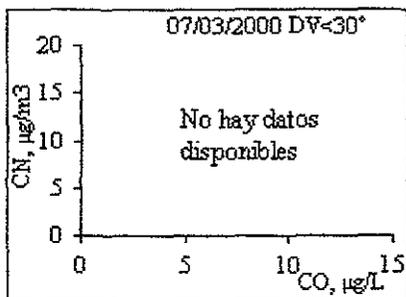
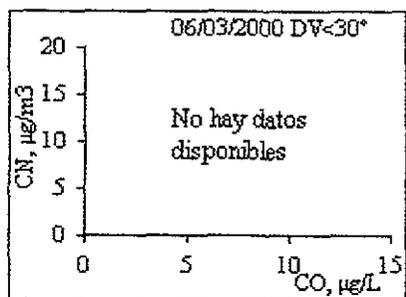


Figura 4-26 Diagrama de dispersión CCA 03 Datos $0^{\circ} < DV < 30^{\circ}$

Tabla 4-27. Coeficientes lineales CCA 03. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$

Fecha	R ²	R	Pendiente	Ordenada	N	P
6/3/00	0.35	0.59	0.45	-0.33	32	0.999
7/3/00	0.59	0.77	0.80	-1.26	52	0.999
8/3/00	0.15	0.39	0.39	0.95	13	<0.9
9/3/00	0.35	0.59	0.38	0.72	21	0.99
10/3/00	0.75	0.87	1.33	-3.44	35	0.999
Semana	0.44	0.66	0.72	-0.98	153	0.999

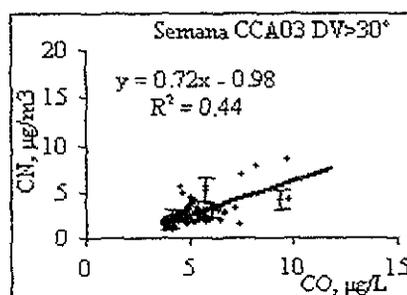
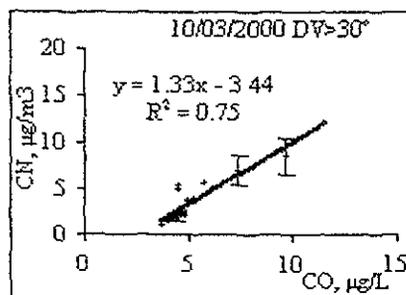
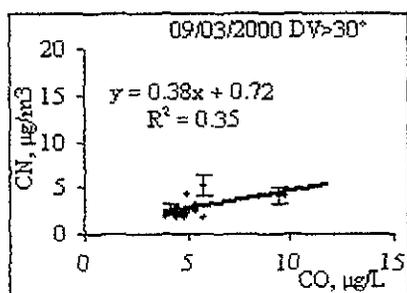
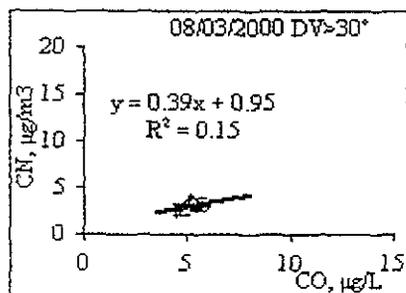
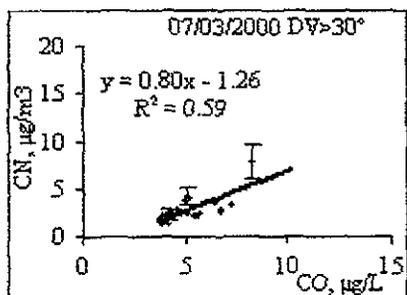
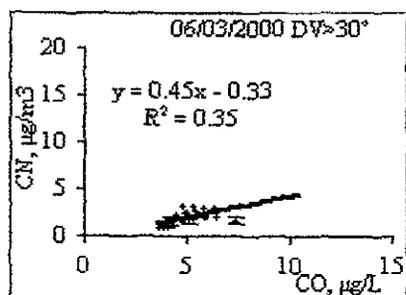


