



DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE
DIÓXIDO DE CARBONO ATMOSFÉRICO Y SU
CONTENIDO DE CARBONO 14 EN EL SUR LA
CIUDAD DE MÉXICO DURANTE LA QUEMA
INTENSIVA DE FUEGOS ARTIFICIALES

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

ZAIRA MANZANO MELQUIADES

2142002544

ASESORAS:

DRA. MARÍA ELBA ORTIZ ROMERO VARGAS

DRA. CORINA SOLÍS ROSALES

Declaratoria

Yo, Dra. María Elba Ortiz Romero Vargas, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Dra. Corina Solís Rosales, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Zaira Manzano Melquiades, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Para Roberto, este trabajo lo hago para ti papá.

Sabes que eres lo más importante para mí, y a ti que me has dado absolutamente todo en esta vida quiero dedicarte lo que hasta ahora es mi más grande orgullo y tesoro.

Te amo.

Agradecimientos

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por apoyar la realización de este proyecto por medio del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) Proyecto AG100619.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos otorgados a través del proyecto 299073.

Al Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM por volver posible este proyecto, a la Dra. María Rodríguez Ceja, al Fis. Arcadio Huerta Hernández, a todos los que ahí laboran y en especial a las personas que se convirtieron en mis amigos sinceros y me enseñaron todo lo que se sobre el tema, mi cariño y una parte de mi corazón se quedara para siempre en las paredes de este laboratorio.

A mi asesora la Dra. Corina Solís Rosales por enseñarme tanto, por su apoyo, amabilidad y paciencia, pero sobre todo por ser una mujer admirable.

A mi asesora la Dra. María Elba Ortiz Romero Vargas por ser mi mentora, por motivarme y apoyarme siempre en este camino, por ser una magnífica profesora, una afectuosa persona y ser una mujer extraordinaria.

Al Sr. Sergio Martínez González por su entusiasmo, enseñanzas y ayuda en la realización de este proyecto, por su amistad y horas de charla durante mi paso por el LEMA.

A Jonatan Erick R. M. por estar conmigo siempre y más aún durante la realización de esta investigación, apoyarme en los días malos, y siempre alentarme a superar mis miedos.

A la familia Rosenfeld Mecalco por apoyarme incondicionalmente en la realización de este proyecto y brindarme tanto cariño.

A Raúl Manzano y Socorro Morales por quererme, procurarme y apoyarme en mi vida personal y académica.

A mi familia por siempre estar conmigo y enseñarme que puedo alcanzar todas mis metas en la vida y volver todos mis sueños realidad.

Por último, pero no por eso menos importante, agradezco profundamente a mi alma mater por recibirme siempre con los brazos abiertos, por forjarme como profesionista, pero sobre todo por volverme empática ante las situaciones adversas que la humanidad enfrenta, por tatuarme en el corazón que mi deber es ayudar, que el conocimiento debe ser una herramienta para transformar, pues de nada sirve el conocimiento egoísta.

IN CALLI IXCAHUICOPA

Por la razón en el tiempo la casa abierta esta, la UAM.

Contenido

Declaratoria	1
Agradecimientos	3
Contenido	4
Índice de tablas	6
Índice de figuras	6
Resumen	8
Introducción	9
Antecedentes	10
Justificación	10
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Marco teórico	11
Gases traza y su distribución	11
Dióxido de carbono	11
Balance global de CO ₂	13
Fuegos artificiales	17
Regulación de la pirotecnia	18
Peligros de la comercialización y el uso de pirotecnia	19
CDMX VS pirotecnia	19
Desarrollo del proyecto	21
Diseño experimental	21
Campaña de monitoreo	21
Estación IFLEMA	22
Estación Cannes	23
LEMA. Técnica AMS	24
Zona de baja energía	25
Acelerador	26
Zona de alta energía	26
Fracción de carbono moderno	26
Desarrollo de la técnica de captura y separación de ¹⁴CO₂ de muestras de aire atmosférico colectadas a través de una bomba de vacío	28
Titulación del hidróxido de potasio	28
Obtención de las muestras	29
Extracción de carbonato sólido de las muestras atmosféricas	30
Liofilización	31
Grafitización de los CO ₃ ²⁻ de las muestras	33
Resultados	37
Análisis meteorológico	42
Frecuencia y dirección del viento	42

Estación IFLEMA	42
Estación Cannes	44
Humedad relativa y temperatura	46
Estación IFLEMA	46
Estación Cannes	47
Análisis de otros contaminantes atmosféricos	48
Monóxido de carbono	48
Materia Particulada	49
Análisis de resultados	51
Conclusiones	59
Bibliografía	62
Apéndice	65
Eventos e incidencias ocurridas en la Ciudad de México durante la campaña	65
Reproducibilidad y exactitud	66

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de sustancias responsables del color en la pirotecnia. Sánchez, 2011.	18
Tabla 2. Diseño del experimento	21
Tabla 3. Calendario de la campaña de monitoreo	22
Tabla 4. Determinación de K_2CO_3 obtenido para las primeras tres muestras	30
Tabla 5. Masa $BaCO_3$ obtenida para la muestra C03air039	32
Tabla 6. Rendimiento $BaCO_3$ para obtener C	35
Tabla 7. Masa C esperada para la muestra C03air039	35
Tabla 8. Cantidad de M de K_2CO_3 obtenidos diariamente a las 8:00 h	38
Tabla 9. Porcentaje de error en $\Delta^{13}C$ para OXA II	66
Tabla 10. Porcentaje de error en $\Delta^{13}C$ para blanco	67
Tabla 11. Porcentaje de error en pMC para OXA II	67
Tabla 12. Porcentaje de error en pMC para blanco	68
Tabla 13. Porcentaje de error en $\Delta^{13}C$ para C1	69
Tabla 14. Porcentaje de error en $\Delta^{13}C$ para C2	69
Tabla 15. Porcentaje de error en pMC para C1	70
Tabla 16. Porcentaje de error en pMC para C2	70

Índice de figuras

Figura 1. CO_2 atmosférico en el observatorio Mauna Loa. NOAA, 2020.	12
Figura 2. Media mensual reciente CO_2 atmosférico en el observatorio Mauna Loa. NOAA, 2020.	13
Figura 3. Total de emisiones globales por año. NOAA, 2019.	15
Figura 4. Dependencia de la latitud de la amplitud estacional del CO_2 determinada por las estaciones de superficie. NOAA, 2019	16
Figura 5. Campaña #LaPrevenciónEsNuestraFuerza para la prevención de accidentes por el uso de pirotecnia. SGIRPC, 2019.	20
Figura 6. Campaña #LaPrevenciónEsNuestraFuerza para la prevención de accidentes por el uso de pirotecnia. SGIRPC, 2019.	20
Figura 7. Estación IFLEMA	23
Figura 8. Estación Cannes	24
Figura 9. Sistema de espectrometría de masas con aceleradores del LEMA.	25
Figura 10. Sistema de muestreo montado	29
Figura 11. Técnica por colorimetría	30
Figura 12. A la izquierda centrifuga HERMLE Labnet Z206A, al centro viales sumergidos en nitrógeno líquido y a la derecha el sistema de liofilización LABCONCO.	31
Figura 13. Masa del vial antes y después de la liofilización.	32
Figura 14. Inyección para intercambio de atmósfera de los viales	33
Figura 15. A la izquierda el sistema de manejo de carbonatos Ion Plus y a la derecha el equipo automatizado de grafitización (AGE III).	34
Figura 16. Rendimiento de las muestras para obtención de C	36
Figura 17. Variación del K_2CO_3 obtenido por fecha durante el muestreo	37
Figura 18. Variación del $BaCO_3$ obtenido por fecha durante el muestreo	39

Figura 19. Resultados de concentración CO ₂ . Estación Cannes	40
Figura 20. Variación del valor de fM del CO ₂ atmosférico en función del día de muestreo entre el 26 de noviembre y el 1° de enero	41
Figura 21. $\Delta^{14}\text{C}$ durante la campaña	42
Figura 22. Frecuencia del viento 28-29/11/19 Estación IFLEMA	43
Figura 23. Rosa de los vientos 28-29/11/19 Estación IFLEMA	44
Figura 24. Frecuencia del viento 02/12/19-03/01/20 Estación Cannes	45
Figura 25. Rosa de los vientos 02/12/19-03/01/20 Estación Cannes	46
Figura 26. Porcentaje de humedad relativa 28-29/11/19 Estación IFLEMA	47
Figura 27. Temperatura 28-29/11/19 Estación IFLEMA	47
Figura 28. Porcentaje de humedad relativa 24-30/12/19 Estación Cannes	48
Figura 29. Temperatura 24-30/12/19 Estación Cannes	48
Figura 30. Concentración de CO reportado a las 8:00 h por la Estación UAX-REMA.	49
Figura 31. Concentración de PM _{2.5} reportado a las 8:00 h por la Estación UAX-REMA.	50
Figura 32. Concentración de PM _{2.5} y PM ₁₀ reportado a las 8:00 h por la Estación PED- REMA.	50
Figura 33. Índice IMECA. Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018.	51
Figura 34. Relación velocidad del viento-fM	52
Figura 35. Rosa del viento 12/12/19-13/12/19 Estación Cannes	53
Figura 36. Frecuencia del viento 12/12/19-13/12/19 Estación Cannes	53
Figura 37. Rosa del viento 22/12/19 Estación Cannes	54
Figura 38. Rosa del viento 24/12/19 Estación Cannes	55
Figura 39. Frecuencia del viento 24/12/19 Estación Cannes	55
Figura 40. Rosa del viento 25/12/19 Estación Cannes	56
Figura 41. Rosa del viento 31/12/19-01/01/20 Estación Cannes	57
Figura 42. Frecuencia del viento 31/12/19-01/01/20 Estación Cannes	58

Resumen

México se caracteriza por su alegría y festividades, aquí las fiestas decembrinas son celebradas iluminando el cielo de colores. Y si bien los fuegos artificiales no son la causa principal de contaminación atmosférica, representan una variable importante que tiende a incrementarla; por lo que este estudio se centra en la determinación de CO₂ atmosférico y su contenido de ¹⁴C durante la quema de fuegos artificiales en la Ciudad de México. Debido al alto contenido de materia orgánica en pirotecnia, se esperaba que en los días en que se usaba más pirotecnia, la concentración de CO₂ atmosférico y principalmente de ¹⁴C, aumentaría considerablemente.

En diciembre de 2019, durante la temporada seca y fría, se capturó diariamente CO₂ atmosférico burbujeando aire a una solución alcalina de KOH por un período de 37 días, en una zona residencial-comercial ubicada en la región sur de la Ciudad. Posteriormente, el material carbonoso se extrajo como grafito y se analizó mediante técnica de espectrometría de masas con aceleradores (AMS) para determinar la fracción de carbono moderno y fósil en la atmósfera. La huella de carbono moderna se determinó mediante el análisis de la concentración de CO₂.

Los resultados indican que las mayores concentraciones de CO₂ y ¹⁴C observadas están directamente relacionadas con las festividades mexicanas, particularmente el Día de la Virgen María, Nochebuena, Navidad (fiestas religiosas) y Año Nuevo. Cabe señalar que durante el período de monitoreo ocurrieron dos grandes incendios, por lo que también se analizó el comportamiento del ¹⁴C durante estos eventos. Los resultados funcionaron como se esperaba, ya que los fuegos artificiales en las fiestas de Nochebuena aumentaron considerablemente la fracción de carbono moderno. Además, se presenta un análisis del efecto de la meteorología durante el muestreo.

El uso de ¹⁴C como trazador de fuentes nos abre la puerta a la realización de múltiples estudios utilizando nuevos métodos o variando los que ya se han utilizado, con el fin de consolidar técnicas que ayuden a la humanidad a detectar con precisión las fuentes de emisión de CO₂ y proporcionar información útil con el objetivo de que los tomadores de decisiones puedan legislar y gestionar acciones que permitan reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero a la atmósfera y contribuyan hacer frente al cambio climático.

Introducción

La revolución industrial fue un parteaguas en el modo de producción, el mundo pasó de una economía rural a una economía industrial y mecanizada; y los combustibles fósiles se convirtieron en el motor de la naciente industria (Chaves, 2004). Y así, también dieron comienzo las grandes emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.

Los principales GEI en la atmósfera terrestre son: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃) (Allwood *et al.*, 2014). Dadas las propiedades de absorción de radiación solar del CO₂, el planeta presenta una temperatura media adecuada para el desarrollo de la vida, su falta provocaría un planeta frío, pero un exceso de este gas induciría un efecto de calentamiento atmosférico, desencadenando un cambio en el sistema climático terrestre.

Actualmente, los principales responsables de la emisión de GEI a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles son la industria y los vehículos (Gómez *et al.*, 2018). Asimismo, es importante destacar que las fuentes naturales aportan grandes cantidades de GEI a la atmósfera.

En la naturaleza existen tres isótopos de carbono: dos estables (¹²C y ¹³C) y uno radiactivo (¹⁴C o radiocarbono) (Aitken, 1990). El ¹⁴C se produce cuando los rayos cósmicos que son protones y partículas alfa en su mayoría, éstos interactúan con los gases que componen la atmósfera produciendo espalación, de este modo ocurre fisión nuclear y la nucleosíntesis necesaria para generar los neutrones que son capturados por el ¹⁴N presente en el aire. (Ecuación 1)



Donde n son neutrones y p son protones. El ¹⁴C en la atmósfera se incorpora al ciclo del carbono una vez que se oxida a ¹⁴CO₂ (Heal, 2014). El ¹⁴C decae con una vida media de 5370 años. El ¹⁴C cosmogénico está en continua formación, mientras que al ser inestable decae exponencialmente, de manera que el ¹⁴C en la materia viva es prácticamente constante (Gómez *et al.*, 2018). Cuando un organismo muere, ese equilibrio cesa y el ¹⁴C comienza a disminuir. Los combustibles fósiles debido a su desintegración radiactiva a largo plazo no contienen ¹⁴C.

La concentración de ¹⁴C en la atmósfera puede verse afectada por dos aspectos antropogénicos globales. El primero se causa por la dilución de ¹⁴C atmosférico debido al incremento de CO₂ emitido por la quema de combustibles fósiles y la combustión incompleta (Heal, 2014). Y el segundo, por la liberación de ¹⁴C durante las pruebas de armas nucleares (Levin *et al.*, 2010). Sin embargo, la gran mayoría de éstas se realizaron durante la guerra fría (1950-1970). Por ende, en la esfera de la investigación se ha propuesto el uso de ¹⁴C como trazador indirecto del consumo de combustibles fósiles.

A nivel regional la concentración de ^{14}C en la atmósfera puede incrementar como consecuencia de la quema intensiva de fuegos artificiales (Gómez *et al.*, 2018), anualmente en la Ciudad de México hay un incremento en las emisiones de CO_2 y partículas suspendidas durante las fiestas decembrinas debido a la quema de pirotecnia (Retama *et al.*, 2019), las partículas suspendidas que emitidas son principalmente carbono negro equivalente y orgánico por lo que también ocurre un incremento en la concentración de ^{14}C en la atmósfera local de esta ciudad.

Antecedentes

Para contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera, como es el caso del CO_2 existen diversos métodos de muestreo válidos. Éstos se clasifican en extractivos y no extractivos, la elección de la técnica depende del tipo de contaminante, su origen y orden de concentración (Crespo, 2018).

La detección por espectroscopia infrarroja es la tecnología más utilizada para detección de CO_2 , pues este gas, al igual que otros gases compuestos por uno o más átomos diferentes, absorben la radiación infrarroja (IR) de manera muy característica y singular. Por lo que es posible identificar la presencia de estos compuestos en la atmósfera implementando este tipo de técnicas.

En el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM han desarrollado técnicas para el análisis de ^{14}C en los aerosoles atmosféricos y han implementado el uso de ^{14}C como trazador de fuentes, el cual, les permite identificar su origen (fósil o contemporáneo) (Gómez *et al.*, 2018).

Incluso se han determinado los cambios en las fuentes de emisión de CO_2 de la Ciudad de México deducidos de las concentraciones de ^{14}C en los anillos de los árboles (Beramendi-Orosco *et al.*, 2018). Sin embargo, aún son pocos los estudios sobre la concentración de CO_2 atmosférico y su contenido de ^{14}C en México.

En este trabajo se determinó el contenido de CO_2 en la atmósfera del sur de la Ciudad de México adaptando una metodología química para el muestreo gaseoso y posteriormente cuantificar el ^{14}C por espectrometría de masas con aceleradores (AMS por sus siglas en inglés). La técnica AMS nos permite detectar isótopos raros como es el caso del ^{14}C que representa sólo una parte por billón ($1/10^{12}$) de la abundancia de carbono total.

Justificación

A partir de 1950, se han observado cambios en los sistemas naturales; la atmósfera y los océanos se han calentado, los niveles del mar han incrementado y los volúmenes de hielo y nieve han disminuido. Esto, debido a la influencia humana en el sistema climático y a las emisiones recientes de GEI (IPCC, 2014).

México es uno de los países más vulnerables ante el cambio climático debido a sus características geográficas, las condiciones socioeconómicas desfavorables que viven algunos sectores de su población y a su poca capacidad de resiliencia (INECC, 2013).

En 2016 México ratificó el Acuerdo de París, hasta ahora el instrumento internacional más relevante en la lucha contra el cambio climático. En este pacto se comprometió a preparar, comunicar y mantener acciones para mitigar las emisiones de GEI (UNFCCC, 2015).

Cabe destacar que para analizar si las medidas de mitigación que se han puesto en marcha están siendo efectivas es imprescindible contar con un sistema de consulta de información que provea de datos confiables a lo largo del tiempo y esto se logra implementando un método eficaz y preciso de muestreo, separación y rastreo de CO₂ y de los diferentes GEI.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar la concentración de CO₂ ambiental, así como su fracción de carbono moderno y fósil en dos puntos al sur de la Ciudad de México durante la época de la quema intensiva de fuegos artificiales, una zona escolar (Instituto de física-UNAM) y una zona habitacional utilizando ¹⁴C como trazador.

Objetivos específicos

1. Desarrollar e implementar un método de muestreo y separación de ¹⁴CO₂ de muestras de aire atmosférico colectadas a través de una bomba de vacío, las cuales, son directamente burbujeadas en una solución de KOH para formar CO₃²⁻.
2. Realizar una campaña de monitoreo para la toma de muestras ambientales en el Instituto de Física de la UNAM y una zona habitacional.
3. Cuantificar las concentraciones de CO₂ y su fracción de ¹⁴C con espectrómetro de masas.
4. Determinar la fracción de carbono moderno y fósil en la atmósfera de ambas locaciones utilizando ¹⁴C como trazador.

Marco teórico

Gases traza y su distribución

La evidencia más convincente que tenemos de que el hombre está cambiando la composición de la atmósfera global son las mediciones a largo plazo de varios gases traza.

Dióxido de carbono

Después del agua, el CO₂ es el gas de efecto invernadero más importante en la atmósfera. Es el gas traza más abundante y mejor estudiado del ciclo global del carbono. La Figura 1 muestra una de las tendencias más precisas y famosas de la ciencia atmosférica. Existe una correlación entre el uso de combustibles fósiles y el aumento anual en la concentración de CO₂ atmosférico tal como se puede observar en esta figura. Los datos de CO₂ (curva roja), medidos como la fracción molar en aire seco, en Mauna Loa constituyen el registro más largo de mediciones directas de CO₂ en la atmósfera. Fueron iniciados por C. David Keeling, del Instituto de Oceanografía Scripps (SIO), en marzo de 1958 en una de las instalaciones

de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (Keeling, 1983). NOAA comenzó sus propias mediciones de CO₂ en mayo de 1974, y se han realizado en paralelo a las de Scripps desde entonces. Los datos se reportan como una fracción molar de aire seco definida como el número de moléculas de CO₂ dividido por el número de todas las moléculas en el aire, incluido el CO₂ mismo, después de que se haya eliminado el vapor de agua. La fracción molar se expresa como partes por millón (ppm). Ejemplo: 0.000400 se expresa como 400 ppm, y corresponde a la concentración promedio global de CO₂ en la superficie. Los datos de Mauna Loa se obtienen a una altitud de 3400 m en los subtrópicos del norte, y pueden no ser los mismos a los reportados como CO₂ en superficie (NOAA, 2020).

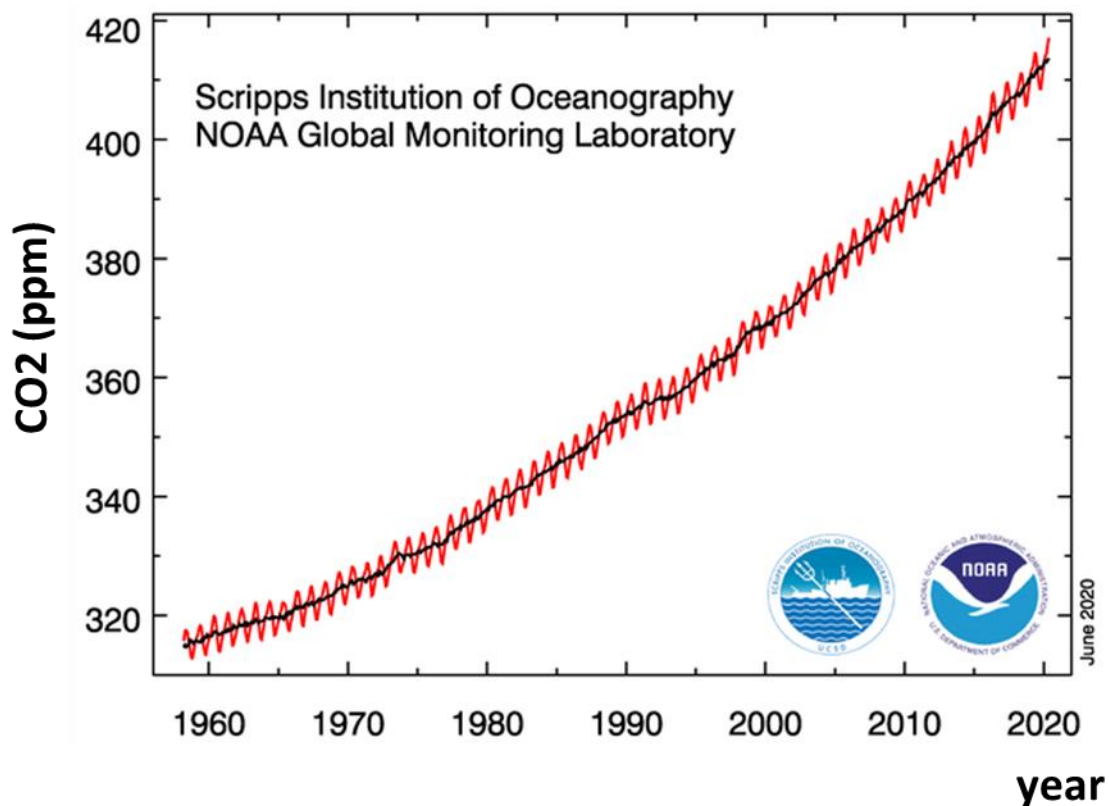


Figura 1. CO₂ atmosférico en el observatorio Mauna Loa. NOAA, 2020.

