



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Modelado y simulación de la dispersión de
Material particulado (PM_{2.5}) y Monóxido de
Carbono (CO) producidas por la combustión de
dispositivos de cocción empleando un Modelo de
Dispersión de Pluma Gaussiana y el Simulador
Gaussiano Screen3**

TESIS

presentada por:

María de Lourdes Cinco Izquierdo

a la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química
como requisito para obtener el Grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

**Director: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco
Co-Asesor: Dr. Víctor Manuel Ruíz García**

Morelia, Michoacán de Ocampo, septiembre de 2021.

Dedicatoria

A mi familia, gracias por brindarme su apoyo y su amor incondicional.

Agradecimientos

Institucionales

Agradezco en primer lugar a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química por permitirme continuar con mis estudios de Maestría, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), al Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LINEB) y a la Unidad de Ecotecnologías por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación. También agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado a lo largo de mi formación académica para obtener el grado de maestra, y agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER-CONACYT 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la generación de Energía Térmica y Eléctrica por las facilidades otorgadas.

Quiero agradecer particularmente al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y al Dr. Víctor Manuel Ruíz García por la dirección de la tesis, por confiar en mí, por el apoyo otorgado durante esta investigación y por brindarme la oportunidad de colaborar en este proyecto, el cual fortaleció mi formación académica. Así como a los miembros de comité de revisión, al Dr. Rafael Maya Yescas, al Dr. Omar Raúl Masera Cerutti y al Dr. Roberto Guerra González por aceptar ser parte del proceso de evaluación.

Agradezco al personal del IIES: de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones a la Ing. Atzimba López Maldonado, el M.I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada; del Laboratorio de Bioenergía, al M.C. Rene D. Martínez Bravo y de la Unidad de Ecotecnologías a el M.C Alfredo Fuentes Gutiérrez, por su apoyo en facilitar herramientas e insumos de trabajo, a la Dra. Montserrat Serrano Medrano y al Dr. Víctor Berrueta por todo el apoyo, aportes y observaciones brindadas para la consolidación de este trabajo de tesis.

Agradezco al personal del LINEB, especialmente al Dr. Paulo César Medina Mendoza por su aporte de datos utilizados en este trabajo, a la M. C. Sará Ramos Vargas, al M. C. Juan Carlos Vázquez Tinoco y al Ing. Dante Samuel Villanueva Peralta por todos sus aportes y apoyo técnico.

Personales

Agradezco infinitamente a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños y por siempre confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre María de Lourdes Izquierdo García por estar dispuesta a acompañarme en cada larga y agotadora noche de estudio, gracias a mi padre Ariel Cinco Valle por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras las cuales me han guiado durante toda mi vida. Muchas gracias a ambos por todo su amor y por apoyarme en este proceso para culminar mis estudios

También quiero extender un agradecimiento a mis hermanos Oscar Jair Cinco Izquierdo y Teresa Daniela Cinco Izquierdo quienes han sido un motor en mi vida y un ejemplo a seguir, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los cuales se incluye este.

Por otra parte, agradezco a mis compañeros y ahora amigos de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química: Javier, Alexis, Alma, Luis, Rosalía y Martín con quienes compartí largas noches de estudio y desvelo, sentimientos de nerviosismo y frustración, pero sobre todo muchas risas, felicidad y alegría, también quiero agradecerle a esa persona que tuvo paciencia y entrega para conmigo: gracias Hirepan por todo tu amor y cariño, gracias por tomarme de la mano y del corazón durante todo este camino.

Agradezco a mis amigos Sandra, Miryam, Stephanie, Daniel y Anthony quienes han estado conmigo en los momentos más turbulentos de mi vida y nunca me han dejado sola y finalmente también quiero agradecer a mis amigos de ECOTEC: Jorge, Víctor, Omar, Emilio, Sara, Dante, Juan Carlos, Alfredo, Paulo y muchos otros, quienes pese a la distancia siempre han estado presentes y apoyándome.

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Índice de Ilustraciones	vii
Índice de Tablas	xi
Resumen	xiii
Abstract	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Particulares.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Contaminación atmosférica.....	5
2.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos	6
2.2.1 Por su origen	6
2.2.2 Por su estado físico	6
2.2.3 Por su composición química.....	9
2.3 Principales fuentes de contaminación	9
2.3.1 De acuerdo a su origen.....	9
2.3.2 Por su movilidad	10
2.3.3 Por su distribución espacial	10
2.4 Factores meteorológicos que describen el comportamiento de dispersión de los contaminantes	11
2.4.1 Temperatura.....	11
2.4.2 Dirección del viento.....	11
2.4.3 Velocidad del viento	12
2.4.4 Turbulencia.....	13
2.4.5 Estabilidad atmosférica	13
2.5 Influencia del medio circundante	18
2.5.1 Influencia del terreno local	18