Figura 4-27 Diagrama de dispersion CCA 03. Datos $90^\circ > DV > 30^\circ$

Capítulo 5. Resumen, conclusiones y recomendaciones

5.1. Resumen

En los capítulos previos se analizó el posible vínculo que existe entre el CO y el CN, ya que ambas especies provienen del mismo tipo de fuente: la combustión incompleta. Se seleccionaron y tomaron muestras en tres lugares de la Ciudad de México, cada uno con distintas características. Se describió el procedimiento y el equipo de muestreo, así como el método de análisis de datos. También se estimó el error que involucran tales mediciones y se vio que se puede determinar la concentración atmosférica de CO y CN con una incertidumbre de $\pm 1\%$ y $\pm 0.5\%$, respectivamente. Los datos recolectados en los sitios de muestreo se evaluaron posteriormente con diversos métodos estadísticos como series de tiempo, distribución de frecuencias, coeficientes de correlación, coeficientes de determinación y regresiones lineales.

5.2. Conclusiones

Las concentraciones mínimas registradas de CO y CN en la Merced fueron $0.56 \mu\text{g/L}$ y $0.05 \mu\text{g/m}^3$, respectivamente. Estas concentraciones se registraron a las 14:40 horas, el miércoles 26 de enero del 2000. Las concentraciones máximas de CO y CN fueron respectivamente $11.35 \mu\text{g/L}$ y $17.71 \mu\text{g/m}^3$. Se registraron a las 8:39 de la mañana el jueves 27 de enero. En el IMP, las concentraciones mínimas registradas fueron: $0.73 \mu\text{g/L}$ de CO y $1.13 \mu\text{g/m}^3$ de CN el martes 1 de febrero a las 23:48 horas. Las concentraciones máximas en el IMP fueron $8.54 \mu\text{g/L}$ de CO y $10.04 \mu\text{g/m}^3$ de CN el jueves 3 de febrero a las 8:58 horas. En el CCA, las concentraciones

mínimas que se registraron fueron 2.00 $\mu\text{g/L}$ para el CO y 0.12 $\mu\text{g/m}^3$ para el CN el viernes 25 febrero a las 23:56. Las máximas registradas fueron 11.40 $\mu\text{g/L}$ de CO y 14.70 $\mu\text{g/m}^3$ de CN miércoles 8 de marzo a las 9:14.

Como se puede ver, la emisión diaria de contaminantes es más intensa por las mañanas que por las tardes y noches. La hora a la que se registraron las concentraciones máximas corresponde precisamente a periodos con mucha actividad, como el caso de las mañanas; o de poca actividad, como el caso de la mínimas registradas en las tardes y noches.

Las mayores concentraciones de partículas con diámetro $<1.8 \mu\text{m}$ se hallaron en la Merced y en el IMP, que son lugares que se caracterizan precisamente por el intenso tráfico de vehículos que continuamente circula por sus alrededores. Además, el tamaño de estas partículas es característico de emisiones de vehículos automotores. La cantidad de CN es mucho mayor en partículas cuyo diámetro aerodinámico es $<0.32 \mu\text{m}$.

Los coeficientes de absorción específica (A_E), para determinar la concentración de CN, son distintos en cada lugar: $15.68 \pm 3.33 \text{ m}^2/\text{g}$ para la Merced, $6.62 \pm 2.31 \text{ m}^2/\text{g}$ para el IMP y $5.37 \pm 12.06 \text{ m}^2/\text{g}$ para el CCA. Todos estos valores se encuentran dentro un intervalo esperado de $4-20 \text{ m}^2/\text{g}$.

El promedio de las pendientes significativas de todos los subgrupos generales (00:00-03:59 horas) es 0.80 ± 0.45 . El promedio de las ordenadas al origen de los mismos subgrupos es 1.24 ± 1.59 . Cada sitio de muestreo correspondía a una zona representativa de la Ciudad. Por ejemplo, la Merced, que es una zona comercial con un gran parque vehicular que consume tanto gasolina como diesel, así como diversos negocios que utilizan gas u otros combustibles diariamente. O el IMP, que es una zona industrial por donde circula una gran cantidad de vehículos que funcionan con gasolina y diesel. Y el CCA, que es una zona predominantemente residencial donde no hay muchos negocios y la mayoría de los vehículos consume gasolina.