La Figura 2 muestra la variación temporal, de los últimos cuatro años completos del registro de CO₂ de Mauna Loa más el año actual. Las líneas rojas discontinuas con símbolos de diamante representan los valores medios mensuales, centrados a mediados de cada mes. Las líneas negras con los símbolos cuadrados representan lo mismo, después de la corrección para el ciclo estacional promedio. Los niveles de CO₂ en la atmósfera aumentan y disminuyen cada año a medida que las plantas a través de la fotosíntesis y la respiración absorben el gas en primavera y verano y lo liberan en otoño e invierno. Ahora, el rango de ese ciclo se expande a medida que se emite más CO₂ por la quema de combustibles fósiles

y otras actividades humanas, según un estudio dirigido por científicos de la SIO (NOAA, 2020).

La mayoría de las emisiones provienen de áreas urbanas, por lo que puede ser más fácil ver emisiones reducidas a favor del viento en las ciudades, aunque también en ese caso deben destacarse de las variaciones naturales. Solo las mediciones de ^{14}C en CO_2 nos permitirán separar limpiamente las fuentes fósiles de CO_2 de las fuentes y sumideros del ecosistema, independientemente de cuán variables sean estas últimas (Keelling et al, 1984).

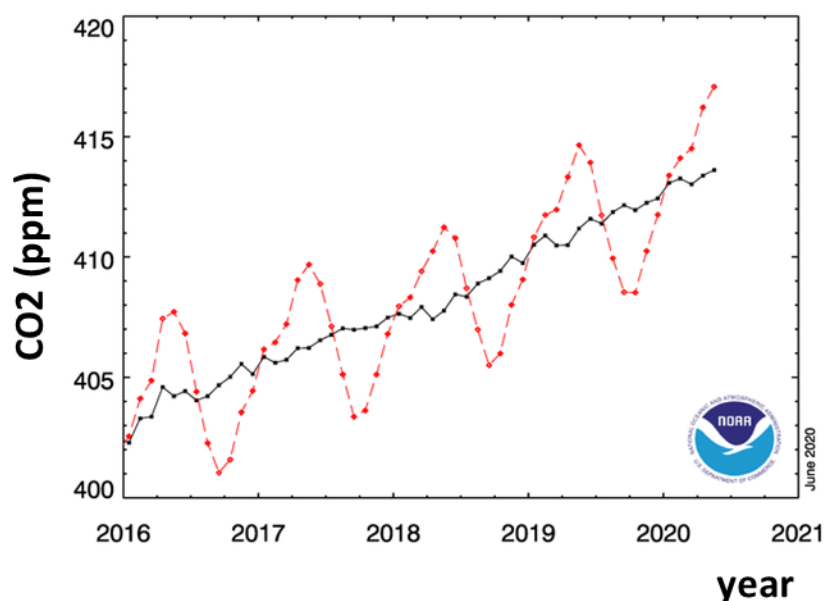


Figura 2. Media mensual reciente CO_2 atmosférico en el observatorio Mauna Loa. NOAA, 2020.

Balance global de CO_2

Desde 2000 hasta 2018, las emisiones de CO_2 a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles aumentaron de 6.7 PgC año^{-1} a $10.2 \text{ PgC año}^{-1}$ (1 petagramo de carbono es 10^{15} gC , o 1 billón de toneladas métricas C, o 3.67 billones de toneladas métricas CO_2). Las emisiones mundiales de combustibles fósiles han aumentado constantemente año tras año, con la excepción de 2009 después de la recesión económica mundial y 2014-2016 cuando las emisiones se mantuvieron casi constantes (Figura 3). Las emisiones de combustibles fósiles se concentran en áreas con alta densidad de población y actividad económica, y la información del inventario de emisiones utilizada en Carbon Tracker año 2019 (CT2019) indica que el 82% de las emisiones de combustibles fósiles provienen de los extratropicos del norte industrializados (NOAA, 2019).

Las barras en la figura 3 representan las emisiones de CO_2 para cada año en PgC año^{-1} en todo el mundo. Carbon Tracker modela cuatro tipos de intercambio de CO_2 de superficie a atmósfera, cada uno de los cuales se muestra en un color diferente: emisiones de combustibles fósiles (bronceado), flujo de biosfera terrestre excluyendo incendios (verde),

emisiones directas de incendios (rojo) y aire -intercambio de gas marino (azul). Las emisiones negativas indican que el flujo elimina el CO₂ de la atmósfera. El intercambio de superficie neta, calculado como la suma de estos cuatro componentes, se muestra como una gruesa línea negra.

La otra fuente importante de CO₂ son los incendios forestales, que en CT2019 agregan 2.0-2.6 PgC año⁻¹ adicional a la atmósfera. A diferencia de las emisiones de combustibles fósiles, el CO₂ de los incendios forestales proviene principalmente de tierras tropicales y del sur. El 87% de las emisiones de incendios forestales en CT2019 se encuentran en esas regiones. Estas fuentes se compensan con sumideros naturales en la tierra y en el océano. Juntos, estos sumideros absorben aproximadamente la mitad del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera. Durante el período 2001-2018, la suma global CT2019 de los flujos "naturales" (emisiones de incendios, el sumidero de la biosfera terrestre y el sumidero oceánico) es el 49% de las emisiones de combustibles fósiles durante el mismo período de tiempo. La tasa de crecimiento atmosférico de CO₂ sería aproximadamente el doble de la tasa observada sin estos sumideros. Carbon Tracker está diseñado para identificar estos sumideros, y así comprender mejor los mecanismos detrás de ellos (NOAA, 2019).

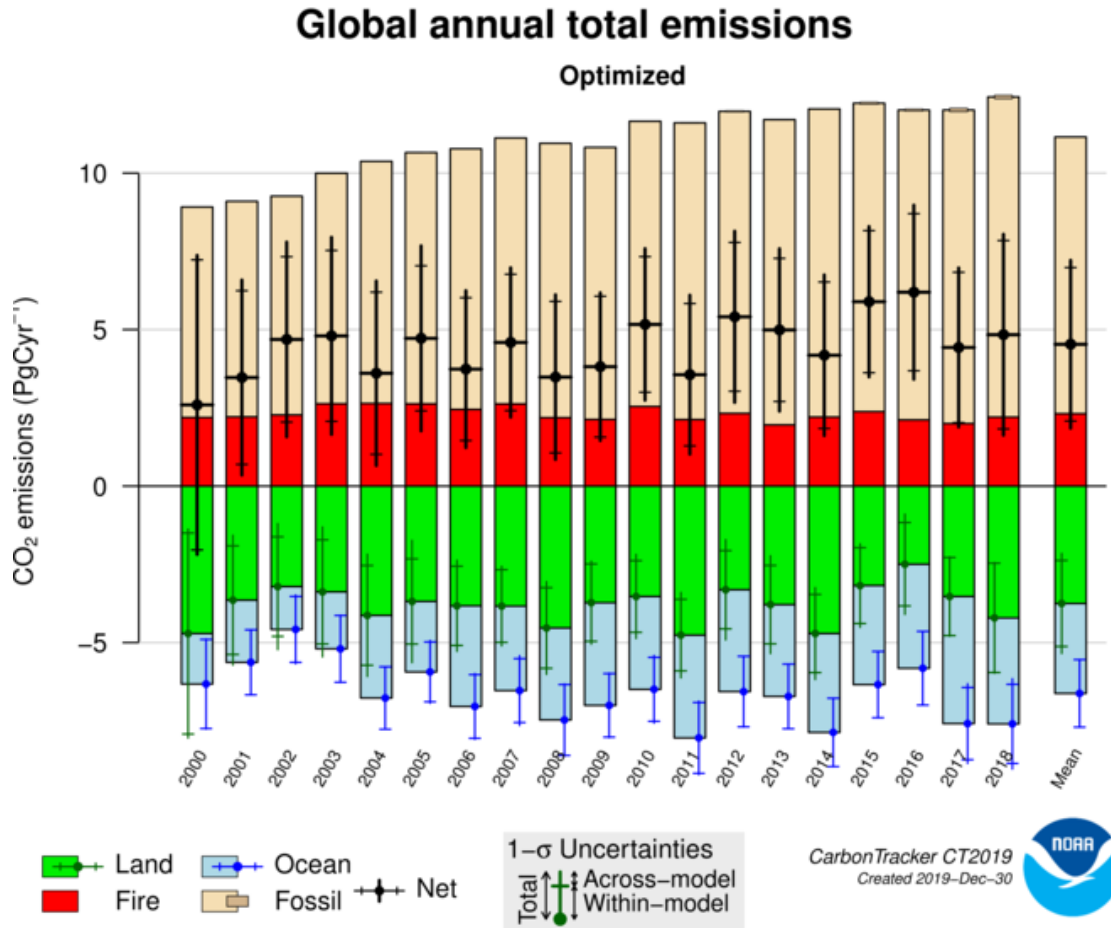


Figura 3. Total de emisiones globales por año. NOAA, 2019.

Según CT2019, los océanos del mundo absorben de 1.4 a 4.1 PgC año⁻¹. Este sumidero natural existe como resultado directo del aumento de las concentraciones de CO₂ atmosférico, las concentraciones de carbono disuelto en el océano aumentan para alcanzar el equilibrio con la atmósfera. Sin embargo, la circulación a gran escala del océano y el ciclo biológico, físico y químico del carbono hacen que haya una fuente de carbono a la atmósfera en los trópicos. En CT2019, esta fuente natural de entre 0.3 y 0.9 PgC año⁻¹ en los trópicos se compensa con grandes sumideros extratropicales de 2.3 - 4.4 PgC año⁻¹.

La biosfera terrestre también es un sumidero neto de CO₂, debido principalmente a dos procesos. Se trata de la fertilización con CO₂, en la que las plantas crecen más rápido, ya que pueden adquirir más fácilmente CO₂ para la fotosíntesis, y los efectos de las prácticas humanas de uso de la tierra, incluida la fertilización, el riego, la extinción de incendios y la recuperación del uso anterior de la tierra. Carbon Tracker intenta localizar estos sumideros de tierra espacial y temporalmente, por lo que las hipótesis sobre sus mecanismos se pueden probar. CT2019 encuentra sumideros de CO₂ terrestres ampliamente dispersos, con una absorción significativa de CO₂ por las regiones templadas y boreales del norte (1.7 - 2.8 PgC año⁻¹, aproximadamente el 58% del total de la tierra global de 2.5 - 4.8 PgC año⁻¹).

Los flujos se reportan como rangos. Estos rangos se calculan como los valores mínimos y máximos de la secuencia de estimaciones anuales de flujo CT2019, a menudo excluyendo el año 2000, ya que lo consideramos un año indirecto en el que las estimaciones pueden no ser representativas de la media real a largo plazo. Un rango amplio indica un alto grado de variabilidad interanual en la estimación del flujo (NOAA, 2019).

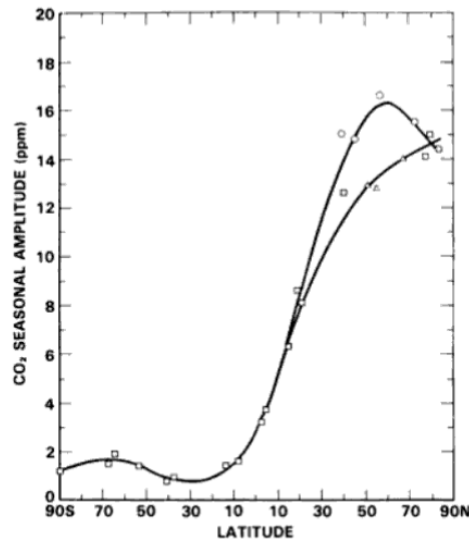


Figura 4. Dependencia de la latitud de la amplitud estacional del CO₂ determinada por las estaciones de superficie. NOAA, 2019

En todos los sitios, hay una tendencia al alza acelerada en los niveles de CO₂ impulsada principalmente por la quema de combustibles fósiles. La principal diferencia entre los sitios es la cantidad de fluctuación estacional en los niveles de CO₂ observada cada año. En general, los investigadores encontraron fuertes fluctuaciones estacionales de CO₂ en todo el hemisferio norte y fluctuaciones más débiles cerca del ecuador y en el hemisferio sur. La estación en Barrow, Alaska (71°N de latitud), por ejemplo, experimenta enormes oscilaciones en el CO₂ estacional. De hecho, en este sitio, el punto de referencia diario de 400 ppm se aprobó por breves períodos a partir de 2006. En el extremo opuesto del espectro, en el Polo Sur (latitud 90°S) y otros sitios. En el hemisferio sur, casi no hay variabilidad estacional.

Estas diferencias latitudinales en la fluctuación son el resultado de la actividad fotosintética de las plantas. Las plantas llevan a cabo la fotosíntesis durante la primavera y el verano, consumiendo CO₂ de la atmósfera y lo utilizan como una fuente de carbono para el crecimiento y la reproducción. Esto provoca la disminución en los niveles de CO₂ que comienza cada año en mayo. Una vez que llega el invierno, las plantas ahorran energía al disminuir la fotosíntesis. Sin la fotosíntesis, el proceso dominante es la exhalación de CO₂ por el ecosistema total, incluidas las bacterias, plantas y animales.

Debido a que la actividad fotosintética es la causa de los cambios estacionales de CO₂, las regiones con más plantas experimentarán fluctuaciones más grandes. La fotosíntesis también ocurre en los océanos, pero poco de este CO₂ se mueve realmente a la atmósfera, por lo que solo la fotosíntesis terrestre impulsa los ciclos estacionales. Dos regiones de la Tierra contienen la mayoría de las plantas terrestres: los continentes del hemisferio sur y los trópicos que abarcan, entre otras áreas, las vastas selvas tropicales de la cuenca del Amazonas. Cerca del ecuador, sin embargo, las variaciones estacionales de temperatura son menos pronunciadas. Por lo tanto, los cambios estacionales en CO₂ son más pronunciados en el hemisferio norte, donde los cambios estacionales en la temperatura resultan en diferencias muy grandes en la fotosíntesis de las plantas de verano a invierno.

Las implicaciones de este hallazgo son bastante significativas. Significa que las actividades humanas no solo causan el aumento general de los niveles de CO₂ con el tiempo, sino que a través del efecto sobre las temperaturas globales, las personas también controlan la fluctuación de CO₂ de una estación a otra (NOAA, 2019).

Fuegos artificiales

Los fuegos artificiales son una maravilla de la química que se remonta a la antigua China. Aunque las mezclas de los compuestos que nos podemos encontrar en ellos suele ser un secreto que las casas comerciales guardan celosamente, su composición sigue una receta muy concreta: una sustancia química rica en oxígeno y un químico que sirva como combustible. Además del carbono, que provee el combustible; el magnesio, que incrementa el brillo y la luminosidad; el calcio, cuya función es dar más intensidad a los colores, existen tres tipos distintos de oxidantes que se encargan de generar el oxígeno que reaccionará durante la combustión: los nitratos, los cloratos y los percloratos.

Los alquimistas chinos fabricaron estas luces iluminadoras combinando el salitre (nitrato de potasio, un tipo de conservador de alimento), carbón, sulfuro y otros ingredientes, creando una versión inicial de la pólvora (ChemicalSafetyFacts, 2020).

Actualmente, la mezcla típica de fuegos artificiales contiene combustible, un oxidante para proporcionar el oxígeno necesario para la combustión, y cloruros de metal, que contienen el ion de cloruro que ayuda a generar los colores. Como se ilustra en la tabla 1, diferentes elementos químicos producen una amplia variedad de colores (Sánchez, 2011).

Tabla 1. Resumen de sustancias responsables del color en la pirotecnia. Sánchez, 2011.

Color	Sustancias químicas
Rojo	Li_2CO_3 , SrCO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{SrC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Naranja	CaCl_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, CaCO_3
Dorado	Fe, C, Aleación Ti-Fe
Amarillo	NaNO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, NaHCO_3 , NaCl
Verde	BaCl_2 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$, BaCO_3
Azul	CuCl , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Violeta	Mezcla de compuestos de Sr (rojo) y Cu (azul)
Plata	Al, Ti, Mg
Blanco	Al, Mg, BaO

Como se mencionó anteriormente el uso intensivo de fuegos artificiales puede incrementar la concentración de ^{14}C , esto es debido a los materiales que se emplean en su composición, generalmente se suele mencionar el uso de pólvora mezclada con sales metálicas para obtener intensos colores al momento del estallido, todos estos materiales inorgánicos. Sin embargo, para mantener los materiales unidos se emplea una pasta cuyo material base es aserrín (Partículas finas de madera), de ahí que el CO_2 emitido en la combustión presente una gran fracción orgánica.

Regulación de la pirotecnia

En México, la pirotecnia es una actividad regulada por la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos, publicada en 1972, aunque última reforma fue publicada en el Diario Oficial de la Federación en el año 2015. En esta se manifiesta que se trata de una actividad legal y lícita, siempre y cuando adquieras los artificios pirotécnicos autorizados por la Secretaría de la Defensa Nacional, de personas físicas o morales autorizadas para su venta por la misma secretaría. Por ley, las personas mayores de 18 años están autorizadas a portar hasta 10 kg de pirotecnia (LFAFE, 2015).

Dicha ley no hace distinción alguna y regula a la pirotecnia de la misma manera que a las armas de fuego y a los explosivos. Además, que no regula los de la pirotecnia efectos sobre el ambiente (Retama, 2019). Por otra parte, existe una iniciativa de ley que regula la actividad pirotécnica en exclusiva llamada Ley Federal de Pirotecnia cuyo *objeto es regular la fabricación, importación, exportación, almacenamiento y comercialización de materias y artificios pirotécnicos*. En ella se clasifican las materias primas y los productos terminados de acuerdo con su uso y grado de peligrosidad (Gobierno de México, 2011).

Peligros de la comercialización y el uso de pirotecnia

Tultepec, México es un pueblo ubicado al norte de la CDMX famoso por el comercio de fuegos artificiales. Sin embargo, el mercado San Pablito debe su fama no solo a la gran magnitud y variedad de pirotecnia que ahí se comercializa, sino también a un par de grandes accidentes que han cobrado la vida de decenas de personas que se encontraban en el lugar al momento de los siniestros (BBC News Mundo, 2018).

La fabricación y uso de pirotecnia conlleva un peligro inminente, tan solo en la CDMX durante el mes de septiembre en el cual se celebra el Día de la Independencia mexicana el número de accidentes por el uso indebido de pólvora aumenta un 300%, esto sin mencionar que no es la temporada de mayor quema de fuegos artificiales en la ciudad (Lara, 2018).

Una vez en el cielo la pirotecnia representa otro factor de riesgo pues la liberación de CO y partículas suspendidas, en conjunto con otros factores de emisión generan alta contaminación, poca visibilidad y sensación de neblina (Dávila, 2019).

CDMX VS pirotecnia

Por estos motivos el Gobierno de la CDMX, el último trimestre del año 2019 lanzó la campaña #LaPrevenciónEsNuestraFuerza, la cual consistía en una serie de banners (entre ellos los ilustrados por las figuras 5 y 6) que se colocaron en lugares concurridos de la ciudad tal como fueron las instalaciones de los principales servicios de transporte, además se publicitaron en Internet y se publicaron en los perfiles de las redes sociales oficiales de la Jefa de Gobierno de la Ciudad y de la Secretaria de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC).

A pesar de que el objetivo de esta campaña no estaba centrado únicamente en evitar el uso de fuegos artificiales, si hacía mucho énfasis en esta medida para mantener a la población segura y libre de accidentes.



Figura 5. Campaña #LaPrevenciónEsNuestraFuerza para la prevención de accidentes por el uso de pirotecnia. SGIRPC, 2019.



Figura 6. Campaña #LaPrevenciónEsNuestraFuerza para la prevención de accidentes por el uso de pirotecnia. SGIRPC, 2019.

Desarrollo del proyecto

El trabajo de análisis de este proyecto se realizó en las instalaciones del LEMA, ubicado en Instituto de Física de la UNAM.

Diseño experimental

En la tabla 2 se ilustra el diseño experimental del proyecto, se colectaron 44 muestras, se realizó un ensayo por muestra para obtener carbonatos de bario (BaCO_3), se seleccionaron muestras representativas y se procesaron hasta obtener C reducido a grafito.