2.5.2	Influencia topográfica del medio rural y urbano	18
2.6	Modelos de contaminación del aire	20
2.6.1	Familias principales de modelos de contaminación del aire	20
2.6.2	Modelos de dispersión	22
2.7	Teoría de la dispersión de Gauss.....	23
2.7.1	Modelo de Dispersión Gaussiana	24
2.7.2	Versiones de la ecuación Gaussiana	26
2.8	Modelo Screen3	27
2.9	Procesos de combustión	32
2.10	Estado del arte	34
3.	METODOLOGÍA.....	37
3.1	Tipo de investigación	37
3.2	Recopilación de los datos	38
3.2.1	Información meteorológica y geográfica	38
3.2.2	Datos de emisión de contaminantes.....	38
3.3	Estudio de vientos y rosas de vientos	38
3.4	Selección del área de estudio y topografía del terreno	40
3.4.1	Área de estudio	40
3.4.2	Topografía del área de estudio	41
3.5	Simulación de la dispersión mediante el modelo Screen3.....	43
3.6	Programación del Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano.....	44
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1	Estudio de vientos y rosas de vientos	45
4.2	Área de estudio y topografía del terreno	55
4.3	Concentraciones de PM _{2.5} y CO obtenidas mediante el simulador de dispersión Screen3 y el modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano.....	59
4.3.1	Parámetros de entrada	59
4.3.2	Escenarios propuestos	59
4.4	Comparación de resultados.....	82
5.	CONCLUSIONES.....	87
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	89
	Apéndice A: Tasas de emisión empleadas en este estudio	93
	Apéndice B: Descripción detallada del modelo Screen3	98
	B.1. Desarrollo del modelo Screen3	98

B.2. Capacidades y limitaciones de Screen3	98
B.3. Supuestos del modelo Screen3.....	99
B.4. Opciones de modelado	99
B.4.1. Tipos de fuente de emisión.....	99
B.4.2. Tipos de terreno	102
B.4.3. Opciones meteorológicas	103
B.4. Concentraciones máximas para promedios de corto y largo plazo	104
Apéndice C: Vocabulario básico para el uso de Screen3	106
Apéndice D: Velocidad del viento y las clases de estabilidad durante periodo 2003 – 2018.....	108
Apéndice E: Gráficos de control de los datos de velocidad del estudio de vientos	109
Apéndice F: Gráficos de concentración de PM _{2.5} y CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma	113
Apéndice G: Gráficos de concentración de CO	123

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Geometría de un modelo gaussiano.....	24
Ilustración 2. Efecto de reflexión del suelo.	26
Ilustración 3. Histograma unidimensional y su distribución Normal.	28
Ilustración 4. Histograma bidimensional y su distribución Normal.....	28
Ilustración 5. Mapa de zona quemada en Morelos en el 2013 - Cosecha 2014. (Fuente: Mugica-Alvarez y col., 2017)	35
Ilustración 6. Contorno de concentración de contaminantes a 1,5 m para 5 hogares a favor del viento en el centro del penacho con cada hogar emitiendo a 20 mg/min y una distancia de 40 m entre hogares. (Fuente: Ruíz-García y col., 2018).....	36
Ilustración 7. Esquema general de la metodología de este estudio.....	37
Ilustración 8. Pantalla de inicio del software WRPLOT View.....	39
Ilustración 9. Localidad de Jesús del Monte, Michoacán.	41
Ilustración 10. Pantalla de inicio del software SCREEN View.	43
Ilustración 11. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: enero – febrero - marzo del 2003 al 2018.	46
Ilustración 12. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: abril – mayo – junio del 2003 al 2018.	47
Ilustración 13. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: julio – agosto - septiembre del 2003 al 2018.	48
Ilustración 14. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: octubre – noviembre – diciembre del 2003 al 2018.....	49
Ilustración 15. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre enero – febrero - marzo del 2003 al 2018.....	51
Ilustración 16. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: abril – mayo – junio del 2003 al 2018.	52
Ilustración 17. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: julio – agosto – septiembre del 2003 al 2018.	53
Ilustración 18. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: octubre – noviembre – diciembre del 2003 al 2018.	54
Ilustración 19. Curvas de nivel de la comunidad de Jesús del Monte.	56
Ilustración 20. Curvas de nivel tridimensionales de la comunidad de Jesús del Monte.	57
Ilustración 21. Perfil topográfico corte transversal.	58
Ilustración 22. Perfil topográfico corte longitudinal.....	58
Ilustración 23. Concentración de PM _{2.5} vs Distancia (Trimestre 1).	61
Ilustración 24. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 1).	62
Ilustración 25. Concentración de PM _{2.5} vs Distancia (Trimestre 2).	62
Ilustración 26. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 2).	63
Ilustración 27. Concentración de PM _{2.5} vs Distancia (Trimestre 3).	63
Ilustración 28. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 3).	64
Ilustración 29. Concentración de PM _{2.5} vs Distancia (Trimestre 4).	64
Ilustración 30. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 4).	65