No obstante, en algunos casos las diferencias entre las pendientes pueden hallar justificación en la incertidumbre relacionada con la determinación de las concentraciones de CN, así como por el tipo de combustibles utilizados en los vehículos que circulaban cerca de los sitios de muestreo y las condiciones particulares de cada proceso de combustión.

Los resultados de los análisis de regresión y correlación de datos indican que las mejores correlaciones se presentan durante las mañanas, de 6:00 a 13:59 horas. Precisamente en estas horas las emisiones de CO y CN predominan sobre otros procesos y la relación entre ambas especies es más fuerte.

No es posible establecer si la humedad relativa del ambiente afecta la relación CO-CN, aunque las correlaciones de datos tienden a mejorar cuando la humedad relativa es alta; sin embargo, el comportamiento general de la humedad relativa está ligado a ciclos diarios y a los procesos de combustión que ocurren en determinadas horas del día. Por lo tanto, no puede concluirse con certeza que la humedad relativa realmente tiene una influencia directa en la relación CO-CN.

Por otro lado, la dirección del viento y el lugar donde se encuentran las principales fuentes de emisión de los productos de combustión parecen ser aspectos importantes para estimar la relación entre el CO y el CN, pues la correlación de datos tienden a mejorar cuando el viento proviene de las zonas donde se encuentran dichas fuentes.

El CO es útil para predecir concentraciones de CN cuando las fuentes de emisión generan continuamente grandes cantidades de ambos contaminantes, puesto que la relación entre ambos contaminantes mejora. La relación resultante entre el CO y el CN es:

$$\text{CN}[\mu\text{g m}^{-3}] = 0.80 \cdot \text{CO}[\mu\text{g/L}] + 0.24 \quad (5.1)$$

Donde el coeficiente 0.80 es el promedio de las pendientes y 0.24 es el promedio de las ordenadas cuyas correlaciones de datos fueron significativas. Esta relación es valiosa para estimar concentraciones ambientales de carbón negro cuando se dispone solamente de mediciones de monóxido de carbono.

3 Recomendaciones

Dadas las condiciones necesarias que tienen que cumplirse para que se favorezca la generación de CO y CN; la reacción de combustión del Capítulo 1 indica que la relación molecular CN/CO está dada por $(m-2a)/2a=(m/2a)-1$, donde m representa la cantidad de átomos de carbono que contiene el combustible. Para que se produzca CN con esta reacción, la razón CN/CO tiene que cumplir con la condición $(m/2a)>1$, puesto que con una razón molecular menor que 1, la formación de CN no es viable. La razón CN/CO puede cambiar con muchos factores, uno de éstos es el tipo de combustible que consumen los vehículos automotores. Por ejemplo, el diesel es un compuesto cuyo contenido de átomos de carbono es distinto al de la gasolina y genera más CN que otros combustibles. En este sentido, sería de provecho para un mejor entendimiento de la relación CO-CN efectuar estudios relacionados los contaminantes que emite cada tipo de combustible.

Otro factor que puede alterar esta relación es la distancia de las fuentes de emisión al sitio de muestreo. Este factor puede crear efectos de disolución de contaminantes y envejecimiento de las partículas, que alterarían su forma y composición. Por lo tanto, estudios relacionados con la ubicación de las fuentes de emisión y la caracterización de las partículas que producen ayudaría a comprender mejor la contribución de estos efectos sobre la determinación del A_E y de la concentración ambiental de CN.

En la Ciudad de México no se ha realizado aún un inventario de emisiones de CN y aunque el tipo de vehículos que circulan por la ciudad y la composición del combustible que emplean ha cambiado con el tiempo, con esta relación se puede efectuar una primera estimación de concentraciones históricas de CN a partir de datos de CO registrados anteriormente en la ciudad. Esto también podría ayudar a comprender la evolución que ha habido del CN a través de los años y de las partículas que lo contienen.