Para la técnica AMS se usaron blancos y OXA II (estándar en la determinación de ^{14}C) como estándares primarios, además de AIEA C1 y C2 como estándares secundarios (C1 estándar en la determinación de ^{14}C mediante carbonatos y C2 estándar en la determinación de ^{14}C de edad moderna).

Tabla 2. Diseño del experimento

Numero de muestras	Numero de ensayos por muestra	AMS. Estándar primario para ^{14}C	AMS. Estándar secundario para ^{14}C
44	1	Blanco OXA II	C1 C2

Campaña de monitoreo

La campaña de monitoreo se realizó al sur de la Ciudad de México en una zona predominantemente habitacional y comercial denominada Estación Cannes durante la temporada seca-fría, inicio el jueves 28 de noviembre del 2019 y concluyo el 3 de enero del 2020 (Tabla 3). Algunas muestras fueron colectadas dentro del campus universitario este sitio se le denomino Estación IFLEMA.

Se colectó una muestra diaria a las 08:00 horas y para los días de interés, con mayor contaminación ambiental, se aumentaba uno o dos muestreos en horarios vespertinos y nocturnos.

Tabla 3. Calendario de la campaña de monitoreo

<h1 style="text-align: center;">Diciembre</h1> <h2 style="text-align: right;">2019</h2>						
Campaña de monitoreo						
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
25	26	27	28 CO3air001	29 CO3air002	30	1
2 CO3air00	3 CO3air004	4 CO3air005	5 CO3air006	6 CO3air007	7 CO3air008	8 CO3air009
9 CO3air010	10 CO3air011	11 CO3air012 CO3air013	12 CO3air014 CO3air015	13 CO3air016	14 CO3air017	15 CO3air018
16 CO3air019	17 CO3air020	18 CO3air021	19 CO3air022	20 CO3air023	21 CO3air024	22 CO3air025
23 CO3air026	24 CO3air027 CO3air028 CO3air029	25 CO3air030 CO3air031	26 CO3air032	27 CO3air033	28 CO3air034	29 CO3air035
30 CO3air036	31 CO3air037 CO3air038 CO3air039	1 CO3air040 CO3air041 CO3air042	2 CO3air043	3 CO3air044	4	5

Estación IFLEMA

Las muestras CO3air001 y CO3air002 se colectaron en las instalaciones del Instituto de Física de la UNAM, lugar al que se denominó Estación IFLEMA (Figura 7) coordenadas UTM: Zona 14, hemisferio norte. 481168.1, 2136670.

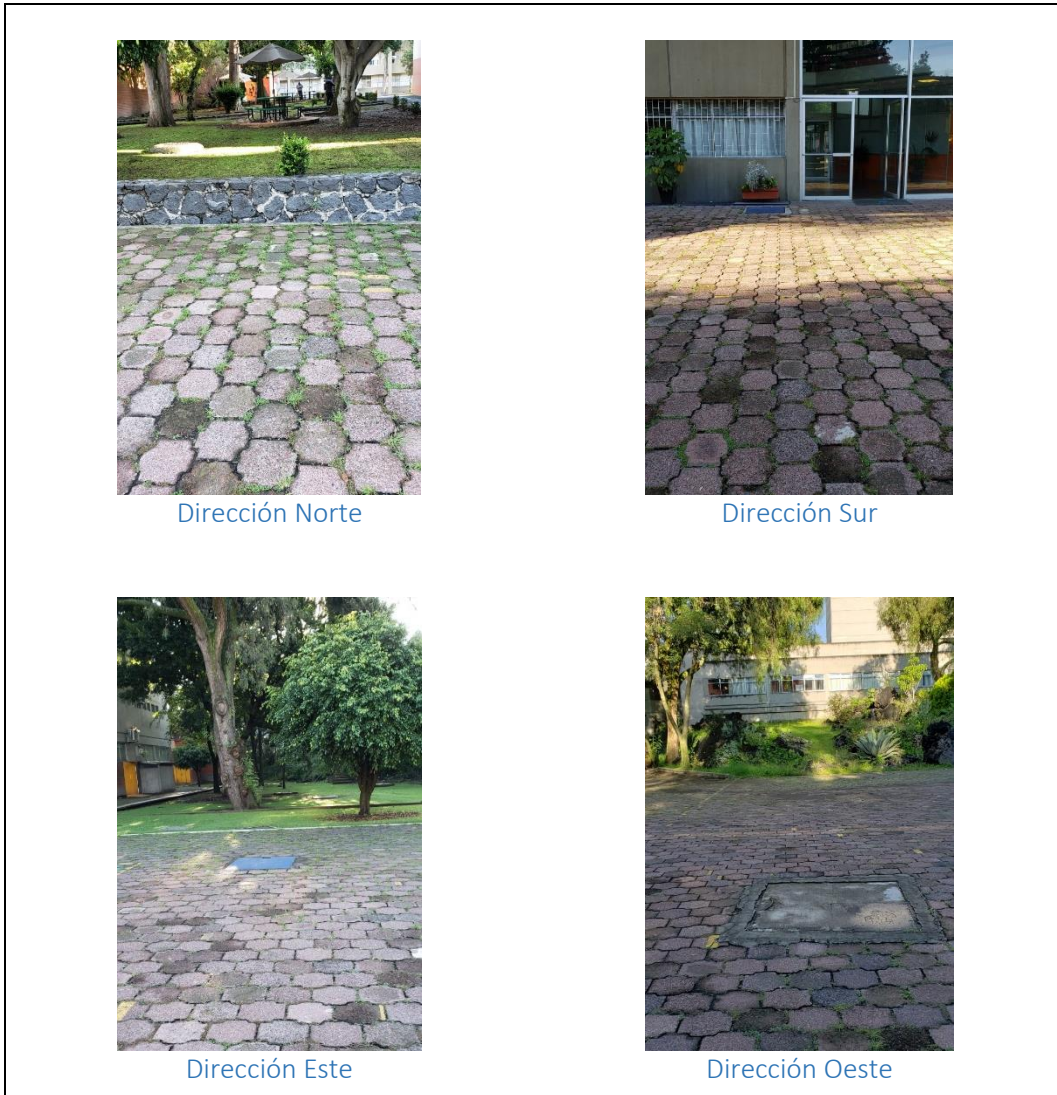


Figura 7. Estación IFLEMA

Estación Cannes

A partir del 2 diciembre de 2019 y hasta el 3 de enero de 2020 las muestras fueron colectadas en la azotea de una casa habitación denominada Estación Cannes (Figura 8) coordenadas UTM: Zona 14, hemisferio norte. 486480.9, 2133673.9.



Figura 8. Estación Cannes

LEMA. Técnica AMS

El sistema de espectrometría de masas con aceleradores del LEMA cuenta con tres partes importantes: una zona de baja energía, el acelerador tipo Tandetrón de 1 MV de la compañía High Voltage Engineering Europa y una zona de alta energía (figura 9).

Los cátodos que contenían el C reducido a grafito de las muestras fueron introducidos en el carrusel de 50 posiciones del sistema para ser analizados por técnica AMS permitiendo conocer directamente la concentración exacta de partículas de ^{14}C , ^{13}C y ^{12}C .



Figura 9. Sistema de espectrometría de masas con aceleradores del LEMA.

La técnica AMS cuantifica la cantidad de átomos de ^{12}C , ^{13}C y ^{14}C contenidos en cada muestra analizada. Como se mencionó anteriormente esto es posible gracias a un proceso de tres fases, que se describe brevemente a continuación:

Zona de baja energía

En esta zona los cátodos son insertados a una fuente de iones uno por uno mediante una bayoneta, en esta zona hay una entrada de Cesio (Cs), el cual es calentado, ionizado y enfocado por medio de un ionizador parabólico hacia el cátodo, produciendo la erosión catódica (sputtering). Dicho en palabras más simples, los átomos de C y partículas que componen la muestra son arrancados del cátodo, ionizados negativamente y atraídos hacia un cono de extracción, formando así un haz.

Antes de entrar al acelerador es necesario hacer una primera selección de iones de interés, para focalizar el haz sin perder energía, para ello se emplea un lente Einzel, que consta de tres cilindros, los dos externos conectados a tierra y el centra que aplica una diferencia de potencial.

Una vez que el haz ha sido focalizado, este se ingresa a un deflector electrostático para garantizar la focalización en dirección horizontal y vertical. El haz es nuevamente focalizado por un lente Einzel y un tubo de dirección, en esta ocasión la diferencia de potencial se aplica para hacer coincidir la dirección del haz con el centro del tubo de conducción.

Por último, el haz es sometido a un sistema de inyección secuencial, el cual está localizado junto a un deflector magnético y cuya función es administrar un potencial electrostático, y así seleccionar diferentes isótopos (en este caso ^{14}C , ^{13}C y ^{12}C) para la inyección al acelerador en diferentes intervalos de tiempo (García, 2016)

Acelerador

El acelerador tipo Tandetrón del LEMA, cuenta con una unidad de aceleración de tipo Crockroft-Walton, el cual se compone de placas electrostáticas que aceleran el haz y lo dirigen a una zona de *stripping*, en esta zona los iones que negativos se someten a un cambio de carga, es decir pasan a ser iones positivos. Las moléculas que logran pasar el primer filtro de la zona de baja energía se disocian debido a la colisión con Argón (Ar), sometiéndose a una segunda aceleración (García, 2016).

Zona de alta energía

Una vez que el haz sale del acelerador, pasa por un lente cuadrupolar el cual lo enfoca en la dirección deseada, sin alterar su energía. Para garantizar que el haz esté correctamente enfocado se hace pasar al haz por un segundo lente cuadrupolar con los gradientes invertidos. Posteriormente se sigue un segundo deflector magnético, en el que se eligen valores específicos al estado de carga 2^+ y masa 14.

El sistema de detección está compuesto por dos cajas Faraday para medir corriente de ^{12}C y ^{13}C . Para medir el número de átomos de ^{14}C , el haz pasa por un segundo deflector electrostático, luego es dirigido a una cámara de ionización que contiene gas isobutano. El gas frena las partículas, al mismo tiempo que se ioniza y se colectan los iones en dos electrodos en el interior de la cámara. De este modo las partículas diferentes al ^{14}C , pero que tienen la misma masa pueden ser descartadas (García, 2016).

Fracción de carbono moderno

Los resultados de la medición por AMS de los cocientes de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ y $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, se reportan como fracción de carbono moderno (fM), ecuación 2.

$$fM \text{ muestra} = \frac{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ muestra normalizada})}{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ estándar normalizado})} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{estándar normalizado}}$ se define como el valor de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ que se habría medido en la atmósfera en 1950. Ambos valores ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{muestra normalizada}}$) y ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{estándar normalizado}}$) han sido corregidos por el fraccionamiento isotópico. El fraccionamiento ocurre porque distintas plantas presentan diferentes proporciones de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y se expresa como $\delta^{13}\text{C}$ (delta ^{13}C en partes por mil) (Ecuación 3):

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_s - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{VPDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{VPDB}}} \right) \cdot 1000\text{‰} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Con el objeto de comparar los valores de radiocarbono de materiales diferentes, en la corrección todos los valores de radiocarbono se convierten al valor que una muestra tendría si fuera una muestra de madera con un $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$. El error relativo en la medida de radiocarbono de la técnica AMS es aproximadamente del 0.3% para el estándar OXII.

Dado que en la atmósfera solo se tiene carbono moderno y/o fósil, si se conoce la f_M es posible determinar de manera indirecta la fracción de carbono fósil, por lo que f_M representa la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra relacionada con la proporción isotópica.

Desarrollo de la técnica de captura y separación de $^{14}\text{CO}_2$ de muestras de aire atmosférico colectadas a través de una bomba de vacío

Titulación del hidróxido de potasio

La titulación es un procedimiento de análisis químico que permite determinar la concentración de una solución acida o básica desconocida, mediante una neutralización controlada.

Para determinar la pureza del reactivo hidróxido de potasio (KOH) utilizado, se preparó una solución en 100 ml de agua desionizada con 929.66 mg de reactivo.

El peso molecular de la sustancia KOH es de 56.107 g por mol, por lo tanto, la masa empleada equivaldría a 16.57 mmol, si se tuviera un reactivo 100% puro. La concentración se determinó en unidades de molaridad (mol/L) y para determinarla se empleó la ecuación 4.

$$\text{Molaridad} = \text{moles de soluto} \div \text{litros de solución} \quad (\text{Ecuación 4}).$$

$$\text{Molaridad teórica} = 16.57 \text{ mmol} \div 100 \text{ ml} = 0.166 \text{ M}$$

Simultáneamente, en el laboratorio se determinó de manera experimental la concentración efectiva de la solución de KOH, se titularon 10 ml de la solución de KOH con un volumen de 0.7 ml de solución de HCl 2 M. Para determinar la concentración de una solución mediante la técnica de titulación se parte del principio de equilibrio químico. “En una reacción química las sustancias que actúen como reactivos reaccionarán hasta que se alcance un equilibrio” (Ecuación 5).

$$\text{Concentración 1} \times \text{Volumen 1} = \text{Concentración 2} \times \text{Volumen 2} \quad (\text{Ecuación 5}).$$

Debido a que conocemos la concentración y el volumen utilizado de la solución que se empleó como titulante (solución HCl), podemos despejar la ecuación 3 para determinar la concentración de la sustancia titulada (solución KOH).

$$\text{Concentración KOH} = (0.7 \text{ ml} \times 2 \text{ M}) \div 10 \text{ ml} = 0.14 \text{ M}$$

La pureza del reactivo es igual a la concentración teórica entre la concentración efectiva.

$$\text{Pureza del reactivo} = 0.14 \text{ M} \div 0.1657 \text{ M} = 0.845$$

Es necesario titular una alícuota de cada lote de solución preparada para determinar la concentración inicial de la solución a emplear para reducir errores experimentales en el análisis de las muestras.

Obtención de las muestras

Las muestras atmosféricas se obtuvieron bombeando aire durante media hora a una solución de KOH 0.14 M para los días promedio (con menor concentración de CO₂) y 0.5 M para los días objetivo (con mayor concentración de CO₂) y días en los que la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) reportaba mala calidad del aire. La concentración inicial de la solución KOH se determinó titulando una alícuota de 10 ml de cada lote preparado con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 2 M, utilizando fenolftaleína como indicador colorimétrico de pH.

El aire fue bombeado utilizando una bomba de vacío de 115 VAC-60 Hz y 1.7 A (figura 10), la muestra de aire atmosférico se burbujeo en la solución de KOH, con el fin de que la fracción de CO₂ contenida en el aire atmosférico fuera capturada por el KOH para formar carbonatos de potasio (K₂CO₃) (Ecuación 6).

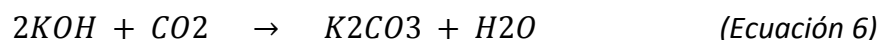
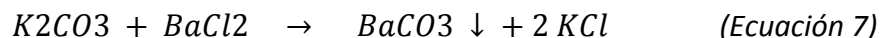


Figura 10. Sistema de muestreo montado

Extracción de carbonato sólido de las muestras atmosféricas

Debido a que el K_2CO_3 es muy soluble en medio acuoso, se procedió a agregar cloruro de bario ($BaCl_2$) ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$ Baker Analyzed 0970), el cual, en dilución se disocia y reacciona con los iones del K_2CO_3 favoreciendo la producción de $BaCO_3$ sólido (Ecuación 7).



Para determinar la cantidad adecuada de $BaCl_2$ que se debía agregar a cada muestra, se tomó una alícuota y se tituló con solución HCl 2 M, utilizando indicadores colorimétricos de pH. Fenolftaleína para el primer vire de color y naranja de metilo para el segundo (Figura 11). Esto permitió conocer la concentración final de la solución KOH y por ende la cantidad de K_2CO_3 obtenidos en cada muestra e indirectamente se obtuvo la cantidad adecuada de $BaCl_2$ a agregar dado que se tiene una relación molar de uno a uno.

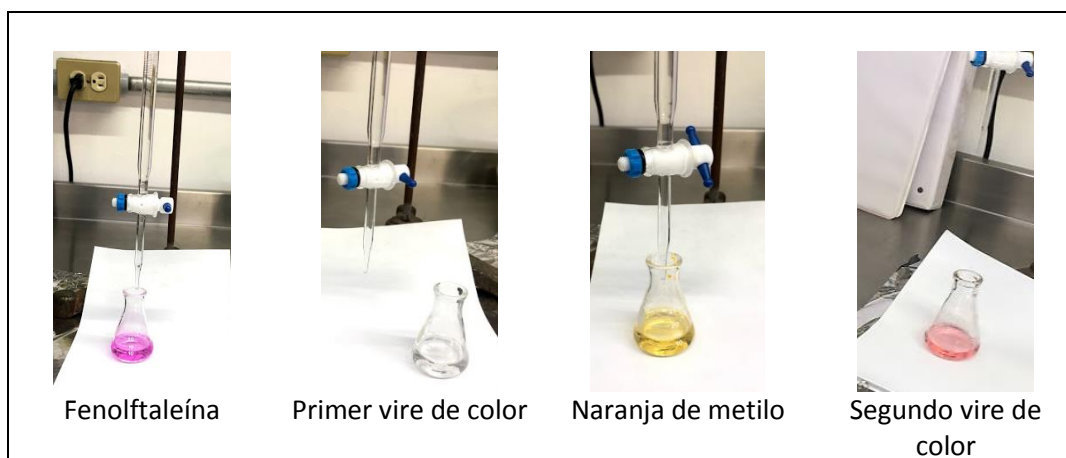


Figura 11. Técnica por colorimetría

Debido a que se determinó la pureza y concentración inicial de la solución KOH empleada, nos fue posible determinar la cantidad de KOH que reacciono mediante la suma de concentración inicial menos concentración final, e indirectamente fue posible conocer la concentración de K_2CO_3 . Únicamente es necesario dividir entre dos la diferencia obtenida entre la concentración inicial y final de KOH (Tabla 4).

Tabla 4. Determinación de K_2CO_3 obtenido para las primeras tres muestras

Concentración KOH inicial	Volumen a titular (ml)	Volumen HCl 0.2 M (ml)			Concentración KOH final	KOH reacción (M)	K_2CO_3 obtenido (M)
		Fenolftaleína	Naranja de metilo	Total			
0.140	10	0.5	0.1	0.6	0.126	0.014	0.007
0.140	10	0.4	0.2	0.6	0.127	0.013	0.007
0.140	8.8	0.5	0.1	0.6	0.132	0.008	0.004

Posteriormente, la muestra se centrifugó para garantizar una buena sedimentación a 4400 rpm por 3 minutos con una centrifuga HERMLE Labnet Z206A (figura 5). Subsecuente a ello, el sobrenadante se decantó y la muestra se trasvaso a viales de vidrio para grafitizar los carbonatos.

Liofilización

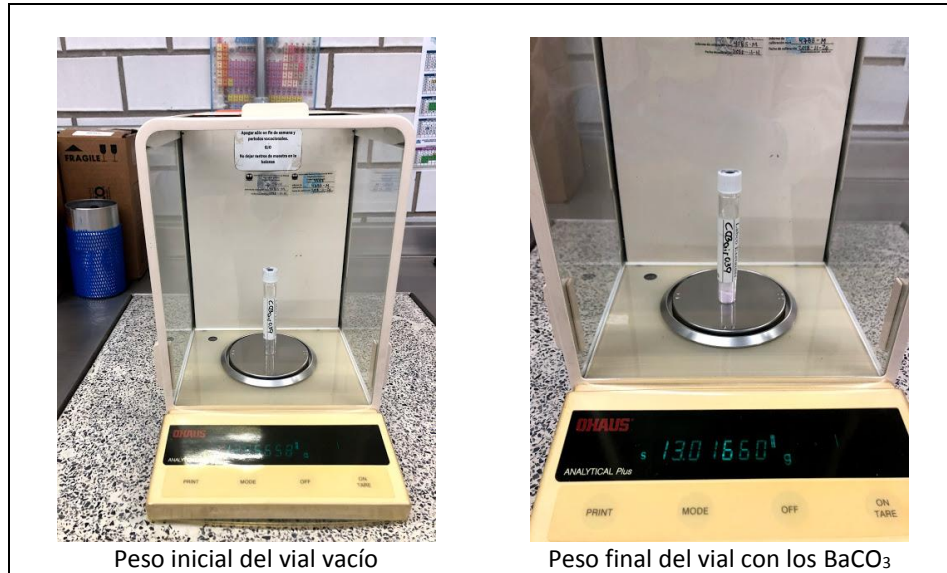
El proceso de liofilización consiste en congelar la muestra para luego sublimar el agua contenida hasta que esta se encuentre totalmente deshidratada, es decir pasar del estado sólido del agua (hielo) a vapor de agua, el cual es extraído del vial a través de una bomba de vacío, esto con el fin de eliminar interferencias y grafitizar la muestra de manera adecuada.

Los viales se congelaron con nitrógeno líquido (Figura 12) y se liofilizaron por 24 horas en un sistema de liofilización LABCONCO (figura 12), consiguiendo así, carbonatos de bario (BaCO_3).



Figura 12. A la izquierda centrifuga HERMLE Labnet Z206A, al centro viales sumergidos en nitrógeno líquido y a la derecha el sistema de liofilización LABCONCO.

Una vez que el vial sale de la liofilizadora se espera que contenga únicamente BaCO_3 , por lo que la masa de los BaCO_3 obtenidos se determina haciendo un análisis gravimétrico (Tabla 5). Los viales para grafitizar son marcados para identificar las muestras, Se pesan antes de emplearse en el proceso, a continuación, se incorpora la muestra decantada, para efectuar el proceso de liofilización, al final son nuevamente pesados (Figura 13).



Peso inicial del vial vacío

Peso final del vial con los BaCO₃

Figura 13. Masa del vial antes y después de la liofilización.