Ilustración 31. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la Estufa Patsari.	66
Ilustración 32. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la Estufa Patsari.....	67
Ilustración 33. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el promedio de 4 estufas tipo plancha.	68
Ilustración 34. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el promedio de 4 estufas tipo plancha.	69
Ilustración 35. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tipo U.....	70
Ilustración 36. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tipo U.	71
Ilustración 37. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tres piedras...	72
Ilustración 38. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tres piedras.	73
Ilustración 39. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la estufa de gas LP.....	74
Ilustración 40. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la estufa de gas LP.	75
Ilustración 41. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Ecostufa.	76
Ilustración 42. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Patsari.....	77
Ilustración 43. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Mera-Mera. ...	77
Ilustración 44. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Onil.	78
Ilustración 45. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Promedio 4 estufas con chimenea.....	79
Ilustración 46. Concentraciones de PM2.5 en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica A para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.	80
Ilustración 47. Concentraciones de PM2.5 en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica B para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.	81
Ilustración 48. Concentraciones de PM2.5 en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica D para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.	81
Ilustración 49. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM2.5 disminuya 1 µg/m3 para diferentes tasas de emisión de chimeneas (Modelo de pluma Gaussiano).....	83

Ilustración 50. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM2.5 disminuya 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tasas de emisión de chimeneas (Screen3).....	84
Ilustración 51. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM2.5 disminuya 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tasas de emisión de chimeneas para tres modelos de contaminación de aire.....	85
Ilustración 52. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM2.5 disminuya 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tasas de emisión de chimeneas para tres modelos de contaminación de aire.....	86
Ilustración 53. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 1.....	109
Ilustración 54. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 2.....	110
Ilustración 55. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 3.....	110
Ilustración 56. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 4.....	111
Ilustración 57. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufa Patsari - Trimestre 1).....	113
Ilustración 58. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufa Patsari - Trimestre 1).....	114
Ilustración 59. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Promedio 4 Estufas eficientes de leña: Patsari, Ecostufa, Mera-Mera y Onil- Trimestre 1).....	115
Ilustración 60. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Promedio 4 Estufas eficientes de leña: Patsari, Ecostufa, Mera-Mera y Onil- Trimestre 1).....	116
Ilustración 61. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón tipo U- Trimestre 1).....	117
Ilustración 62. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón tipo U- Trimestre 1).....	118
Ilustración 63. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón 3 piedras - Trimestre 1).....	119
Ilustración 64. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón 3 piedras - Trimestre 1).....	120
Ilustración 65. Concentración de PM2.5 a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufas de gas LP - Trimestre 1).....	121
Ilustración 66. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufas de gas LP - Trimestre 1).....	122
Ilustración 67. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica A Estufas: Fogón U y Fogón 3 Piedras.	123
Ilustración 68. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica A Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.	124
Ilustración 69. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica B Estufas: Fogón U y Fogón 3 piedras.	124
Ilustración 70. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica B Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.	125

Ilustración 71. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica D Estufas: Fogón U y Fogón 3 piedras.	125
Ilustración 72. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica D Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.	126

Índice de Tablas

Tabla 1. Direcciones primarias y secundarias de las Rosa de Vientos.	12
Tabla 2. Clasificación de atmósferas por estabilidad.	17
Tabla 3. Clasificación de atmósferas por insolación y nubosidad.	17
Tabla 4. Coeficientes a, b, c y d del método de Pasquill respecto a la clase de estabilidad atmosférica.	31
Tabla 5. Velocidad del viento correspondientes a los 4 trimestres durante el periodo 2003 – 2018.	50
Tabla 6. Perfil topográfico de la comunidad de Jesús del Monte.	58
Tabla 7. Parámetros de entrada.	59
Tabla 8. Tasas de emisión de los dispositivos de cocción.	59
Tabla 9. Concentraciones de PM2.5 de las estufas tipo plancha obtenidas mediante el simulador Screen3 y el modelo de pluma Gaussiano.	76
Tabla 10. Concentraciones de PM2.5 de la estufa de gas LP, el fogón U y el fogón tres piedras obtenidas mediante el modelo de pluma Gaussiano.	80
Tabla 11. Distancia entre viviendas para que la concentración de emisiones de PM2.5 de las estufas tipo plancha se reduzca a 1 µg/m ³ a la altura de respiración del individuo.	82
Tabla 12. Distancia entre viviendas para que la concentración de emisiones de PM2.5 de las estufas tipo plancha se reduzca a 1 µg/m ³ a la altura de respiración del individuo empleando diferentes tasas de emisión.	82
Tabla 13. Resumen de procedimientos sugeridos para estimar las dimensiones iniciales laterales y las dimensiones verticales para fuentes volumétricas. ..	101
Tabla 14. Combinaciones de velocidad del viento y clase de estabilidad usadas en el modelo Screen3.	104
Tabla 15. Factores de conversión recomendados para periodos de largo plazo.	105
Tabla 16. Velocidad del viento y las clases de estabilidad durante 2003 – 2018.	108
Tabla 17. Concentraciones de CO de los dispositivos de cocción mediante el modelo de pluma Gaussiano en el cuarto trimestre del año.	127