Se puede reducir la incertidumbre que acompaña a las ecuaciones que vinculan al CO con el CN con más análisis de gases y de partículas, durante periodos de tiempo más largos. Del mismo modo, mediciones continuas del σ_{ob} de las partículas podrían ser de gran ayuda para una determinación más precisa de concentraciones de CN atmosférico, ya que la determinación del σ_{ob} es sencilla. Por otro lado, el análisis químico de las partículas puede mejorarse al emplear métodos complementarios, de modo que la certidumbre en la determinación de concentraciones de CN sea mayor.

Pese a que el carbón negro es uno de los contaminantes atmosféricos más antiguos en la historia del hombre, su investigación ha estado relegada por diversos motivos. Sin embargo, se pueden realizar estudios como éste para conocer un poco más el comportamiento del CN atmosférico, y de esta manera evitar situaciones que pongan en peligro la salud de los seres vivos que habitan en la Ciudad de México.

Referencias

- Mont et al, On the NO_2 + soot reaction in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, **104**, D1, 1729-1736, 1999
- Umgardner et al, On the Evolution of Aerosol Properties at a Mountain Site Above Mexico City, *J. Geophys. Res.* **105**, 22243-22253, 2000
- nd et al, Calibration and Intercomparison of filter-based measurements of visible light absorbing by aerosols, *Aerosol Science and Technology*, **30**:582-600, 1999
- rstcher et al., Characterization of particles in combustion engine exhaust, *J. Aerosol Sci.*, Vol. **29**, 4, pp. 389-396, 1998
- chier et al, Determination of atmospheric soot with a simple carbon method, *Tellus*, **41B**, 379-390, 1989
- ckery, D. W., *New England Journal Med.*, **329**, 1753, 1993
- rnández et al, Exposure of commuters to carbon monoxide in Mexico City. Measurements of in vehicle concentration, *Atmospheric Environment*, **29**, 524-532, 1997
- ller et al, Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles, *Journal of Geophysical Research*, **104**, D13, 15941-15954, 1999
- nzález et al, Temporal-spatial analysis of carbon monoxide in the Mexico City Metropolitan Zone, *The Science of the Total Environment*, **134**, 93-101, 1993
- rvath, Atmospheric light absorption-a review, *Atmospheric Environment*, **27A**, 3, 293-317, 1993
- lberer et al, Adsorption of NO_2 on carbon aerosol particles in the low ppb range, *Atmospheric Environment*, **33**, 2815-2822, 1999
- ghty Slama et al, Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health, *Journal of the air & waste management association*, **50**, 1565-1618, 2000
- rpie et al, A micro orifice uniform deposit impactor (MOUDI): description, calibration, and use, *Aerosol Science and Technology*, **14**, 434-446, 1991
- vakov and Corrigan, Thermal characterization of biomass smoke particles, *Mikrochim Acta*, **119**, 157-166, 1995

- anner et al, Toward the development of a global inventory for black carbon emissions, *Atmospheric Environment*, **27**, 8, 1277-1993, 1993
- anner and Novakov, Carbonaceous particles in the atmosphere: A historical perspective to the Fifth International Conference on carbonaceous particles in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, **101**, D14, 19373-19378, 1996
- ckins, Air Pollution, *McGraw-Hill*, 1974
- zold et al, The dependence of the specific attenuation cross-section on black carbon mass fraction and particle size, *Atmospheric Environment*, **31**, 5, 661-672, 1997
- zold and Niessner, Method comparison study on soot-selective techniques, *Mikrochim Acta*, **117**, 215-237, 1995
- infeld and Pandis, Atmospheric chemistry and physics, *John Wiley and Sons*, pp. 700-763, 1326, 1998
- egmann and Siegmann, *Molecular Precursor of Soot and Quantification of the Associated Health Risk*, *Plenum Press*, New York, 1998
- rbjan, Structure of the Atmospheric Boundary Layer, *Prentice Hall*, 1989