Tabla 5. Masa BaCO₃ obtenida para la muestra C03air039

Masa vial (g)		Masa BaCO ₃ obtenida (mg)
Antes de liofilizar	Después de liofilizar	
12.95658	13.0166	60.02

Una vez que se obtuvo la masa en (mg) de BaCO₃ en cada muestra, se cuantifico la cantidad de mg de C utilizando la ecuación 8.

Masa molar:

BaCO₃= 197.34 g/mol

C= 12.0107 g/mol

$$\text{fracción C en BaCO}_3 = \frac{12.0107 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{197.34 \text{ g/mol}} = 0.0608$$

$$\text{mg C} = \text{mg BaCO}_3 \times 0.0608 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Para contaminantes en gases la unidad más habitual de medida para concentraciones son las partes por millón, se refiere a la cantidad de unidades de la sustancia estudiada en cada millón de unidades de todo el conjunto. Para poder comparar los resultados obtenidos con los datos reportados por la REMA (Figura 25) para concentración de CO se implementó la ecuación 9, los resultados en ppm se muestran en la figura 26.

$$\text{ppm C} = \frac{g \text{ C}}{g \text{ C} + g \text{ disolvente}} \times 10^6 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Grafitización de los CO_3^{2-} de las muestras

En este trabajo el proceso denominado de grafitización se lleva a cabo en dos pasos de acuerdo con las ecuaciones 4 y 5. El carbonato de bario BaCO_3 es oxidado hasta CO_2 y posteriormente mediante una reducción catalítica se convierte en grafito con ayuda del equipo de manejo de carbonatos Ion Plus. Para garantizar una atmósfera libre de agentes que pudieran alterar el contenido de CO_2 de la muestra, el proceso se inicia remplazando el aire contenido en los viales por helio (Figura 14). A continuación, se procedió a inyectar un ml de ácido ortofosfórico (H_3PO_4), permitiendo la reacción de la muestra por aprox. 10 min a 70°C para liberar CO_2 en estado gaseoso proveniente del BaCO_3 (Ecuación 10).

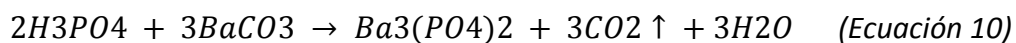
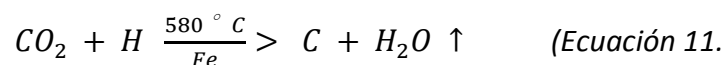


Figura 14. Inyección para intercambio de atmósfera de los viales

Por otra parte, para llevar a cabo la reacción mostrada en la ecuación 5 es importante acondicionar el catalizador de Fe elemental (hierro Alfa Aesar 325) para lo cual, se coloca en un tubo Duran en cada reactor, cada tubo es cargado con aprox. 5 mg de hierro, la atmósfera de aire en el tubo se calienta a 500°C por 150 s y luego se reduce con hidrógeno puro a la misma temperatura, esto se hace con la finalidad de remover rastros de C en el material y activar el hierro como reductor.

Enseguida que la reacción de la ecuación 4 y el acondicionamiento de Fe han concluido, el CO_2 es acarreado por un flujo de helio hacia un equipo automatizado de grafitización AGE III, (figura 15), el cual cuenta con una trampa de zeolita X13 que permite adsorber las moléculas de CO_2 , una vez que se llega a 450°C , el CO_2 adsorbido se libera para ser inyectado en los tubos Duran, previamente acondicionados. Los tubos entran en unos hornos

minúsculos que los someten a temperaturas altas (580°C) durante 20 minutos para la obtención de grafito (Ecuación 11).



La ecuación 9, también es conocida como Ecuación de Bosh (Vogel *et al.*, 1984). Para tener muestras de masas similares a 1 mg, es necesario delimitar un valor de presión máximo. El vapor de H₂O es removido de los tupos por un enfriador Peltier (trampa de agua).



Figura 15. A la izquierda el sistema de manejo de carbonatos lon Plus y a la derecha el equipo automatizado de grafitización (AGE III).

Posteriormente, este grafito se preno en un cátodo de aluminio.

Con las primeras muestras grafitizadas se pudo observar que para obtener 1 mg de C al grafitizar BaCO₃ es necesario ingresar viales con aprox. 23 mg de BaCO₃ (Tabla 6). Sin embargo, para algunas muestras la masa de BaCO₃ obtenida era bastante mayor (Tabla 7).

Ingresar un exceso considerable de masa a un reactor implicaba un gran riesgo pues al mantener constante el volumen y la temperatura de reacción se genera un incremento considerable de presión debido al exceso de CO₂ en los tubos del AGE III durante la grafitización que concluye con la pérdida de la muestra procesada.

Una muestra de aprox. 1 mg de C es obtenida después de grafitizar de 23 a 28 mg de BaCO₃. Una muestra de estas características se recolecta al burbujear aire en una solución KOH durante 30-40 min, incluso 45 min si se desea garantizar obtener la masa mínima, esto debido a las variaciones en la concentración de CO₂ atmosférico. De algunas muestras

recolectadas se obtuvo menos 1 mg, 0.619 mg para la de menor masa y aunque fue posible determinar su fM, no se recomienda hacer AMS con masas inferiores.

Por lo que fue necesario dividir la masa de BaCO₃ que en dos viales para no perder las muestras de los días que a su vez eran considerados los días objetivo de la investigación por la gran cantidad de CO₂ atmosférico y procesar uno únicamente.

Tabla 6. Rendimiento BaCO₃ para obtener C

Masa vial (g)		BaCO ₃ obtenida (mg)	Masa C esperada	grafitización	
Antes de liofilizar	Después de liofilizar			CO ₂ (mg)	CO ₂ FIN (mg)
12.95395	12.97734	23.39	1.422	1.059	1.013
13.06151	13.08301	21.5	1.307	1.178	1.005
13.16008	13.17363	13.55	0.824	0.861	0.861
13.01627	13.0393	23.03	1.400	1.392	1.003
13.04043	13.06268	22.25	1.353	1.188	1.015

Tabla 7. Masa C esperada para la muestra C03air039

Masa vial (g)		Masa BaCO ₃ obtenida (mg)	Masa C esperada
Antes de liofilizar	Después de liofilizar		
12.95658	13.0166	60.02	3.649

Se grafitizaron exclusivamente las muestras que ingresarían al acelerador, 34 muestras fueron las que se consideraron como representativas (Figura 16).

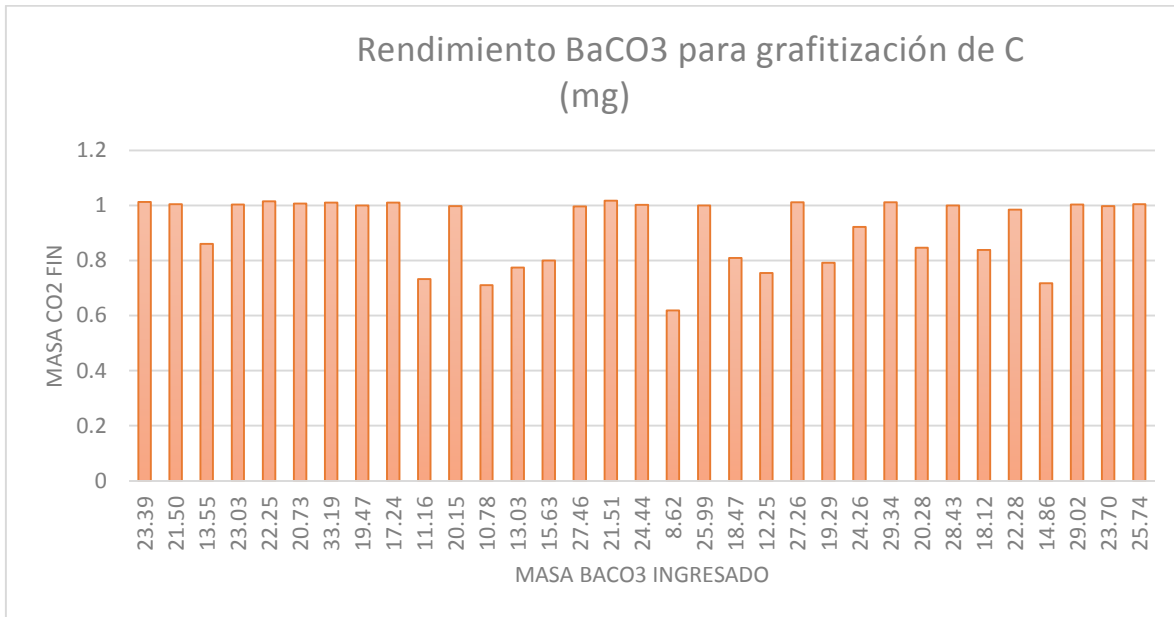


Figura 16. Rendimiento de las muestras para obtención de C

Una vez que se conoce la cantidad de mg de C capturados en cada muestra es posible determinar la concentración en partes por millón (ppm), para ello se emplea la ecuación 12.

$$ppm = \frac{g \text{ soluto}}{g \text{ soluto} + mL \text{ solución}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Resultados

Las concentraciones de K_2CO_3 obtenidas durante la titulación se muestran en la figura 17 y la tabla 8 en función de la fecha. Estas concentraciones se determinaron de acuerdo con lo reportado en la tabla 4 de la sección extracción de carbonato sólido de las muestras atmosféricas, y están estequiométricamente relacionadas con el CO_2 atmosférico capturado. En la figura 17 se pueden apreciar claramente dos picos que coinciden con dos de los días objetivo, la mañana después del día del Virgen (13 de diciembre) en la cual se captaron 0.016 M de C y la mañana de navidad (25 de diciembre) 0.017 M de C, siendo estas fechas destacadas por su incremento en la quema de biomasa tal como ocurre en fogatas y fogones, pero sobre todo por la quema de pirotecnia durante las celebraciones. El punto mínimo se reportó la mañana del 16 de diciembre pues se captó únicamente 0.001 M.

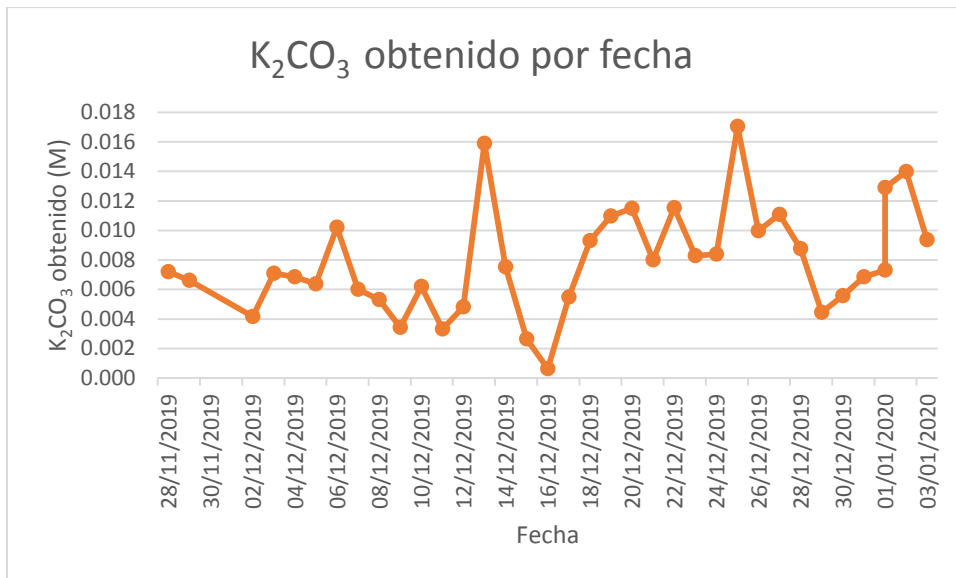


Figura 17. Variación del K_2CO_3 obtenido por fecha durante el muestreo

Tabla 8. Cantidad de M de K₂CO₃ obtenidos diariamente a las 8:00 h

Fecha	K ₂ CO ₃
28/11/2019	0.007 M
29/11/2019	0.007 M
02/12/2019	0.004 M
03/12/2019	0.007 M
04/12/2019	0.007 M
05/12/2019	0.006 M
06/12/2019	0.010 M
07/12/2019	0.006 M
08/12/2019	0.005 M
09/12/2019	0.003 M
10/12/2019	0.006 M
11/12/2019	0.003 M
11/12/2019	0.004 M
12/12/2019	0.005 M
13/12/2019	0.016 M
14/12/2019	0.008 M
15/12/2019	0.003 M
16/12/2019	0.001 M
17/12/2019	0.005 M
18/12/2019	0.009 M
19/12/2019	0.011 M
20/12/2019	0.011 M
21/12/2019	0.008 M
22/12/2019	0.012 M
23/12/2019	0.008 M
24/12/2019	0.008 M
25/12/2019	0.017 M
26/12/2019	0.010 M
27/12/2019	0.011 M
28/12/2019	0.009 M
29/12/2019	0.004 M
30/12/2019	0.006 M
31/12/2019	0.007 M
01/01/2020	0.007 M
02/01/2020	0.014 M
03/01/2020	0.009 M

Para las concentraciones de BaCO₃ se observó el mismo comportamiento que para las concentraciones de K₂CO₃ (figura 18). Esto debido a que se trata de la misma muestra para cada caso, solo se somete a un intercambio iónico para obtener un precipitado y a un

proceso de liofilización, la masa de C no se modifica, solo se hace un cambio de unidades, se pasa de M a mg.



Figura 18. Variación del BaCO₃ obtenido por fecha durante el muestreo

La figura 19 muestra la concentración calculada para el CO₂ en ppm. La concentración máxima observada fue de 673 ppm para la mañana de navidad (25 de diciembre del 2019), mientras que el punto mínimo fue equivalente a 25 ppm para la mañana de 16 de diciembre del 2019. Las noches que se obtuvieron las mayores concentraciones de ppm de CO₂, fueron el 12 de diciembre (Día de la virgen de Guadalupe) y el 24 de diciembre (noche de celebración de navidad o Nochebuena). El día 24 de diciembre se nota un incremento bastante notorio entre la concentración de ppm alcanzada por la noche y la registrada por la mañana, la noche del 31 de diciembre (celebración del año nuevo) la concentración de ppm es mayor al 11 de diciembre y 01 de enero del 2020 fechas sin celebraciones culturales.

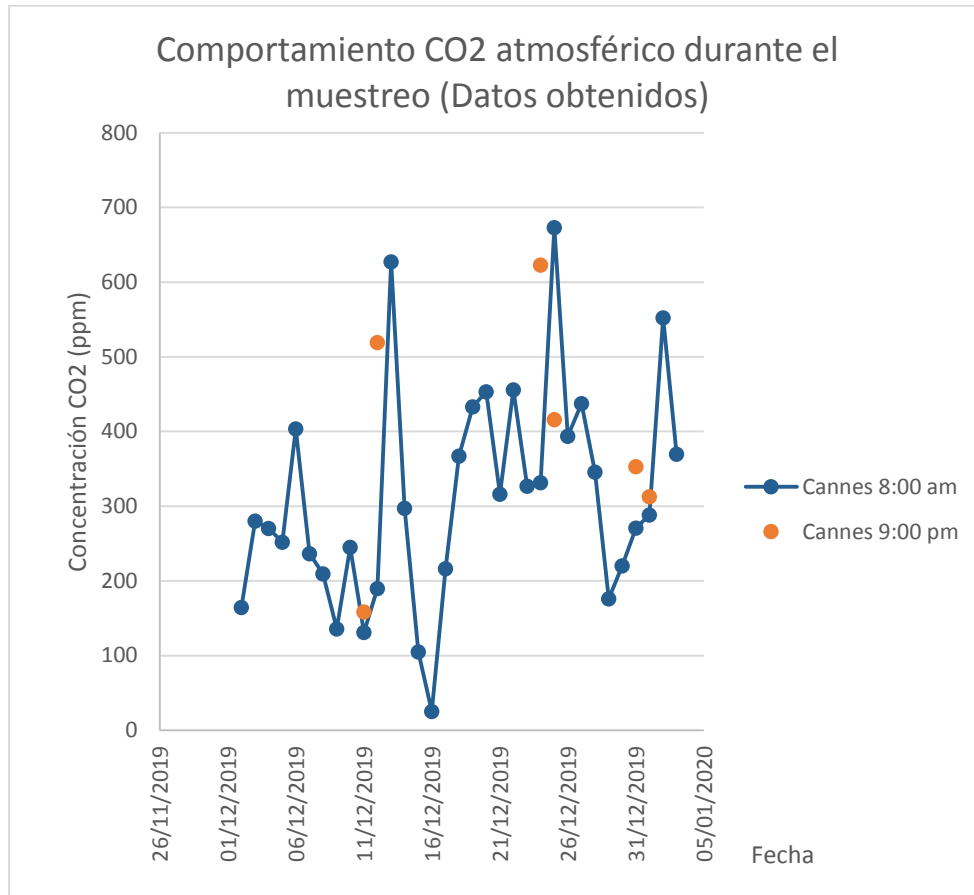


Figura 19. Resultados de concentración CO₂. Estación Cannes

Los resultados de la medición de ¹⁴C se reportan en la figura 20, como fracción de carbono moderno (fM). Los picos corresponden a los días con mayor quema de biomasa, mientras que los puntos mínimos se obtienen los días con mayor actividad del transporte o uso de combustibles fósiles. Se observa un aumento progresivo hacia el final del periodo de colecta, debido probablemente a la acumulación de CO₂ de origen biogénico. El punto máximo se alcanzó la mañana del 01 de enero del 2020.

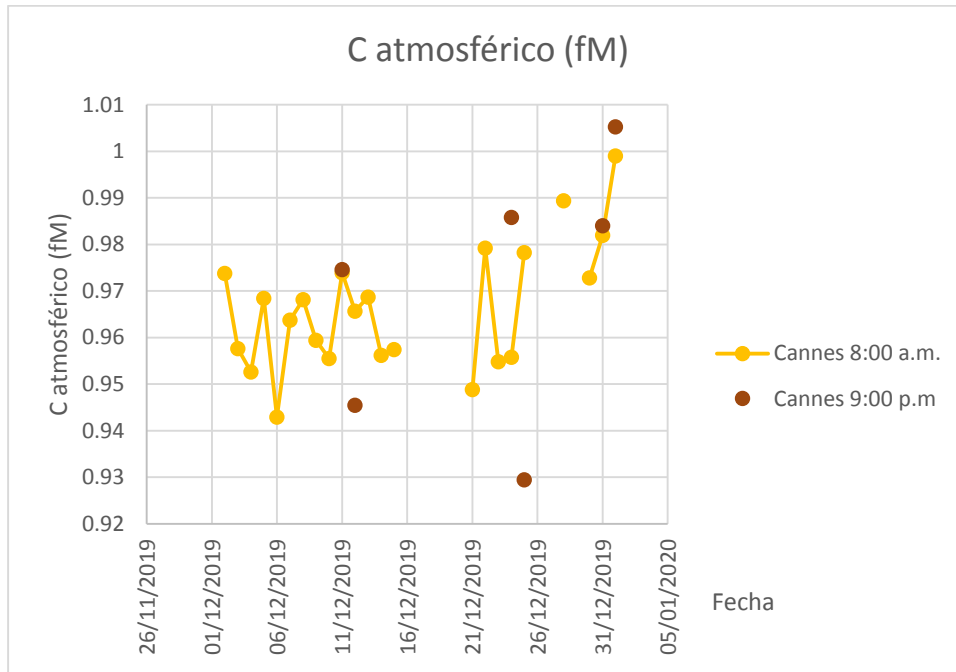


Figura 20. Variación del valor de fM del CO₂ atmosférico en función del día de muestreo entre el 26 de noviembre y el 1° de enero

Dado que el CO₂ en la atmósfera es una mezcla de CO₂ con carbono moderno y fósil, la fM representa la fracción de carbono moderno, si se conoce el valor de fM, es posible determinar de manera directa la fracción de carbono fósil (ecuación 13).

$$\text{CO}_2 \text{ fósil} = 1 - \text{CO}_2 \text{ moderno} \quad \text{Ecuación 13}$$

Los resultados de ¹⁴C también suelen reportarse como Δ¹⁴C, esta delta representa la diferencia entre la concentración de ¹⁴C atmosférico durante la toma de muestra y el valor de ¹⁴C en la atmósfera terrestre que había en 1950 (año en el que el valor de Δ¹⁴C=0). La variación de Δ¹⁴C después de 1950 alcanzó un máximo valor hacia 1963. Desde entonces el contenido de radiocarbono en la atmósfera ha ido decreciendo. Este hecho es conocido como el "pico de la bomba" y ocurrió durante la Guerra Fría, pues los ensayos nucleares favorecieron las condiciones para la producción de ¹⁴C en la atmósfera (Gómez *et al.*, 2018). Los resultados de esta investigación arrojaron valores negativos de Δ¹⁴C para todas las muestras procesadas tal como se muestra en la figura 21. Esto significa que el contenido de radiocarbono en la atmósfera ha decrecido hasta los niveles que había antes de 1950, pero en 2020, los valores de Δ¹⁴C pasaron de positivos a negativos, este punto, donde los valores de Δ¹⁴C van de positivo a negativo, indica una transición donde el CO₂ derivado de combustibles fósiles domina la señal atmosférica de radiocarbono, anteriormente dominado por radiocarbono derivado de bombas. (Sierra, 2018).