Resumen

Modelado y simulación de la dispersión de Material particulado ($PM_{2.5}$) y Monóxido de Carbono (CO) producidas por la combustión de dispositivos de cocción empleando un Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiana y el Simulador Gaussiano Screen3

Desarrollada por: Ing. María de Lourdes Cinco Izquierdo, septiembre 2021

Dirigida por: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco

Co-asesorada por: Dr. Víctor Manuel Ruíz García

En el presente trabajo se evaluó la dispersión de contaminantes producto del proceso de combustión en dispositivos para satisfacer tareas de cocción, empleando un Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano y el Modelo Gaussiano Screen3. Mediante las emisiones de Material Particulado de $2.5 \mu m$ de diámetro ($PM_{2.5}$) y de Monóxido de Carbono (CO) que son producto de la quema de combustibles sólidos de uso doméstico, se modelaron distintos escenarios de la contribución a la contaminación del aire y del ambiente debido a la pluma de emisiones (incluyendo tecnologías con y sin chimenea).

En este trabajo también se integra en la modelación y simulación de la dispersión de $PM_{2.5}$ y CO, las condiciones meteorológicas y la topografía de la comunidad de Jesús del Monte, Michoacán.

Palabras claves: Screen3, Modelo Gaussiano, $PM_{2.5}$, CO.

Abstract

Modelling and simulation of the dispersion of particulate matter (PM_{2.5}) and Carbon Monoxide (CO), produced by the combustion of cooking devices employing a Gaussian Feather Dispersion Model and the Gaussian simulator Screen3

Developed by: Ing. María de Lourdes Cinco Izquierdo, september 2021

Directed by: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco

Co-asesored by: Dr. Víctor Manuel Ruíz García

In this work, the dispersion of contaminants from the combustion process in devices to meet cooking tasks was evaluated, using a Gaussian Feather Dispersion Model and the Gaussian Screen3 Model. Through emissions of 2.5 μm diameter Particulate Matter (PM_{2.5}) and Carbon Monoxide (CO) that are the product of burning solid domestic fuels, the contribution to air and environmental pollution due to emission plume was modeled (including technologies with and without chimney).

In this work he also integrates in the modeling and simulation of the dispersion of PM_{2.5} and CO, the meteorological conditions and the topography of the community of Jesús del Monte, Michoacán.

Key words: Screen3, Gaussian Model, PM_{2.5}, CO.

1. INTRODUCCIÓN

El aire seco está formado por 20.946% de oxígeno (O_2) y 78.084% de nitrógeno (N_2) que al sumarse forma un total de 99.03% de volumen de aire (Wallace & Hobbs, 2006); el resto de volumen se complementa con otros gases considerados como gases traza, dicho gases se encuentran presentes en la atmósfera en cantidades de mezcla menor al 1% en volumen, siendo el Argón (Ar) el más abundante con 0.934%, estos gases minoritarios tienen un impacto notable, ya que la variación de su concentración da lugar a la contaminación atmosférica (Jiménez, 2004); entre ellos monóxido de carbono (CO), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), ozono (O_3), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2), estos contaminantes son de origen antropogénico; no obstante, pueden ser emitidos por diversas fuentes.

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera. Estos modelos, basados en entradas de datos meteorológicos e información de fuentes, como las tasas de emisión y la altura de la chimenea, están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera, y en algunos casos, los contaminantes secundarios que se forman como resultado de reacciones químicas complejas dentro de la atmósfera (EPA, 2016). Estos modelos son importantes para los sistemas de gestión de calidad del aire porque son ampliamente utilizados por las agencias encargadas de controlar la contaminación del aire para identificar las contribuciones de la fuente a los problemas de calidad del aire y ayudar en el diseño de estrategias efectivas para reducir los contaminantes dañinos del aire, una amplia investigación (Khaniabadi, y otros, 2017) ha demostrado las asociaciones entre la exposición a contaminantes comunes del aire (por ejemplo monóxido de carbono y material particulado) y criterios de valoración de mala salud, como aumento de hospitalizaciones y aumentos de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, la exposición aguda o crónica a partículas en suspensión en el aire están bien correlacionadas con efectos adversos. Por estos motivos, los modelos de calidad del aire pueden ser utilizados para predecir concentraciones futuras de contaminantes de múltiples fuentes después de la implementación de un nuevo programa regulatorio con el fin de estimar la efectividad del programa

en la reducción de exposiciones dañinas para los seres humanos y el medio ambiente.

Screen3 es un modelo de dispersión de tipo gaussiano, que entrega resultados de dispersión atmosférica, tales como máxima concentración, altura de la pluma, parámetros de dispersión verticales y laterales, frente a distintos posibles escenarios, tales como cercanía al mar, diferentes estabilidades atmosféricas o terrenos complejos, por solo nombrar a algunos (US EPA, 1995).

1.1. Justificación

Las herramientas de modelación han sido utilizadas para predecir concentraciones de contaminantes, principalmente en las zonas urbanas e industriales. Sin embargo, existen retos actuales para generar información en las zonas residenciales rurales y periurbanas, que son principalmente las zonas más vulnerables del país. Se desconoce la contribución en la calidad del aire de las emisiones de las chimeneas de estufas mejoradas y de fuegos abiertos, tanto de la comunidad donde se encuentran, como de comunidades aledañas. Actualmente, se sabe que estufas con chimenea ventilan las emisiones fuera del cuarto de cocinado, pero se tienen poca información acerca de las concentraciones al exterior (outdoors). Sobre todo, solamente se han realizado ejercicios de modelación que no necesariamente reflejan las condiciones de una localidad.

Este trabajo busca responder a las incógnitas mencionadas, tomando como caso de estudio una localidad del estado de Michoacán, en donde el uso de biomasa es prioritario en la gama de combustibles utilizados. Estos resultados serán útiles para la toma de decisiones en programas sociales, ambientales y de salud para mejorar la calidad de vida de usuarios que viven en pobreza energética. Se tiene documentado como parte del índice de vulnerabilidad a la COVID-19, que la exposición a contaminantes con concentraciones superiores a las recomendadas por la OMS potencializa los impactos a la salud de este virus.

1.2. Planteamiento del problema

El uso de la energía en el sector residencial satisface las necesidades básicas de la sociedad, pero el uso de tecnologías con pobres eficiencias térmicas y de combustión (principalmente fuegos abiertos) para satisfacer tareas de cocción en zonas rurales producen emisiones con impactos en la calidad del aire (ambiente e intramuros). Actualmente, se carece de información acerca del comportamiento de los contaminantes emitidos durante el uso de estos dispositivos.

1.3. Hipótesis

Las emisiones de los contaminantes producto de la combustión de tecnologías con pobres eficiencias térmicas y de combustión, contribuye a aumentar las concentraciones de los contaminantes criterio monóxido de carbono (CO) y material particulado de 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}), hasta el punto de exceder la norma de salud establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 7mg/m³ y 35 µg/m³ respectivamente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Modelar y simular la dispersión de Material particulado de 2.5 µm de diámetro (PM_{2.5}) y Monóxido de Carbono (CO) producidas por la combustión de dispositivos de cocción en la comunidad de Jesús del Monte, Michoacán empleando un modelo de dispersión de pluma gaussiana y el simulador gaussiano Screen3.

1.4.2. Objetivos Particulares

1. Recopilar datos de entrada: parámetros técnicos de las fuentes de emisión (tasas de emisión) y datos meteorológicos.
2. Realizar el estudio de vientos y rosas de vientos a partir de la información meteorológica.
3. Seleccionar el área de estudio y determinar la topografía del terreno.
4. Cuantificar concentraciones de CO y PM_{2.5} en distintos escenarios mediante el modelo gaussiano Screen3 empleando el simulador Screenview.
5. Cuantificar concentraciones de CO y PM_{2.5} en distintos escenarios mediante el modelo de Dispersión de pluma Gaussiano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación atmosférica

De acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente la contaminación puede definirse como la presencia en el medio ambiente de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, que perjudiquen o molesten la vida, la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna, o degraden la calidad del aire, del agua, de la tierra, de los bienes, de los recursos de la Nación o de los particulares. Esta misma Ley define a un contaminante como toda aquella sustancia o materia, o sus combinaciones o compuestos derivados químicos o biológicos, tales como humos, polvos, gases, cenizas, bacterias, residuos y desperdicios y cualquier otro que al incorporarse o adicionarse al aire, agua o tierra, puedan alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente; así como toda forma de energía, como calor, radioactividad, ruidos, que al operar sobre aire, agua o tierra, altere su estado normal y original, aquí se puede apreciar que no siempre se necesita de un cuerpo con materia para que se denomine contaminante, sino que también entran en juego a disposición legal y normativa, ciertas formas de expresión de la energía que pueden perturbar algunas de las condiciones del medio para que este siga su curso original (AL & L., 2003).

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean estas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puedan provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes en contacto y de los elementos que constituyen el paisaje. Este concepto nos indica que el papel importante de los contaminantes lo juega la concentración a la que se encuentran en un equilibrio geológico por restablecer las condiciones a las cuales permanece el aire limpio, sin causar un daño visible en los seres vivos. La contaminación del aire suele deberse a actividades humanas y la causa principal es la combustión a gran escala de combustibles fósiles, el aire contaminado contiene concentraciones mayores de gases y partículas que no se presentan normalmente en la atmósfera.