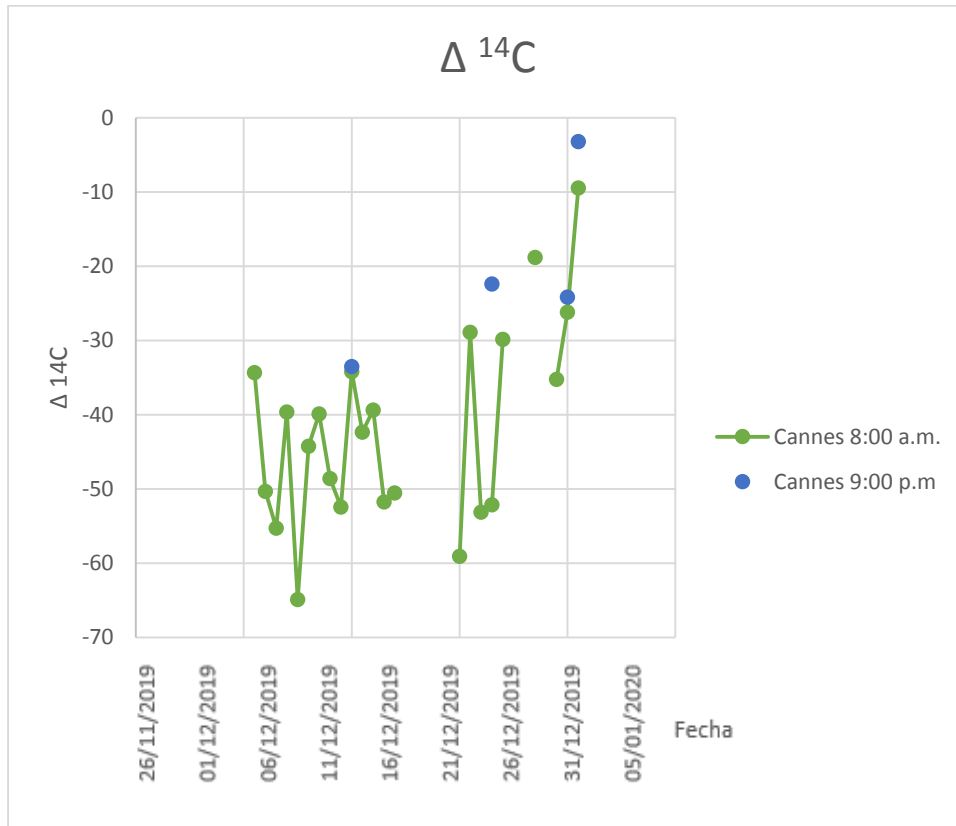


Figura 21. $\Delta^{14}\text{C}$ durante la campaña

Análisis meteorológico

Frecuencia y dirección del viento

Estación IFLEMA

Las dos primeras muestras fueron tomadas en la estación IFLEMA el 28 y 29 de noviembre del 2019 respectivamente, de acuerdo con los datos reportados por la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) Estación Pedregal (PED) (REDMET,2020) estos días predominaron los vientos de 0.5 a 2.1 m/s vientos denominados ventolina de 0.3 a 1.5 m/s y flojito 1.6 a 3.3 m/s de acuerdo con la escala de Beaufort (SEMAR, 2020) con un 80% de frecuencia (Figura 22). Para realizar las graficas se tomaron los datos de la estación mas cercana, siendo esta la Estación Pedregal y se utilizo el programa WRPLOT View (Lakes Environmental, 2018).

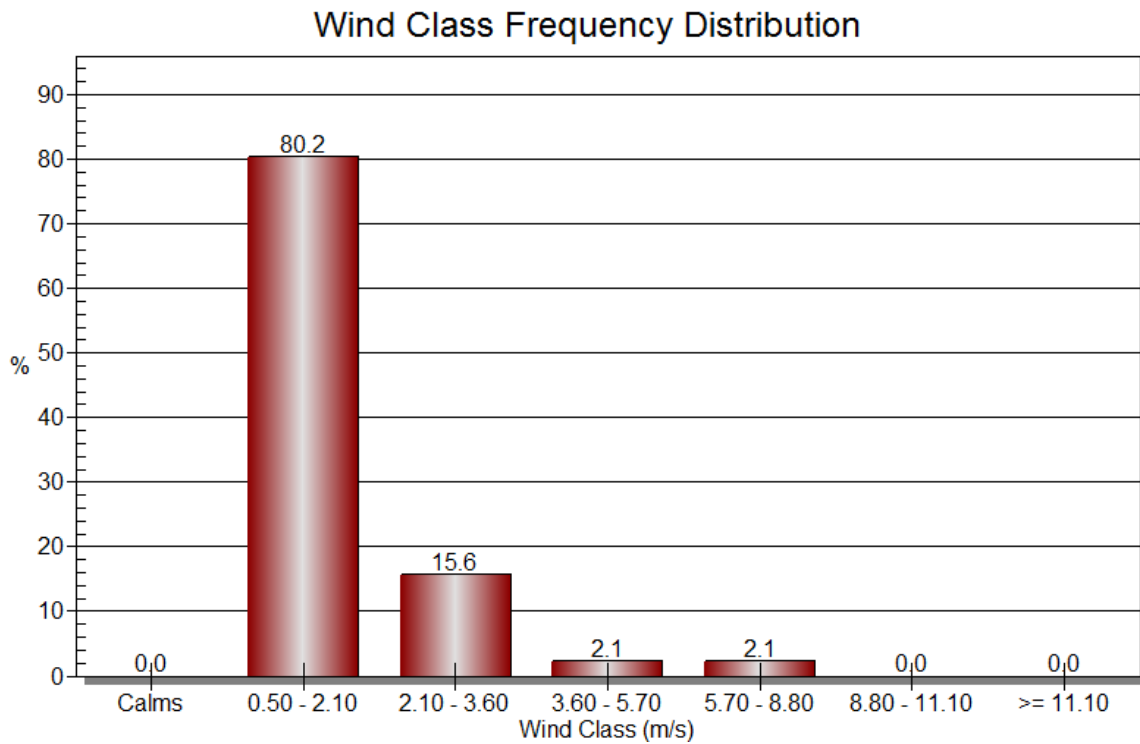


Figura 22. Frecuencia del viento 28-29/11/19 Estación IFLEMA

La rosa de los vientos mostrada en la Figura 23, se construyó con los datos de la REDMET Estación Pedregal (REDMET, 2020) y el programa WRPLOT View (Lakes Environmental, 2018), en esta se puede apreciar que los vientos más fuertes de 2.1 a 8.8 m/s se recibieron de la dirección sur suroeste (SSO).

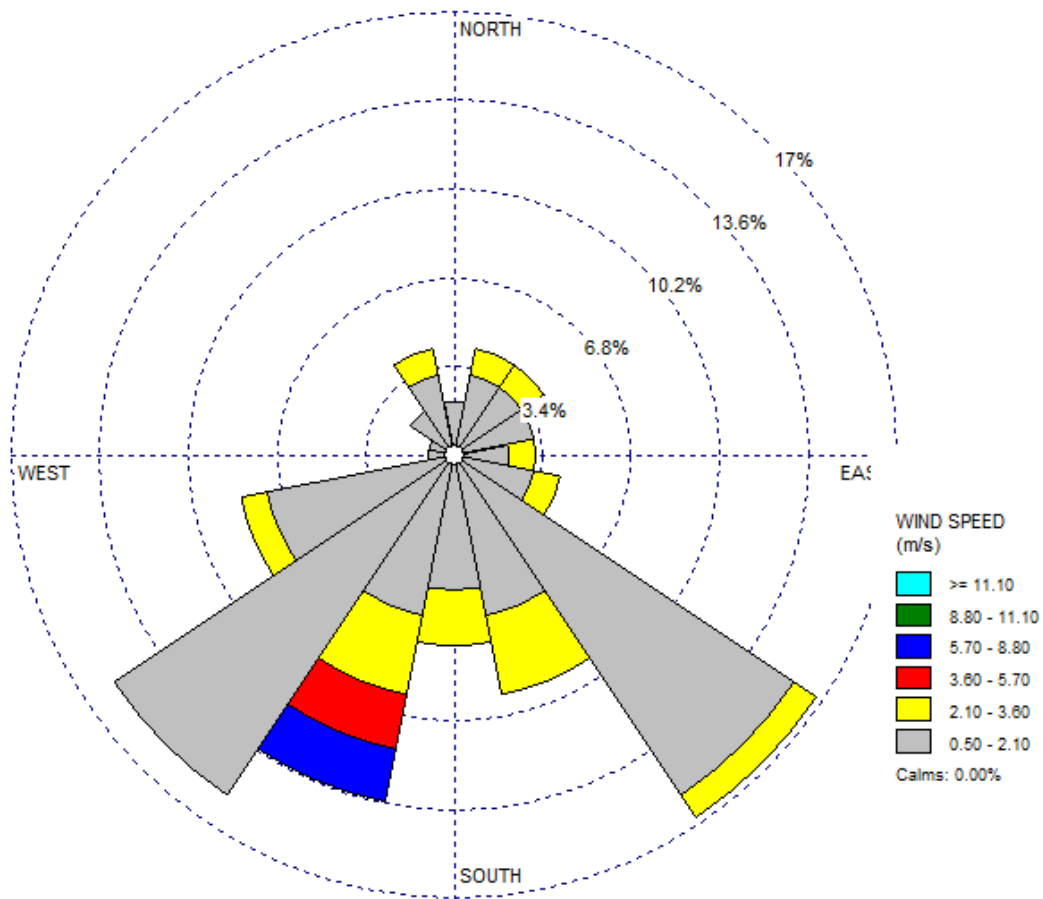


Figura 23. Rosa de los vientos 28-29/11/19 Estación IFLEMA

Estación Cannes

La Estación Cannes se encuentra a aprox. 2.6 km de la Estación UAM Xochimilco (UAX) de la REDMET por lo que se utilizaron los datos reportados de dicha estación (REDMET, 2020). La campaña de monitoreo inicio el 2 de diciembre del 2019 y concluyo el 3 de enero del 2020. Durante este lapso predominaron los vientos de entre 0.5 a 2.1 m/s con un 70.8% de frecuencia, le siguieron los vientos de entre 2.1 a 3.6 m/s con un 19.1% de frecuencia (Figura 25), los vientos fueron de ventolina, flojito, flojo, bonancible- moderado hasta fresquito de acuerdo con la escala de Beaufort (SEMAR, 2020). Los vientos corrieron principalmente de las direcciones sureste y sur sureste (Figura 24).

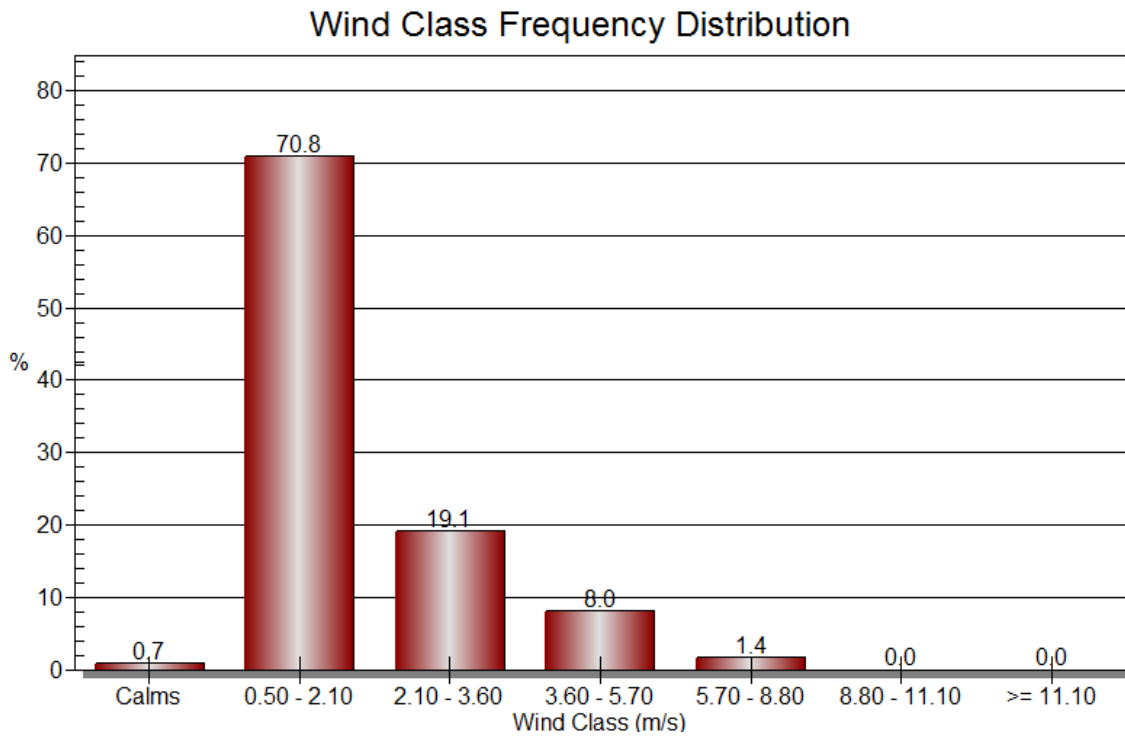


Figura 24. Frecuencia del viento 02/12/19-03/01/20 Estación Cannes

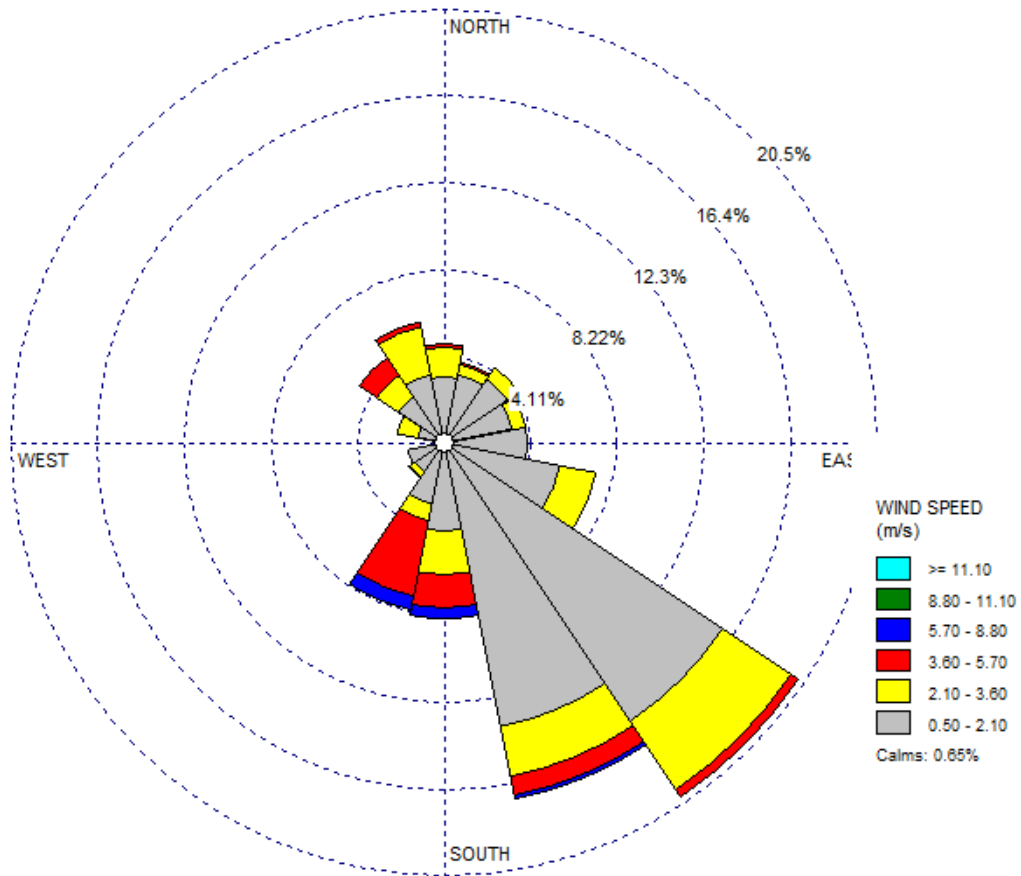


Figura 25. Rosa de los vientos 02/12/19-03/01/20 Estación Cannes

Humedad relativa y temperatura

Estación IFLEMA

Del reporte de la REDMET para la Estación PED (REDMET,2020) en cuanto a la humedad relativa (Figura 26), el punto más alto se alcanzó entre las 8:00 y 9:00 h, mientras que con la temperatura (Figura 27) pasa lo contrario pues el punto más bajo se encontró en este mismo lapso, se puede deducir que la humedad es inversamente proporcional a la temperatura. A menor temperatura, mayor porcentaje de humedad relativa.

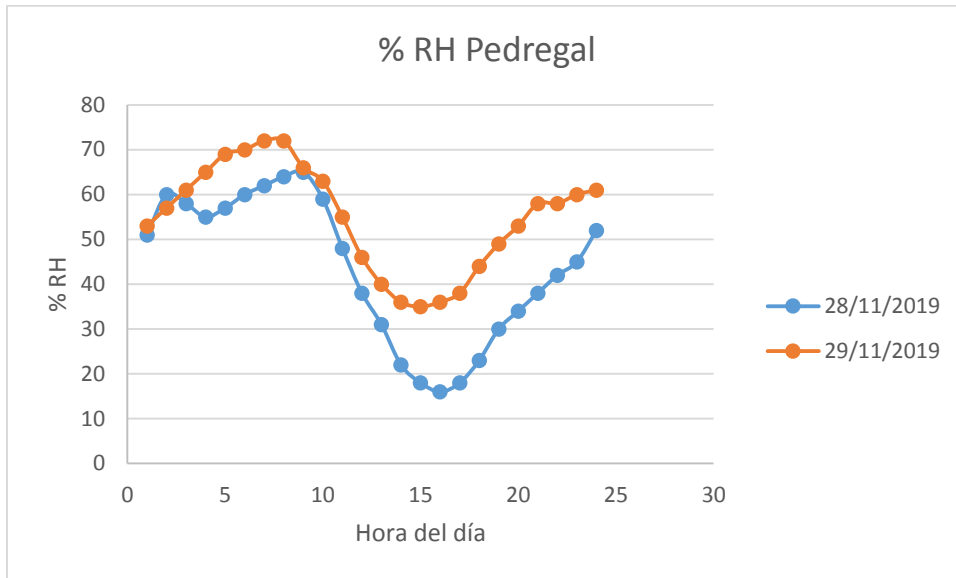


Figura 26. Porcentaje de humedad relativa 28-29/11/19 Estación IFLEMA

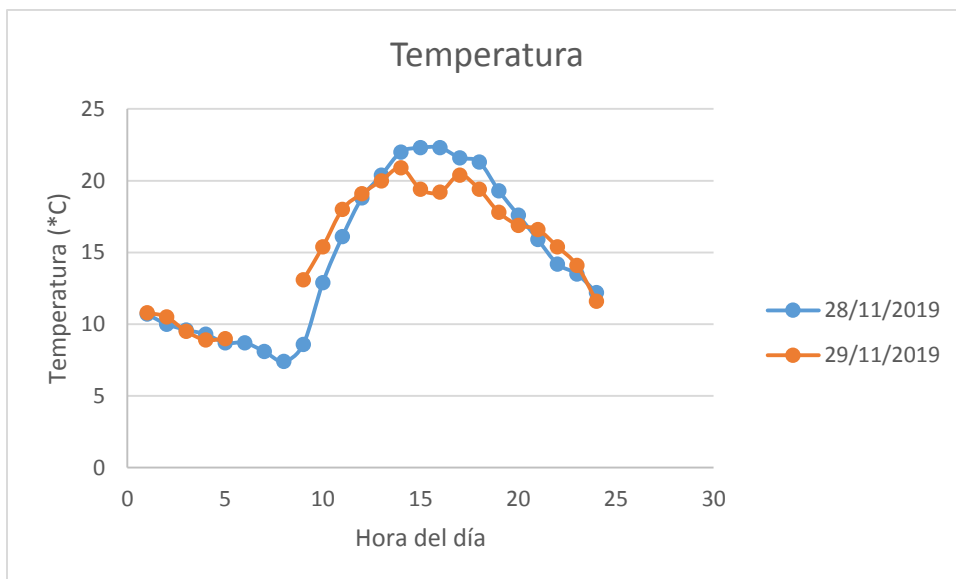


Figura 27. Temperatura 28-29/11/19 Estación IFLEMA

Estación Cannes

Del reporte de la REDMET para la Estación UAX (REDMET,2020) y como se observa en las figuras 28 y 29, al igual que ocurrió en la Estación IFLEMA, se puede deducir que a menor temperatura, mayor porcentaje de humedad relativa.