La contaminación del aire no es un hecho fortuito que pueda ser explicado mediante una relación simple causa efecto; al contrario, es un fenómeno complejo que depende de variables como la cantidad de energéticos

consumidos, calidad y tipo de combustibles empleados, tipo y estado de operación de dispositivos de combustión y de los mismos procesos industriales prevalientes, operación de tecnologías de control de combustión, estado de textura de los suelos en zonas urbanas y rurales (generadores de partículas y polvos), condiciones meteorológicas del área y de la fisicoquímica que define los procesos de interacción de los contaminantes y los componentes del aire y su remoción.

2.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

2.2.1 Por su origen

2.2.1.1 Contaminantes primarios

Son aquellos emitidos de manera directa a la atmósfera (Manahan, 2007) como resultado de un proceso de tipo natural o antrópico, estos contaminantes forman parte de la atmósfera en la misma forma en que fueron emitidos, tales como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas de polvo entre otros.

2.2.1.2 Contaminantes secundarios

Estos contaminantes se generan en la atmósfera como consecuencia de procesos químicos atmosféricos sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes en la atmósfera (Manahan, 2007). Son importantes contaminantes secundarios el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que se forma por la oxidación del dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), que se forma al oxidarse el contaminante primario monóxido de nitrógeno (NO) y el ozono (O_3) que se forma a partir del oxígeno gas (O_2).

2.2.2 Por su estado físico

2.2.2.1 Contaminantes gaseosos

Incluyen humos y vapores que no se depositan y que permanecen en la atmósfera. Los contaminantes gaseosos siguen aproximadamente el comportamiento de gases ideales y desde el punto de vista de su medición, se reportan en concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En ambientes exteriores e interiores los vapores y contaminantes gaseosos aparecen en diferentes concentraciones. Los

más comunes son el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) e hidrocarburos.

2.2.2.2 Partículas

En contaminación atmosférica se reconoce como partícula a cualquier material sólido o líquido con un diámetro que oscila entre 0.0002 y 500 micrómetros (μm). Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea o estar constituida por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los componentes orgánicos se encuentran: carbono, fenoles, ácidos, alcoholes y material biológico mientras que entre los compuestos inorgánicos se encuentran: nitratos, sulfatos, polímeros, silicatos, metales pesados (hierro, plomo, manganeso, zinc o vanadio). El material particulado (PM) es una mezcla de partículas líquidas y sólidas liberadas en la atmósfera provenientes de diferentes fuentes, varían en tamaño y composición (D' amato, 2000) siendo estas dos variables las que definen la toxicidad y los efectos sobre la salud humana. Las partículas generadas por los procesos de combustión presentan diámetros desde 0.003 a 1 μm y sus efectos están determinados por la composición física y química de las mismas.

Las partículas pueden clasificarse de acuerdo con:

1. Su efecto en la salud humana.

El riesgo a la salud por partículas lo constituyen su concentración en el aire y el tiempo de exposición; sin embargo, el tamaño es la característica física más importante para determinar su toxicidad y efectos en la salud humana. En función de esta característica las partículas se clasifican en:

- 1.1. *Partículas sedimentables ($D_p < 10 \mu\text{m}$):* Son partículas que por su peso tienden a precipitarse con facilidad, razón por lo cual permanecen suspendidas en el aire en periodos cortos de tiempo. Por lo general no representan riesgos significativos a la salud humana, debido a que son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, sin embargo, la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.
- 1.2. *Partículas menores a 10 μm – PM_{10} ($D_p \leq 10 \mu\text{m}$):* Son partículas de diámetro aerodinámico equivalente o menor a 10 μm . Se consideran

perjudiciales para la salud debido a que no son retenidas por el sistema natural del tracto respiratorio, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su exposición a corto plazo puede causar deterioro de la función respiratoria. A largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, cáncer o muerte prematura

- 1.3. *Partículas menores a 2.5 μm – $\text{PM}_{2.5}$ ($D_p \leq 2.5 \mu\text{m}$):* Son partículas de diámetro equivalente o menor a 2.5 μm . Representan un mayor riesgo para la salud humana, por penetrar hasta los alvéolos pulmonares profundos. Estudios recientes demuestran que las $\text{PM}_{2.5}$ tiene la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementado el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

2. Como producto derivado de un proceso natural o antropogénico (origen).

- 2.1. Polvos: son partículas sólidas pequeñas (de 1 a 1000 μm), se forman por fragmentación en procesos de molienda, cribado, explosiones y erosión del suelo. Se mantienen en suspensión y se desplazan mediante corrientes de aire.
- 2.2. Humo: son partículas sólidas finas que resultan de la combustión incompleta de materiales orgánicos como combustibles fósiles, carbón y madera. Su diámetro oscila en el intervalo de 0.5 a 1 μm .
- 2.3. Cenizas volantes: son partículas finas no combustibles que provienen de la combustión del carbón. Su tamaño oscila entre 1 y 1000 μm .
- 2.4. Aerosoles: es una suspensión en el aire de partículas finas líquidas o sólidas. Miden entre 0.01 y 100 μm de diámetro. Las partículas de los aerosoles cubren un elevado intervalo de tamaños, desde agrupaciones moleculares, pasando por nanómetros hasta decenas de micrómetros.
- 2.5. Partículas ultrafinas: comprende los aerosoles de diámetro de 0.01 a 0.1 μm . Estos son productos de la nucleación homogénea de vapores saturados (SO_2 , NH_3 , NO_x y productos de la combustión).
- 2.6. Partículas finas: comprende los aerosoles de diámetro entre 0.1 y 2.5 μm . Son formados en la coagulación de partículas ultra finas, a través de procesos de conversión (gas a partícula) conocido como nucleación heterogénea y por condensación de gases.

2.2.3 Por su composición química

2.2.3.1 Orgánicos

Son aquellos que su estructura está conformada por hidrógeno y carbono, como son los hidrocarburos y sus derivados.

2.2.3.2 Inorgánicos

Son compuestos que no contienen carbono en su composición, excepto los simples como monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), así como partículas metálicas y óxidos de nitrógeno (NO_x).

2.3 Principales fuentes de contaminación

Es importante recordar que el comportamiento de los contaminantes está directamente relacionado a los factores climáticos y topográficos, además de la fuente emisora del cual, se generan; el control de estos debe ejecutarse desde su origen, por ello es importante determinar cuáles son sus fuentes, las cuales se presentan a continuación:

2.3.1 De acuerdo a su origen

2.3.1.1 Naturales

Son todos los procesos o fenómenos de emisión que se dan en los ecosistemas sin que exista la intervención del hombre y son resultado de la acción de eventos geológicos, meteorológicos y metabólicos. Dentro de estos se puede mencionar las erupciones volcánicas, tolvaneras, incendios forestales y procesos erosivos (Bracho & Bravo, 2003).

2.3.1.2 Antropogénicas

Son aquellas que se producen por emisiones resultantes de las actividades humanas, como lo son las industriales, actividades agrícolas, quema de combustibles (carbón vegetal o mineral, hidrocarburos o biomasa), vehículos, cría de ganado entre otras (Bracho & Bravo, 2003).

2.3.2 Por su movilidad

2.3.2.1 Fuentes fijas

Son definidas como aquellas que guardan siempre un mismo lugar de emisión o que permanecen estables con respecto al tiempo considerando su punto de expulsión de contaminantes. A este grupo pertenecen las industrias petroleras, químicas, termoeléctricas, textiles, química, celulosa, etc. (Romero & Reyes, 2009) y actividades micro escala como actividades cotidianas en los hogares; todos ellos con el factor común que la fuente no se mueve.

2.3.2.2 Fuentes móviles

Son aquellas en que el punto de emisión no permanece constante con respecto a su localización a través del tiempo, dentro de este grupo se tiene a equipos y maquinarias no fijas, como los motores de combustión y similares, que debido a sus operaciones generan o pueden generar emisiones de contaminantes hacia la atmósfera (automóviles, camiones de carga, camionetas y transporte público en general) (Romero & Reyes, 2009). La fuente puede aparecer en distintos lugares en función del tiempo.

2.3.3 Por su distribución espacial

2.3.3.1 Fuentes puntuales

Son fuentes donde la totalidad de las emisiones contaminantes a la atmósfera son establecidas a nivel de cada establecimiento, esto hace posible monitorear en ellas el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa vigente para cada lugar, permitiendo actualizar el inventario de fuentes de forma constante, dentro de este tipo de fuentes están, la industria de la metalurgia, automotriz, avicultura y producción ganadera (Solís & López, 2003).

2.3.3.2 Fuentes de área

Son aquellas fuentes distribuidas en una zona específica, cuyas emisiones particulares no es posible evaluar y cuantificar de forma precisa. En forma individual emiten cantidades específicas, sin embargo, en conjunto tiene una gran relevancia. A partir de estas consideraciones dentro de las fuentes que podemos mencionar se encuentran los locales comerciantes, de servicio y hogares, rellenos sanitarios, distribución y almacenamiento de gasolina,

limpieza, plantas de tratamiento de aguas residuales entre otras (Solís & López, 2003).

2.4 Factores meteorológicos que describen el comportamiento de dispersión de los contaminantes

Influyen directamente en la dispersión de los contaminantes ya que determinan el estado y movimiento de las masas de aire, de esta forma dificultarán o facilitarán la dispersión de los contaminantes (UJAEN, 2009), los más importantes se muestran a continuación:

2.4.1 Temperatura

Es un parámetro a tener en cuenta en el comportamiento de los contaminantes, a medida que la temperatura aumenta los gases se hacen más volátiles, ocasionando una mayor facilidad en su dispersión. Existen momentos puntuales en los que se generan capas frías por debajo de capas con mayor temperatura, a este fenómeno se le conoce como inversión térmica, que limita la circulación vertical del aire, encerrando los contaminantes en áreas específicas (Sánchez, 2015).