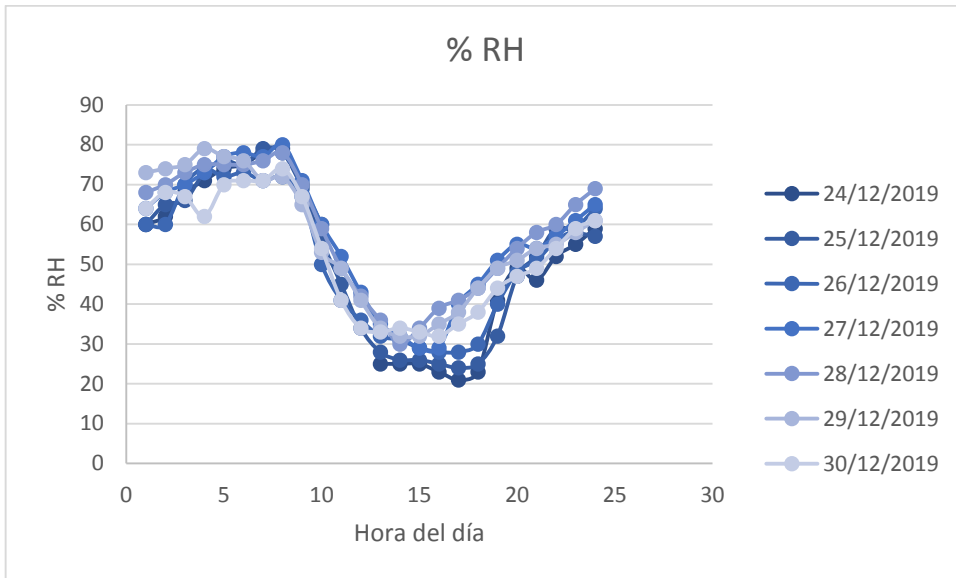


Figura 28. Porcentaje de humedad relativa 24-30/12/19 Estación Cannes

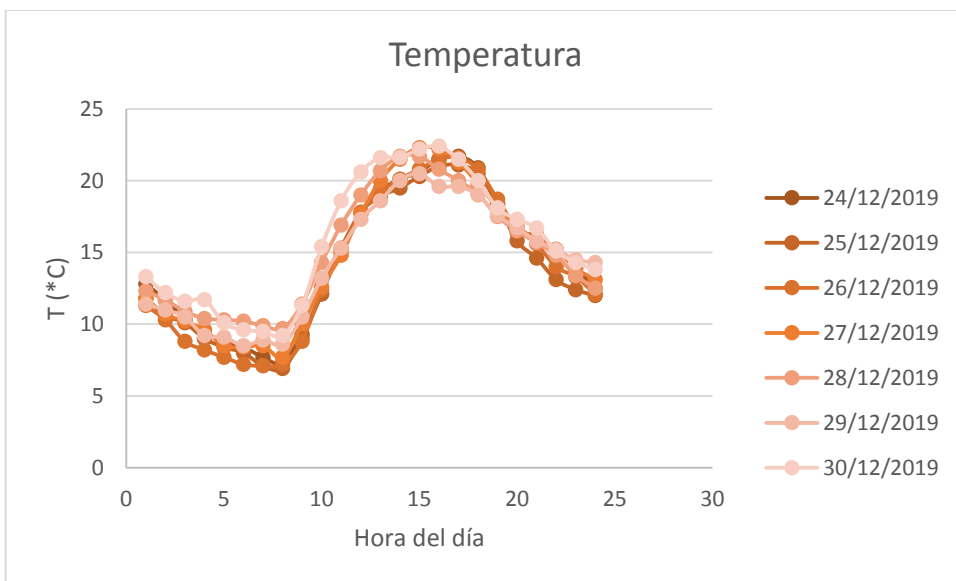


Figura 29. Temperatura 24-30/12/19 Estación Cannes

Análisis de otros contaminantes atmosféricos

Monóxido de carbono

La principal fuente de emisión de CO se da como resultado de una combustión incompleta en los motores de combustión interna, los cuales utilizan gasolina. Debido a la naturaleza fósil de estos combustibles no encontramos ^{14}C en estas emisiones.

En la figura 30 se aprecian las concentraciones de CO atmosférico en ppm reportadas por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en la estación UAX (RAMA, 2020), el

comportamiento del CO generalmente se relaciona más con el comportamiento del sector transporte (UCSUSA, 2017).

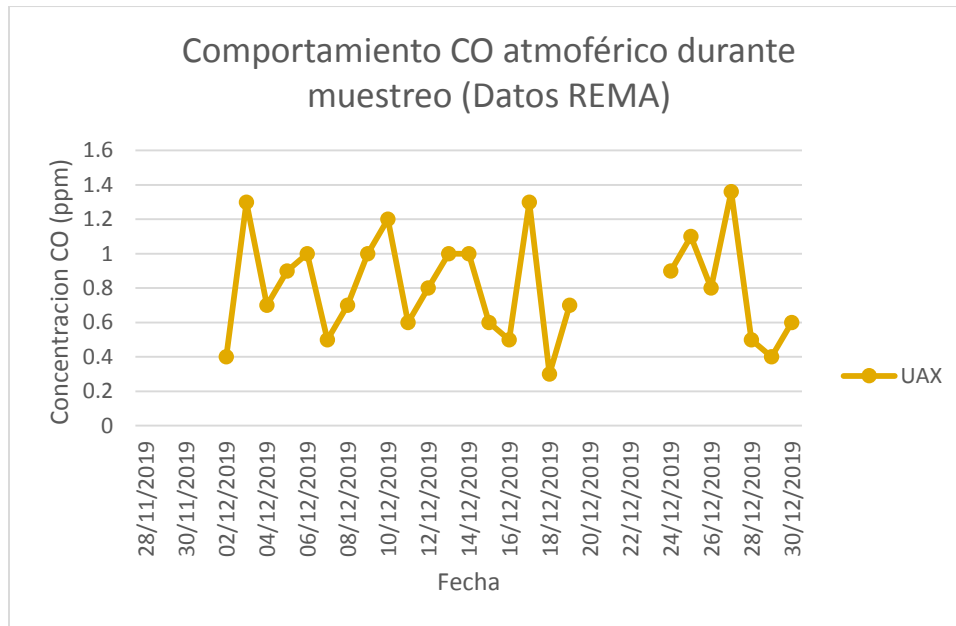


Figura 30. Concentración de CO reportado a las 8:00 h por la Estación UAX-REMA.

Materia Particulada

Se llama materia particulada (PM) a toda partícula suspendida en el aire pudiendo ser polen, polvo, productos de la combustión, etc. Las partículas tienen una gran variedad de tamaños por lo que se clasifican en función de su diámetro aerodinámico las PM_{10} son partículas con un diámetro aerodinámico menor a 10 micras y las $PM_{2.5}$ son partículas finas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras.

En la figura 31 se aprecian las concentraciones de $PM_{2.5}$ en partes por millón (ppm) reportadas por la REMA en la estación UAX durante el lapso de muestreo, en la figura se puede apreciar que el punto máximo fue reportado la mañana de navidad, esto fue debido en gran parte a la quema de fuegos artificiales.

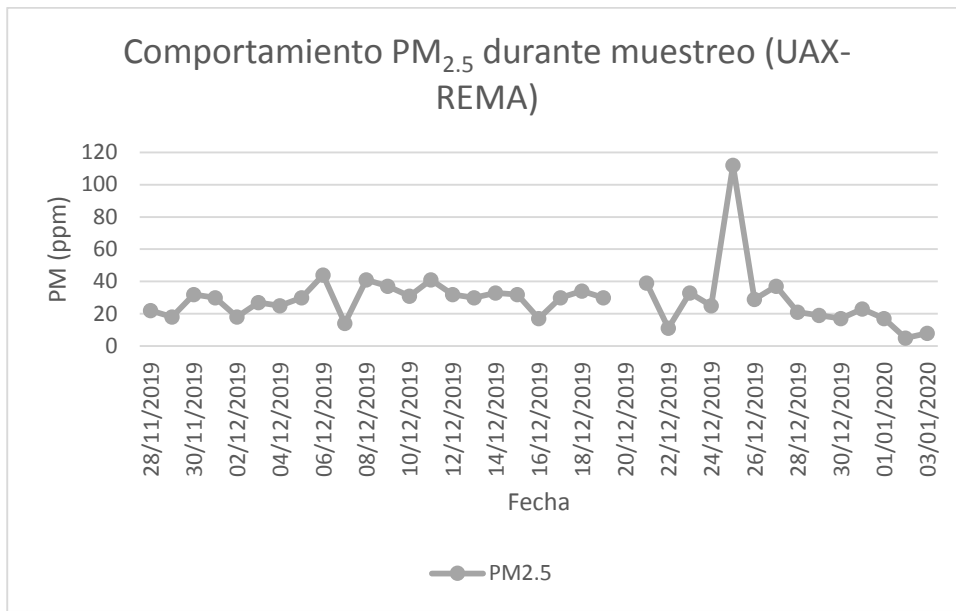


Figura 31. Concentración de PM2.5 reportado a las 8:00 h por la Estación UAX-REMA.

En la figura 32 se muestra el comportamiento tanto para PM₁₀ (línea gris) y PM_{2.5} (línea azul) reportado por la estación PED de la RAMA, en ella el punto máximo de ambas curvas se observa la mañana del 18 de diciembre del 2019,

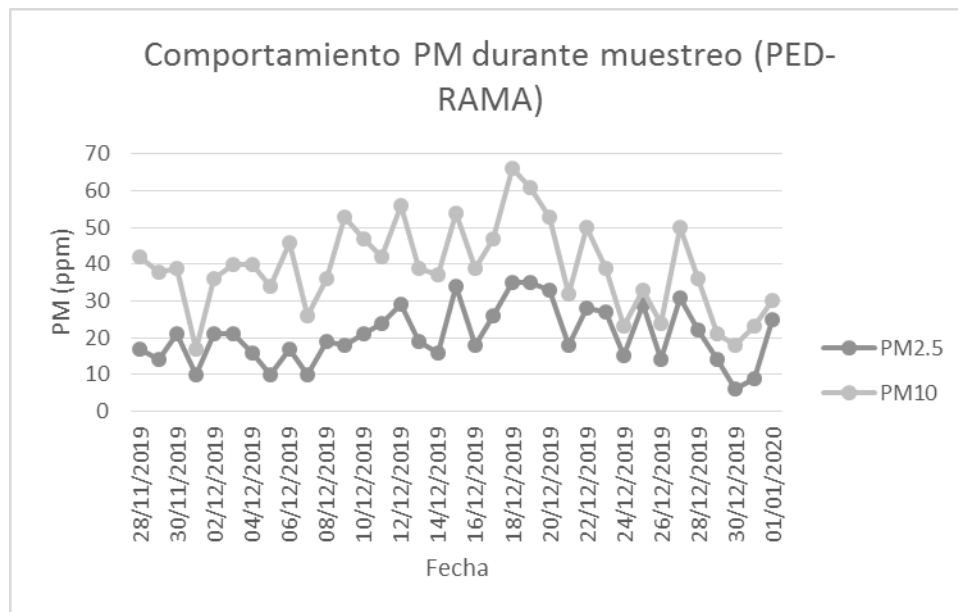


Figura 32. Concentración de PM2.5 y PM10 reportado a las 8:00 h por la Estación PED-REMA.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) anunció que durante la noche del 24 de diciembre del 2019, se alcanzaron 155 puntos en índice IMECA para PM_{2.5}, el índice IMECA es un sistema de categorías creado para simplificar la interpretación de la calidad del aire en la población del Valle de México (figura 33). Cuando se supera los 100 puntos de algún contaminante se considera fases preventivas de contingencia ambiental para tomar

medidas para proteger el bienestar de la ciudadanía 155 puntos corresponde a una calidad muy mala del aire, incluso dañina a la salud (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018), debido a esto la mañana del 25 de diciembre del 2019 se activó la fase preventiva de contingencia ambiental a causa de las altas concentraciones de PM_{2.5} consecuencia de emisiones extraordinarias generadas principalmente por la quema de juegos pirotécnicos, fogatas y quemas de otros materiales (Infobae, 2019).

Categoría	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
BUENA	0-50	Sin riesgo	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR	51-100	Aceptable	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
EXTREMADAMENTE MALA	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

Figura 33. Índice IMECA. Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018.

Análisis de resultados

El incremento de la fM en el CO₂ en la CDMX en su mayoría es debido al uso de madera como combustible en fogatas, estufas y fogones no solo en las zonas marginadas de la ciudad, sino también en las provincias aleñas, la respiración de la flora en las áreas verdes de la ciudad y los bosques de la periferia, así como de los incendios forestales y urbanos que ocurren eventualmente (SEDEMA, 2018).

La dirección y velocidad del viento son un factor determinante al estudiar el origen y destino de muchos contaminantes como en este caso fue el CO₂, se puede observar en la siguiente figura 34 el comportamiento cercano entre la fracción moderna de ¹⁴C y la velocidad del viento cerca del sitio de monitoreo, cuando se examina atentamente si fM se incrementa, o decrece, la velocidad del viento también se incrementa, o decrece. Excepto en los días festivos donde se advierte un comportamiento diferente al de la velocidad del viento, durante esos días se incrementa la fM. Para finales de diciembre, época de vacaciones cuando las emisiones vehiculares decrecen aumenta la fM (SEDEMA, 2018). Adicionalmente

la meteorología cambia observándose un decaimiento de la velocidad del aire y un distanciamiento entre las dos curvas.

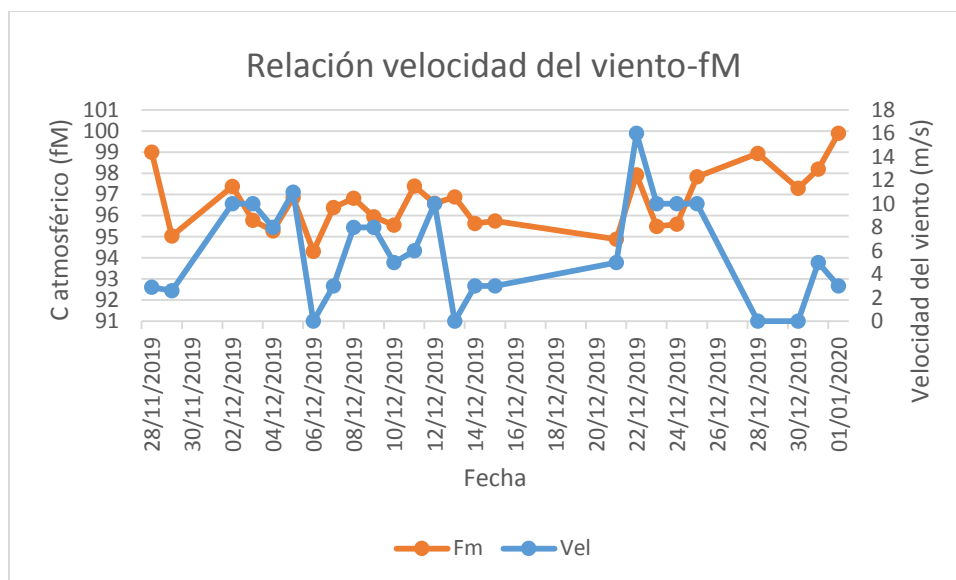


Figura 34. Relación velocidad del viento-fM

En las gráficas mostradas en el apartado de resultados se puede observar que el primer pico inicia la mañana del 12 de diciembre, continua ésta tendencia de incremento en las emisiones de CO₂ la noche del mismo día y tiene su punto más alto la mañana del 13 de diciembre, esto es debido a que anualmente llegan a la CDMX millones de personas procedentes de todas las provincias del país a festejar el "Día de la Virgen", en esta celebración los feligreses y queman una gran cantidad de fuegos artificiales a lo largo del día por lo que se esperaba este incremento en la concentración de CO₂, durante estos días como se puede apreciar en las figuras 35 y 36 los vientos en su mayoría fueron de calma y ventolina menores a 2.1 m/s, con dirección sureste en predominancia. El viento no tuvo una velocidad capaz de dispersar las partículas de CO₂ emitidas, por lo que el punto máximo alcanzo las 627 ppm. No obstante, cabe destacar que la fM y la $\Delta^{14}\text{C}$ se mantuvieron dentro del promedio observado, con un incremento al final del muestreo. Esto puede deberse a una dilución del ¹⁴C por el ¹³C proveniente de emisiones en el transporte, pues como se mencionaba anteriormente hay gran cantidad de traslados a la ciudad.

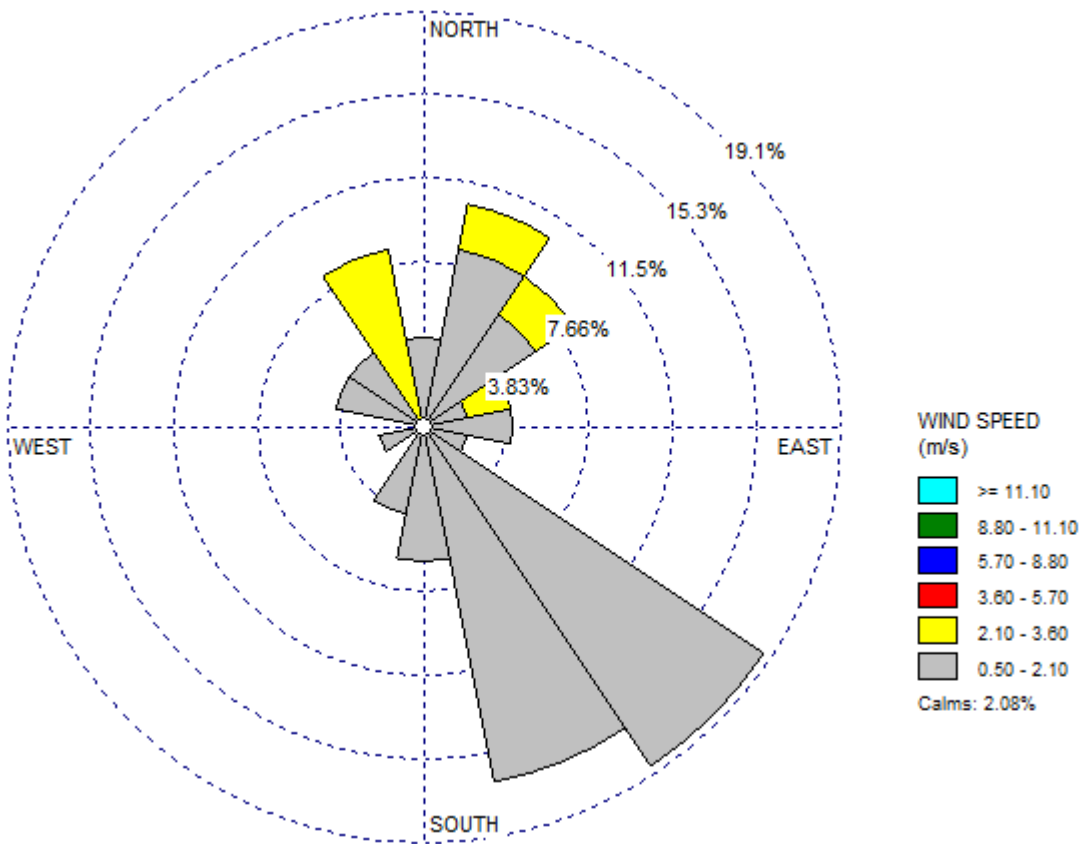


Figura 35. Rosa del viento 12/12/19-13/12/19 Estación Cannes

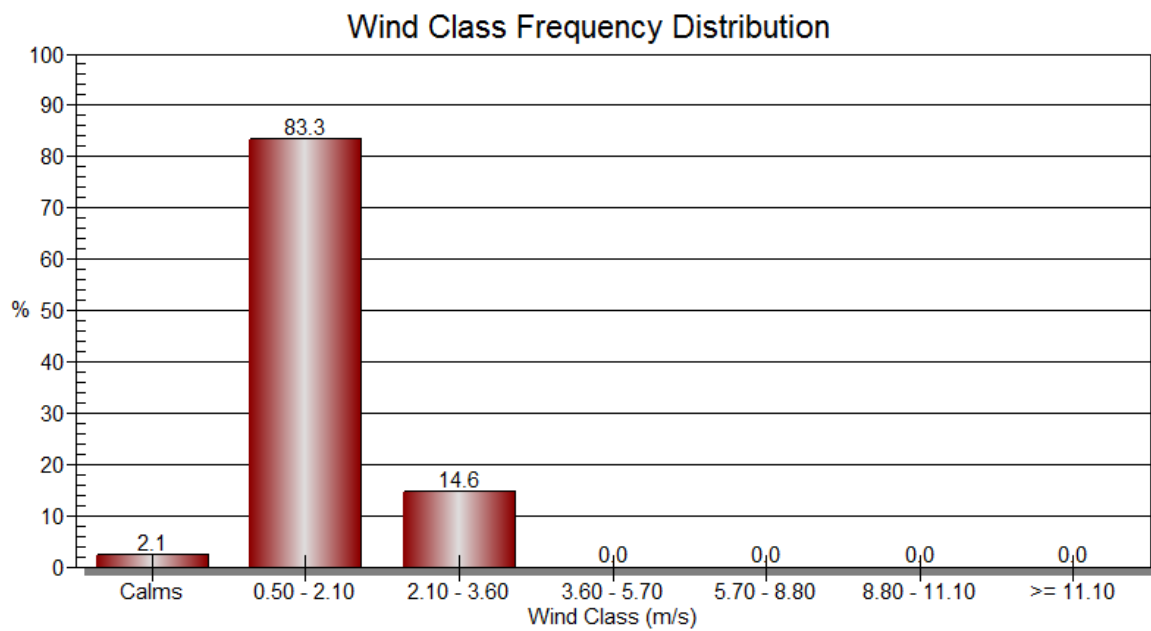


Figura 36. Frecuencia del viento 12/12/19-13/12/19 Estación Cannes

La concentración de CO₂ fue disminuyendo con el paso de los días hasta alcanzar su punto más bajo el día 16 de diciembre.

La mañana del 22 de diciembre ocurrió un incendio en el mercado de San Cosme ubicado en el centro de la ciudad, duró aprox. cuatro horas y ocurrió durante la toma de muestra, pese a que menos del 10% del viento provino del noroeste (del incendio), si fue el viento que presentó mayor velocidad, viento flojito de entre 2.2 y 3.6 m/s (figuras 37). Lo que ocasionó una concentración de 455 ppm de CO₂ y una $\Delta^{14}\text{C}$ similar a la alcanzada la mañana de navidad.

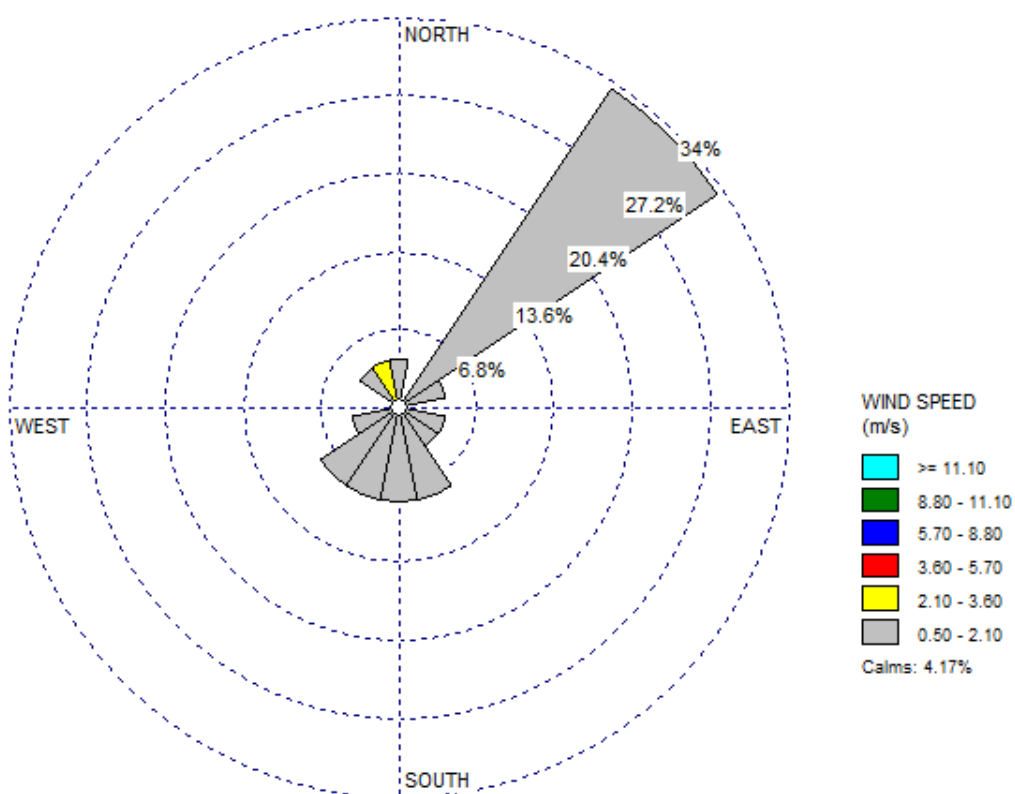


Figura 37. Rosa del viento 22/12/19 Estación Cannes

La noche del 24 de diciembre inicia la celebración de navidad, se observó un incremento en la concentración de CO₂, fM y $\Delta^{14}\text{C}$ debido al uso de fogatas y fogones, pero sobre todo a la quema de fuegos artificiales. Este año simultáneo a las celebraciones familiares ocurrió un incendio en el mercado de la Merced ubicado en el extremo oriente del centro de la ciudad, esta noche el 24% del viento total corrió de esta dirección hacia la estación de muestreo el 100% de ese viento fue flojito, mientras que el 66.7% del total fue una ventolina (figuras 38 y 39). El viento arrastró parte de las partículas y gases emitidos en el incendio y se registraron 622 ppm de CO₂.

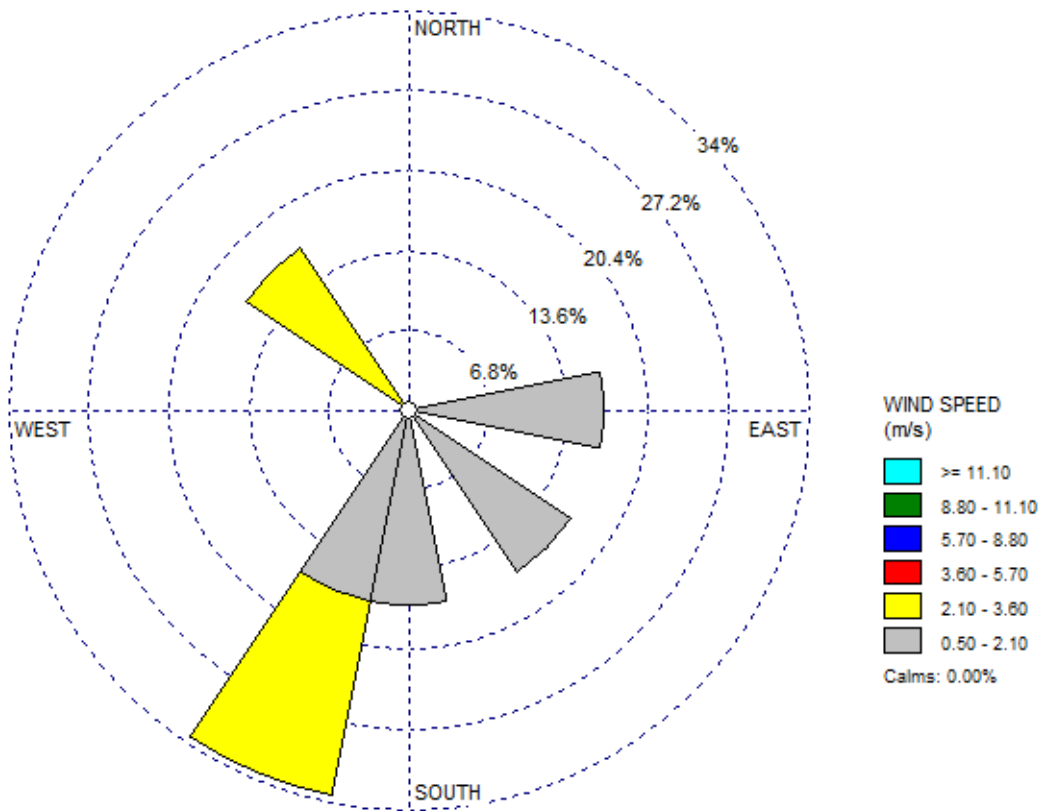


Figura 38. Rosa del viento 24/12/19 Estación Cannes

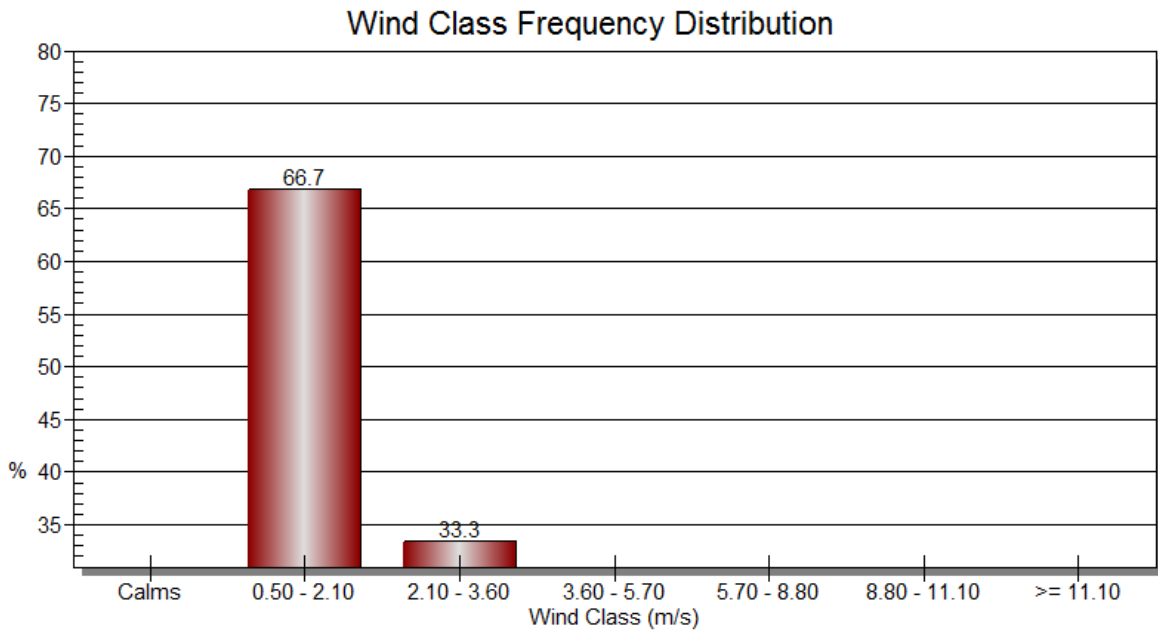


Figura 39. Frecuencia del viento 24/12/19 Estación Cannes

Debido a los sucesos de la noche del 24 de diciembre, y a que el incendio se sofocó hasta la mañana del 25 de diciembre se registró la concentración máxima observada durante el monitoreo, se alcanzaron las 672 ppm de CO₂ y como se mencionó en el análisis de PM_{2.5} fue necesario activar un protocolo de seguridad ciudadana. Como se puede apreciar en la figura 40, este día la mayoría del viento provino del sureste y hubo una predominancia total de ventolina, lo que no ayudó a disipar los contaminantes en la atmósfera de la ciudad.

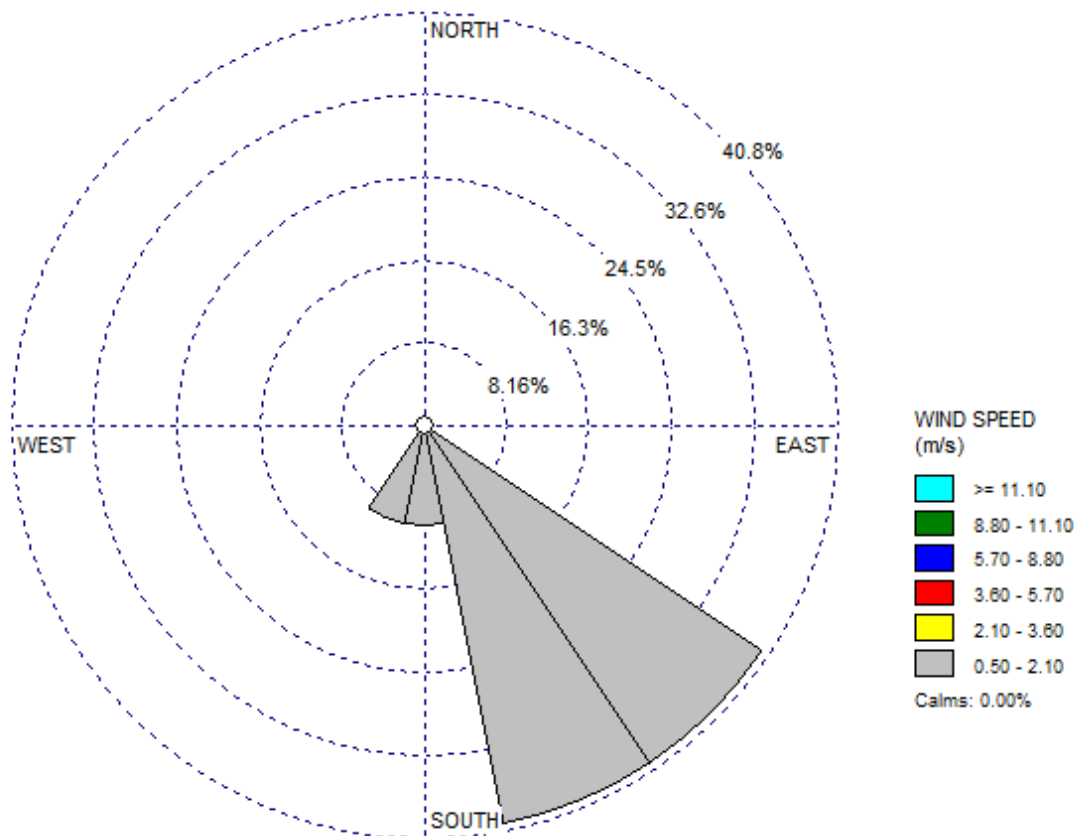


Figura 40. Rosa del viento 25/12/19 Estación Cannes

Contrario a lo que se esperaba la noche 31 de diciembre y la mañana del 1 de enero, y pese a los espectáculos de pirotecnia habituales en esta celebración, los valores de concentración de CO₂ no superaron las 352 ppm, manteniéndose dentro del promedio. Esto debido a que en estos días se presentaron vientos muy fuertes, de hasta 8.8 m/s que alcanzaron la categoría flojito (figura 41) provenientes en su mayoría del sur sureste (figura 42) que contribuyeron a dispersar y así disminuir la concentración de CO₂ atmosférico. Sin embargo, la fm de ¹⁴C más alta se observó justamente la mañana del 01 de enero del 2020 con un valor de 0.999, de evidencia clara de que la gran mayoría de emisiones la noche del 31 de diciembre del 2019 fueron de originadas por la quema de biomasa.

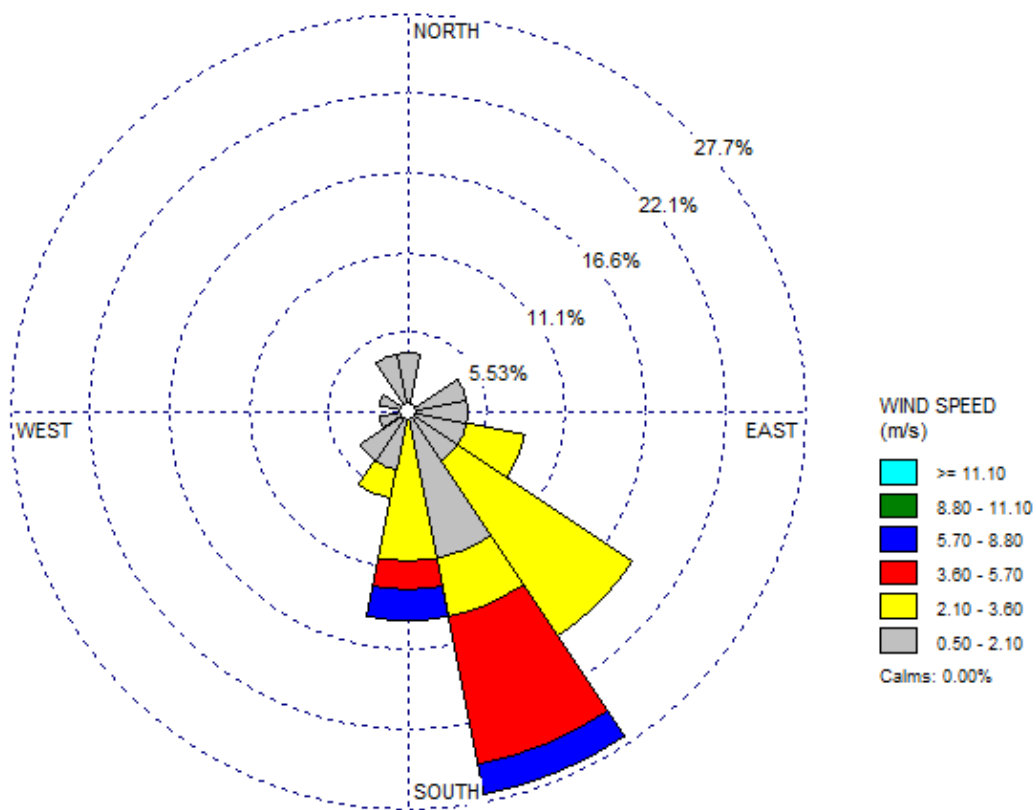


Figura 41. Rosa del viento 31/12/19-01/01/20 Estación Cannes

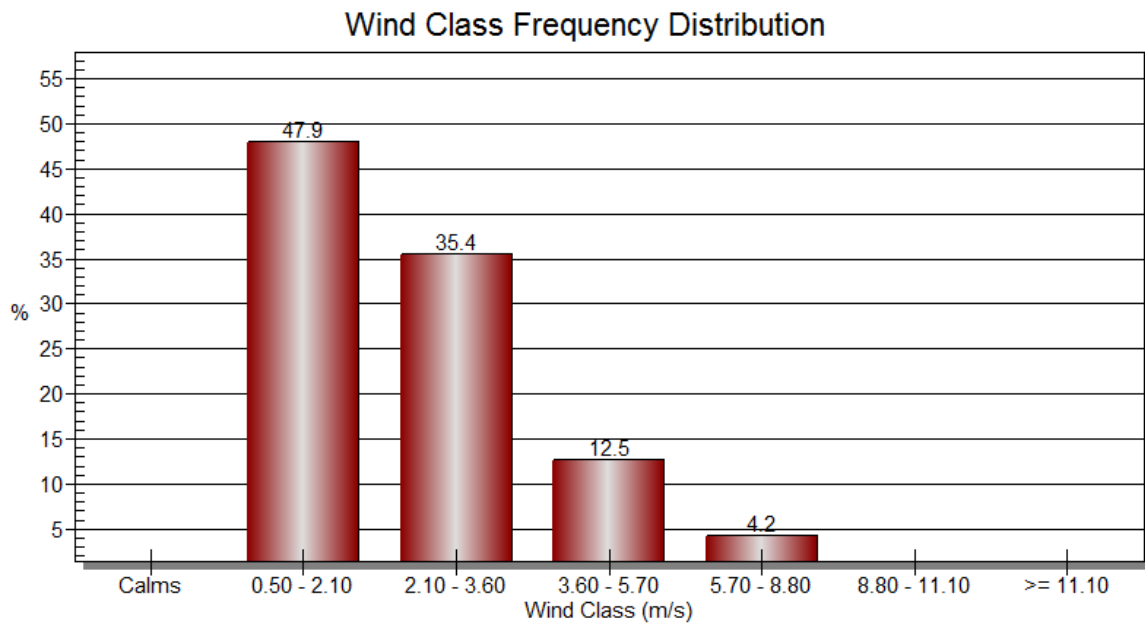


Figura 42. Frecuencia del viento 31/12/19-01/01/20 Estación Cannes

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló e implementó un método de captura de CO₂ atmosférico de bajo costo, utilizando equipos de poco volumen y de fácil operación. Lo que ofrece una gran ventaja sobre otros métodos de recolección de muestras que se planean analizar por espectrometría masas con aceleradores, como es el uso de Canisters para capturar muestras de aire. Se logró determinar la concentración de CO₂ en ppm y su contenido de ¹⁴C como fM en el sur de la CD.MX.

Los valores encontrados para las muestras nocturnas de este trabajo evidencian una relación entre las festividades populares del Valle de México en las que anualmente se efectúa una quema intensiva de fuegos artificiales y el incremento en las emisiones de CO₂. De lo analizado en este trabajo se puede observar claramente una relación entre la cantidad de CO₂ emitido por una población y sus costumbres, esta relación ya ha sido demostrada en múltiples trabajos, una población más desarrollada emite más CO₂ a la atmósfera debido a sus sistemas de producción, quema de combustibles fósiles para obtener energía, etc.

En este trabajo, que no solo se analizó el incremento en las emisiones de CO₂ durante las fiestas decembrinas, sino que se determinó la fracción de carbono moderno (fM) del CO₂ atmosférico, lo que nos permite determinar el origen fósil o biogénico de las emisiones pues el ¹⁴C actúa como trazador de fuentes.

La campaña de monitoreo inició el 2 de diciembre del 2019 y concluyó el 3 de enero del 2020. Durante este lapso predominaron los vientos de entre 0.5 a 2.1 m/s con un 70.8% de frecuencia, le siguieron los vientos de entre 2.1 a 3.6 m/s con un 19.1% de frecuencia, los vientos fueron de ventolina, flojito, flojo, bonancible- moderado hasta fresquito de acuerdo con la escala de Beaufort (SEMAR, 2020). Los vientos corrieron principalmente de las direcciones sureste y sur sureste. El rango promedio observado de ppm de CO₂ durante el muestreo fue de entre 130 y 450 ppm, que es concordante con la concentración de CO₂ en la atmósfera de 400 ppm. Sin embargo, y justo como se esperaba, los días en los que se presentó la mayor concentración de CO₂ coincidieron con dos de los tres días de fiestas principales. Sin embargo, el análisis de ¹⁴C arrojó resultados bastante interesantes. Debido al día de la virgen y a las altas concentraciones de CO₂ (627 ppm) observadas la mañana del 13 de diciembre se previa que la fM fuera alta. No obstante, la fM no fue notoriamente mayor a lo observado previamente en otros días del monitoreo, esto se debe a que pese a la gran cantidad de biomasa y fuegos artificiales que se queman ese día, también hay un gran flujo de personas que se desplaza a la CDMX para asistir a las celebraciones, que una vez concluidas vuelven a su lugar de origen y esto genera grandes emisiones del sector transporte (fracción de carbono fósil) por lo que se presenta un efecto de dilución del ¹⁴C. Los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ obtenidos durante el periodo de muestreo fueron todos negativos, indicando que el CO₂ atmosférico, anteriormente dominado por el radiocarbono de los ensayos nucleares del siglo XX, actualmente, es dominado por la huella de los combustibles fósiles.

El día 22 de diciembre, se registró una concentración de 455 ppm de CO₂ y una $\Delta^{14}\text{C}$ similar a la alcanzada la mañana de navidad, esto debido a la quema de una gran cantidad de biomasa durante un incendio. De igual forma, se reportó una fM alta en el CO₂ atmosférico. Las emisiones por quema de biomasa tiene una fM mayor a las emitidas por los combustibles fósiles pues como se mencionó en el apartado dióxido de carbono y ^{14}C , la biomasa funge como reservorio de CO₂, un organismo vivo como un árbol intercambiara ^{14}C con su entorno a lo largo de toda su vida, por lo que en su estructura tendrá una gran cantidad de ^{14}C acumulado que es equivalente a la concentración de ^{14}C en la atmósfera de cada año vivido, a esto se debe el incremento de fM en el CO₂ atmosférico que se puede observar a nivel local.

La mañana del 25 de diciembre (Navidad) se registró justo el comportamiento que se deseaba demostrar en este proyecto, el punto máximo en la concentración de CO₂ observado 673 ppm, una concentración muy alta de PM_{2.5} y una fM alta todo esto consecuencia de la quema de biomasa y fuegos artificiales en las festividades.

El comportamiento anterior era también el esperado para el día 1 de enero del 2020, debido a los festejos de Año Nuevo. No obstante, la concentración de CO₂ ese día fue incluso menor al promedio global de 400ppm y la cantidad de PM_{2.5} también fue baja, sin embargo, se notó una peculiaridad pues la fM alcanzo un valor bastante similar al observado la mañana del 13 de diciembre pese a que ese día se reportaron 13 ppm más de PM_{2.5} y 314 ppm más de CO₂. Esto se debió a que la noche del 31 de diciembre pese a que, si hubo una importante cantidad de quema de biomasa y fuegos artificiales, la variable que intervino para alterar tanto los valores fue el viento. Esa noche el viento alcanzo velocidades lo suficientemente altas para arrastrar parte del CO₂ y las PM y que pareciera que no hubo grandes emisiones de estos contaminantes esa noche, pero que la fM nos demostró que no fue así. Aquí se comprueba que al analizar CO₂ y su fM, es sumamente importante hacer un análisis meteorológico paralelo al monitoreo pues de otro modo no podríamos explicar estos sucesos.

Empero a que el gobierno de la CDMX a través de la Secretaria de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC) implementaron una campaña para evitar el uso de pirotecnia en la ciudad, en busca de prevenir riesgos en la salud de la ciudadanía, esta medida no tuvo el efecto, ni la aceptación deseada.

Evidenciando que no solo en la CDMX sino en todo el país es importante generar mejores políticas públicas y gestionar acciones que ayuden a regular y reducir de manera más efectiva la cantidad de pirotecnia que se comercializa y quema anualmente durante las fiestas populares, una de ellas sería mantener un monitoreo continuo de la delta de ^{14}C , y utilizarla como indicador de mejora en la calidad del aire pues actualmente está sube cada año en diciembre como consecuencia de la quema de biomasa y fuegos artificiales.

La tendencia global está encaminada a hacer frente al cambio climático y lograr un desarrollo sostenible que en palabras de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) *se trata de satisfacer nuestras necesidades sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas*. Entre otras cosas, se busca reducir al máximo y en cuanto sea posible las emisiones de GEI sustituyendo los combustibles fósiles por energías más amigables con el ambiente. Desafortunadamente en la CDMX el transporte y la combustión habitacional son los sectores de mayor consumo energético, funcionan gracias al uso de combustibles fósiles por lo que representan también los sectores de mayor emisión de CO₂ (SEDEMA, 2018), es fundamental realizar inversiones que ayuden a la descarbonización del transporte, recurrir a energías sustentables y realizar un uso eficiente de energía. A pesar de ello, se espera que renunciemos abruptamente a las comodidades de la vida moderna o que la economía se pare mientras se realiza la transición energética, se trata de hacer una transición gradual hacia un modelo económico sustentable. Esto será posible gestionando acciones conjuntas con base en conocimiento confiable, conocimiento que se genera en laboratorios y centros de ciencia. El conocimiento debe difundirse en aras de ayudar a la humanidad a idear soluciones que hagan frente a los problemas que nos aquejan.

La implementación de ¹⁴C como un trazador de fuentes que puede determinar indirectamente la fracción de carbono fósil emitidas por la población, es entonces una buena alternativa para determinar si las acciones implementadas por los tomadores de decisiones para reducir las emisiones de CO₂ están siendo efectivas.

Siguiendo el camino planteado en este trabajo se recomienda continuar con esta investigación, para consolidar métodos confiables y desarrollar nuevas técnicas que permitan que este monitoreo sea menos costoso y fácil de implementar, para que de este modo sea cada vez más común encontrar trabajos de este tipo que sirvan como registro.

Bibliografía

- AN/GH, (2019). Incendio en mercado San Cosme arrasa con 181 puestos | Videos. Aristegui Noticias. <https://aristeguinoticias.com/2212/mexico/incendio-en-mercado-san-cosme-arrasa-con-181-puestos-videos/> visitado 27 de mayo 2020.
- Aitken, M., (1990). Science-based dating in archaeology. Longman, London.
- Allwood J., V. Bosetti, N.K. Dubash, L. Gómez-Echeverri, y C. Von Stechow, (2014) Glosario. En Cambio climático: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, I. Baum, S. Schlömer, C. Von Stechow, y J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- BBC News Mundo, (2018). Explosión en Tultepec: mueren 24 personas por explosiones en un taller de fuegos artificiales en México. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-44730412> visitado 11 junio 2020
- Beramendi-Orosco, L., González-Hernández, G., Martínez-Reyes, A., Morton-Bermea, O., Santos-Arévalo, F., Gómez-Martínez, I., y Villanueva-Díaz, J. (2018). Cambios en las fuentes de emisión de CO₂ en el área metropolitana de la Ciudad de México deducidos de las concentraciones de radiocarbono en los anillos de los árboles. Radiocarbono, 60 (1), 21-34. Doi: 10.1017 / RDC.2017.100
- Chaves Palacio, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial. Revista de Historia 17. ISSN 0213-375X
- Chemical Safety Facts Org, (2020). La brillante historia y química de los fuegos artificiales. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/la-brillante-historia-y-quimica-de-los-fuegos-artificiales/> visitado el 28 de julio del 2020
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, (2018). IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es#:~:text=El%20prop%C3%B3sito%20del%20C3%ADndice%20IMECA,de%20riesgo%20para%20la%20salud> visitado el 07 de julio del 2020
- Crespo, E., (2018). Técnicas De Muestreo. Módulo: Contaminación férica. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental 2007/2008. Escuela de Negocios. <https://static.eoi.es/savia/tecnicasmuestreocontaminacionatmosferica> visitado 6 de septiembre 2019
- Dávila, A., (2019). Pirotecnia y contaminación en Navidad y Año Nuevo. Green Peace. <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/3754/pirotecnia-y-contaminacion-en-navidad-y-ano-nuevo/> visitado el 11 junio 2020
- Economía Hoy, (2019). Accidentes por pirotecnia incrementan 300% durante temporada de fiestas patrias. <https://www.economiahoy.mx/nacional-eAm-mx/noticias/9388459/09/18/Accidentes-por-pirotecnia-incrementan-300-durante-temporada-de-fiestas-patrias-.html>
- García, C. D. A., (2016). Producción de blancos de grafito a partir de muestras de CO₂ para análisis de radiocarbono por espectrometría de masas con aceleradores. Tesis de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno de México, (2011). Con proyecto de decreto que crea la Ley Federal de Pirotecnia. No. de Reg: 339/102/01, Presentada por Diputado: Rodrigo David Mireles Pérez del Partido Acción Nacional <http://www.diputados.gob.mx/servicios/datorele/cmprtvs/iniciativas/Inic/339/2.htm> visitado el 27 de julio del 2020
- Gómez, V., Ortiz, E., y Solís, C., (2018). Espectrometría de masas con aceleradores: Laboratorio Nacional (LEMA)/coordinadores M. E. Ortiz -Salazar, C. Solís Rosales, E. Chávez Lomelí. Cap. 5: Carbono catorce en la contaminación ambiental. 1ª edición. Ciudad de México: Universidad Autónoma Nacional de México, Facultad de Ciencias. 260:125-150.
- Heal, M. R., (2014). The Application of Carbon-14 Analyses to the Source Apportionment of Atmospheric Carbonaceous Particulate Matter: A Review, Analytical & Bioanalytical Chemistry, 406:81-98.

- INECC, (2013). Vulnerabilidad al cambio climático en los municipios de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. México.
- Infobae, (2019). Contingencia ambiental en la CDMX: se activó la fase preventiva. [https://www.infobae.com/america/mexico/2019/12/25/contingencia-ambiental-en-la-cdmx-se-activo-la-fase-preventiva/#:~:text=La%20fase%20preventiva%20de%20contingencia,Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20\(CDMX\).&text=De%20acuerdo%20con%20el%20organismo,la%20dosis%20de%20contaminantes%20inhalados](https://www.infobae.com/america/mexico/2019/12/25/contingencia-ambiental-en-la-cdmx-se-activo-la-fase-preventiva/#:~:text=La%20fase%20preventiva%20de%20contingencia,Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20(CDMX).&text=De%20acuerdo%20con%20el%20organismo,la%20dosis%20de%20contaminantes%20inhalados) visitado el 26 de julio del 2020
- IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157.
- Keelling, C. D., (1983). The Global Carbon Cycle: What we know and could know from atmospheric, biospheric, and oceanic observations, in Proceedings of the CO₂ Research Conference: Carbon Dioxide, Science and Consensus, DOE CONF-820970, pp II.3-II.62, U.S. Dept. of Energy, Washington, DC, 89, 4615-4628.
- Keelling, C. D., Carter, A. F. and Mook, W. G, (1984). Seasonal, latitudinal and secular variations in the abundance and isotopic ratios of atmospheric CO₂, J. Geophys. R
- Lakes Environmental, (2018). WRPLOT View™ - Freeware Wind Rose Plots for Meteorological Data <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html> visitado el 15 de mayo del 2020.
- Lara, J., (2018). Quemaduras Graves, Daños En Ojos Y Oídos E Incluso Amputaciones Aumentan Por Mal Uso De Pirotecnia Durante Fiestas De Fin De Año. Fundación Mexicana para la Dermatología. <https://fmd.org.mx/quemaduras-graves-danos-en-ojos-y-oidos-e-incluso-amputaciones-aumentan-por-mal-uso-de-pirotecnia-durante-fiestas-de-fin-de-ano/> visitado el 28 de julio del 2020.
- Levin, I., Naegler, T., Kromer, B., Diehl, M., Francey, R., Gomez-Pelaez, J., Steele, L. P., Wagenbach, D., Weller, R. and Worthy, D. E. (2010). Observations and modelling of the global distribution and long-term trend of atmospheric ¹⁴CO₂. Tellus B, 62: 26-46. Doi:10.1111/j.1600-0889.2009.00446.x
- LFAFE, (2015). Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/102_12nov15.pdf visitado el 24 de julio del 2020
- NOAA, (2019). NOAA Research: Carbon Tracker CT2019. Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. National Oceanic & Atmospheric Administration. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/> visitado el 08 de agosto del 2020
- NOAA, (2020). NOAA Research: Monthly Average Mauna Loa CO₂. Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. National Oceanic & Atmospheric Administration. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> visitado el 07 de agosto del 2020
- UNFCCC, (2015). Acuerdo de París. <https://unfccc.int/es/news/final-cop21> visitado 20 septiembre 2019
- RAMA, (2020). Base de datos- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27> visitado el 01 de abril del 2020
- REDMET, (2020). Base de datos- Red de meteorología y Radiación Solar (REDMET). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27> visitado el 01 de abril del 2020.
- Retama, A., Neria-Hernández, A., Jaimes-Palomera, M., Rivera-Hernández, O., Sánchez-Rodríguez, M., López-Medina, A., y Velasco, E, (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico City. Elsevier Journal. Atmospheric Environment: x2100013.
- Sánchez, A. J., (2011). La Química de los fuegos artificiales. <http://www.cvatocha.com/documentos/quimica/fuegos.pdf> visitado el 24 de julio del 2020
- SEDEMA, 2018. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de emisiones de la Ciudad de México 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de la Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. Ciudad de México.
- SEMAR, (2020). Escala Beaufort. Secretaria de Marina Mexicana. <http://www.semar.gob.mx/meteorologia/ESCALA%20BEAUFORT.htm> visitado el 14 de julio del 2020.

- Sierra, C. (2018). Forecasting Atmospheric Radiocarbon Decline to Pre-Bomb Values. *Radiocarbon*. Vol 60, Nr 4, 2018, p 1055–1066.
- UCSUSA, (2017). Cars, Trucks, Buses and Air Pollution. Union of Concerned Scientists USA. https://ucsusa.org/resources/cars-trucks-buses-and-air-pollution?_ga=2.104690116.559262455.1597283549-879333650.1597283549 visitado el 08 de agosto del 2020
- Vogel, S. J., Southon, R. J., Nelson, D. E. and Brown, A. T. (1984). Performance of catalytically condensed carbon for use in accelerator mass spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 289-293.

Apéndice

Eventos e incidencias ocurridas en la Ciudad de México durante la campaña

- 19 de diciembre del 2019 11:14 h, la SGIRPC informó a través de su cuenta oficial de Twitter @SGIRPC_CDMX, un incidente en el centro comercial Park Santa Fe ubicado al oeste de la CDMX, una planta de luz alterna se quemó y 4000 personas fueron evacuadas.
- De acuerdo con las noticias reportadas el día 22 de diciembre del 2019, aprox. a las 5:30 h se reportó un incendio en el Mercado de San Cosme, en la zona centro de la Ciudad de México (AN/GH, 2019). El Honorable Cuerpo de Bomberos de la CDMX (HCB), a través de su cuenta oficial de Twitter @Bomberos_CDMX publicó un boletín a las 9:27 h. en el que confirmaba que el incendio había sido sofocado.
- 23 de diciembre del 2019, el HCB @Bomberos_CDMX, informó sobre un incendio en el interior del mercado Abelardo Rodríguez, ubicado en el centro de la CDMX, luego de una hora de trabajo de combate y sofocación, se reportó que el incendio había sido sofocado 6:41 h.
- 24 de diciembre del 2019, alrededor de las 21:22h inició el fuego en el mercado de La Merced, la jefa de gobierno de la CDMX Claudia Sheinbaum comenzó a dar seguimiento del siniestro y a comunicar los avances en el trabajo de combate y sofocación del incendio por medio de su cuenta oficial de Twitter @Claudiashein, al igual que la SGIRPC @SGIRPC_CDMX. El incendio duro un par de horas, hasta que finalmente el 25 de diciembre del 2019 a las 2:32 h, el HCB @Bomberos_CDMX emitió el boletín de incendio extinguido.

Reproducibilidad y exactitud

El uso de blancos y estándares se utilizan para determinar la pureza de los reactivos y equipos empleados durante un proceso en laboratorio, de este modo se disminuye el grado de incertidumbre de los procesos y se demuestra que el proceso es reproducible en otros laboratorios.

- Para técnica AMS se ha concordado el uso de ácido fáltico como blanco (PA BL) cuyos valores aceptables son:

$$\Delta^{13}\text{C} = -29$$

$$\rho\text{MC} = 0$$

- Internacionalmente el estándar utilizado para la determinación de ^{14}C es el ácido oxálico (OXA II), cuyos valores aceptables son:

$$\Delta^{13}\text{C} = -17.8$$

$$\rho\text{MC} = 134.08$$

Tabla 9. Porcentaje de error en $\Delta^{13}\text{C}$ para OXA II

OXA II					
Muestra		$\Delta^{13}\text{C}$		Valor aceptado	
STD	1	-17.660	+/- 0.580	-17.8	
STD	2	-17.968	+/- 0.648	-17.8	
STD	3	-16.298	+/- 1.458	-17.8	
STD	4	-18.190	+/- 1.366	-17.8	
STD	5	-19.322	+/- 1.212	-17.8	
STD	6	-16.021	+/- 1.187	-17.8	
STD	7	-18.007	+/- 0.898	-17.8	
STD	8	-16.298	+/- 1.458	-17.8	
STD	9	-20.143	+/- 0.718	-17.8	
STD	10	-16.073	+/- 1.802	-17.8	
STD	11	-18.016	+/- 0.925	-17.8	
PROMEDIO		-17.636	+/- 1.114		
% error		0.009			

Tabla 10. Porcentaje de error en $\Delta^{13}\text{C}$ para blanco

BLANCO					
Muestra		$\Delta^{13}\text{C}$		Valor aceptado	
PA BL	1	-40.020	+/-	0.814	-29
PA BL	2	-38.196	+/-	1.121	-29
PA BL	3	-35.141	+/-	0.965	-29
PA BL	4	-33.762	+/-	0.963	-29
PA BL	5	-32.680	+/-	1.502	-29
PA BL	6	-33.549	+/-	1.287	-29
PA BL	7	-28.735	+/-	1.307	-29
PA BL	8	-31.443	+/-	1.690	-29
PA BL	9	-33.495	+/-	0.986	-29
PROMEDIO		-34.113	+/-	1.182	
% error		0.176			

En las tablas 9 y 10, se muestran los resultados de $\Delta^{14}\text{C}$ obtenidos por técnica AMS, de las muestras de PA BL y OXA II que se procesaron el LEMA, para ambas el error porcentual fue menor a 1%. Por lo que se tiene un grado de confianza alto en el procesamiento de muestras. No obstante, en las muestras de la campaña de monitoreo, se emplearon sustancias y equipos expuestos a la atmósfera ambiental por lo que el error porcentual de estas muestras podría presentar un error porcentual mayor.

Tabla 11. Porcentaje de error en pMC para OXA II

OXA II					
Muestra		pMC		Valor aceptado	
STD	1	134.154	+/-	0.496	134.08
STD	2	133.749	+/-	0.462	134.08
STD	3	134.264	+/-	0.443	134.08
STD	4	133.466	+/-	0.443	134.08
STD	5	134.020	+/-	0.473	134.08
STD	6	134.149	+/-	0.500	134.08
STD	7	134.615	+/-	0.440	134.08
STD	8	135.193	+/-	0.658	134.08
STD	9	133.677	+/-	0.549	134.08
STD	10	133.528	+/-	0.598	134.08
STD	11	133.888	+/-	0.464	134.08
PROMEDIO		134.064	+/-	0.502	
% error		0.000			

Tabla 12. Porcentaje de error en pMC para blanco

BLANCO					
Muestra		pMC		Valor aceptado	
PA BL	1	0.404	+/-	0.016	0
PA BL	2	0.397	+/-	0.013	0
PA BL	3	0.448	+/-	0.016	0
PA BL	4	0.432	+/-	0.012	0
PA BL	5	0.402	+/-	0.016	0
PA BL	6	0.395	+/-	0.012	0
PA BL	7	0.404	+/-	0.016	0
PA BL	8	0.397	+/-	0.013	0
PA BL	9	0.448	+/-	0.016	0
PROMEDIO		0.414	+/-	0.014	

Las tablas 11 y 12, se muestran los resultados de pMC obtenidos por técnica AMS, de las muestras de PA BL y OXA II que se procesaron en el LEMA, debido a que el valor aceptado para PA BL es cero no es posible calcular el error porcentual pues al dividir entre cero este se indetermina. Sin embargo, el error porcentual para OXA II fue menor al 0.001%, por lo que se puede deducir que se tiene un alto grado de confianza en el procesamiento de muestras dentro del laboratorio.

Para corroborar que el equipo de grafitización de carbonatos opera correctamente y los resultados en las muestras son confiables y sobre todo reproducibles en las mismas condiciones. Se emplean dos estándares internacionales AEIA C1 y C2.

- El estándar C1 es una sustancia extraída de una losa compuesta 100% de CaCO_3 y proveniente de la provincia de Lucca, Italia.

Valores aceptables de:

$$\Delta^{13}\text{C} = 2.42$$

$$\text{pMC} = 0$$

- El estándar C2 es una sustancia extraída de un depósito de carbonatos de agua dulce de la cuenca del río Múnich en Baviera, Alemania.

Valores aceptables de:

$$\Delta^{13}\text{C} = - 8.42$$

$$\text{pMC} = 41.14$$

Tabla 13. Porcentaje de error en $\Delta^{13}\text{C}$ para C1

AIEA C1					
Muestra		$\Delta^{13}\text{C}$		Valor aceptado	
C1	1	1.027647	+/- 1.471	2.420	
C1	2	-5.55572	+/- 0.854	2.420	
C1	3	-1.7314	+/- 0.671	2.420	
C1	4	6.019493	+/- 1.854	2.420	
C5	5	2.156484	+/- 1.099	2.420	
PROMEDIO		0.383301	+/- 1.190		
% error		0.841611			

Tabla 14. Porcentaje de error en $\Delta^{13}\text{C}$ para C2

AEIA C2					
Muestra		pMC		Valor aceptado	
C2	1	-11.496	+/- 0.889	-8.250	
C2	2	-14.625	+/- 0.833	-8.250	
C2	3	-12.735	+/- 1.668	-8.250	
C2	4	-14.117	+/- 1.085	-8.250	
C2	5	-7.949	+/- 1.952	-8.250	
C2	6	-9.105	+/- 1.728	-8.250	
PROMEDIO		-11.671	+/- 1.359		
% error		0.415			

En las tablas 13 y 14, se muestran los resultados de $\Delta^{14}\text{C}$ obtenidos por técnica AMS, de las muestras de C1 y C2 que se procesaron el equipo de grafitización de carbonatos, para ambas el error porcentual fue menor a 1 %. Por lo que se tiene un grado de confianza alto en el procesamiento de muestras de CO_3^{2-} .

Tabla 15. Porcentaje de error en pMC para C1

AIEA C1					
Muestra		pMC		Valor aceptado	
C1	1	0.074	+/-	0.021	0
C1	2	0.539	+/-	0.017	0
C1	3	0.158	+/-	0.030	0
C1	4	-0.152	+/-	0.000	0
C5	5	-0.005	+/-	0.000	0
PROMEDIO		0.123	+/-	0.014	

Tabla 16. Porcentaje de error en pMC para C2

AIEA C2					
Muestra		pMC		Valor aceptado	
C2	1	-11.496	+/-	0.889	-8.250
C2	2	-14.625	+/-	0.833	-8.250
C2	3	-12.735	+/-	1.668	-8.250
C2	4	-14.117	+/-	1.085	-8.250
C2	5	-7.949	+/-	1.952	-8.250
C2	6	-9.105	+/-	1.728	-8.250
PROMEDIO		-11.671	+/-	1.359	
% error		0.415			

En las tablas 15 y 16, se muestran los resultados de pMC obtenidos por técnica AMS, de las muestras de C1 y C2 que se procesaron el equipo de grafitización de carbonatos, debido a que el valor aceptado para C1 es cero no es posible calcular el error porcentual pues al dividir entre cero este se indetermina. Sin embargo, el error porcentual para C2 fue menor al 0.01%, por lo que se puede deducir que se tiene un alto grado de confianza en el procesamiento de muestras de CO_3^{2-} .