2.4.2 Dirección del viento

La dirección mide la componente horizontal de la velocidad del viento. En meteorología es importante tener en cuenta que la dirección nos indica de dónde viene el viento, no hacia dónde va, por ejemplo, el viento norte es el que sopla desde el norte, se mide en grados, desde 0° (excluido) hasta 360° (incluido), girando en el sentido de las agujas del reloj en el plano horizontal visto desde arriba. Valores cercanos a 1° y 360° indican viento del norte, cercanos a 90° valores del este, 180° del sur y 270° del oeste.

2.4.2.1 Rosa de Vientos

El viento que prevalece en un rango de tiempo puede ser representado por medio de una rosa de los vientos, la cual indica el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla en diferentes direcciones. La gráfica consiste en utilizar barras o extensiones que van desde el centro de un círculo hacia un punto determinado que ilustra la dirección del viento, la longitud de cada extensión indicará el

porcentaje de tiempo en el que el viento se dirigió hacia esa dirección (Ahrens, 1998).

Estas mediciones pueden presentarse ya sea en forma gráfica o tubular. La Tabla 1 presenta las ocho direcciones primarias y las ocho secundarias:

Tabla 1. Direcciones primarias y secundarias de las Rosa de Vientos.

Primarias	Secundarias
N (norte)	NNE (nor noreste)
S (sur)	ENE (este noreste)
E (este)	ESE (este sureste)
W (oeste)	SSE (sur sureste)
NE (noreste)	SSW (sur suroeste)
NW (noroeste)	WSW (oeste suroeste)
SE (sureste)	WNW (oeste noroeste)
SW (suroeste)	NNW (nor noroeste)

La rosa de vientos se ha empleado en diversos estudios. (Wade, y otros, 2006) emplearon un diagrama de rosa de los vientos para determinar el comportamiento de diferentes contaminantes (SO_2 , CO, NO_x , O_3 y $\text{PM}_{2.5}$) dentro de diferentes puntos medidos y así determinar su posible procedencia y dirección, (Barton, Buttler, Zarzecki, Flaherty, & Kaiser, 2006) emplearon el modelo de la rosa de los vientos para analizar la dispersión de perfluorooctanoatos en los límites de una planta procesadora de fluoropolímeros con el fin de comparar los valores monitoreados, con los que se podrían llegar a deducir por medio de dicho modelo.

2.4.3 Velocidad del viento

El viento se define como una masa de aire que se desplaza horizontalmente de un punto a otro. La rapidez con que esta corriente se desplaza, se denomina velocidad del viento, esta velocidad es importante para la dispersión en tres formas distintas: cualquier emisión se diluye por un factor proporcional a la velocidad del viento que pasa por la fuente, la turbulencia mecánica, que

aumenta la mezcla y la dilución es creada por el viento y una fuente flotante (caliente o fría) se libera más en velocidades de vientos más altas, manteniéndola más cerca de su altura de liberación (Tiwary & Colls, 2010).

La fricción con el suelo reduce la velocidad del viento cerca de la superficie. El cambio de la velocidad con respecto a la altura se puede aproximar mediante la siguiente ecuación de velocidad:

$$v(z) = v_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^P$$

Aquí:

$v(z)$ = velocidad del viento a la altura z

v_0 = velocidad del viento medida por un anemómetro a la altura z_0

P = exponente que varía con la estabilidad atmosférica

2.4.4 Turbulencia

La Turbulencia es definida como el movimiento irregular e intenso del aire debido a la existencia de remolinos superpuestos y es la causa principal de la dispersión de los contaminantes. La turbulencia se ha clasificado de acuerdo a su origen en mecánica y térmica. En la primera existe una dependencia con la velocidad del viento y sobre todo de la rugosidad del terreno, además permite la difusión horizontal y vertical, la segunda depende principalmente del gradiente de temperatura que existe al variar la altura y es la causa principal del mezclado vertical.

2.4.5 Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica es un factor clave a la hora de estimar en qué grado los contaminantes se dispersan o "diluyen" en aire a partir del lugar en los que son emitidos.

La estabilidad atmosférica se puede asociar al gradiente de temperatura, comparando con el gradiente de temperatura ambiental es el gradiente de

temperatura seca adiabática. Bajo condiciones adiabáticas, un volumen templado de aire ascendente se comporta como un globo. Se expandirá hasta que su densidad se iguale con la del aire circundante (Park, Park, & Ho, 2009).

2.4.5.1 Determinación del gradiente de temperatura por desplazamiento adiabático vertical de las masas de aire

La ecuación de movimiento para las masas de aire en flujo lento vertical es:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (1)$$

Aquí:

$\frac{\partial p}{\partial z}$ = gradiente vertical de presión

ρ = densidad del aire

g = aceleración de la gravedad

En procesos adiabáticos la relación que vincula la temperatura con la presión es:

$$T = C p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2)$$

Con $\gamma = C_p/C_v = \text{constante}$; luego:

$$\frac{dT}{dz} = C \frac{\gamma - 1}{\gamma} p^{-1/\gamma} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

La ecuación general de los gases ideales es:

$$p = \rho RT \quad (4)$$

A partir de la ecuación (1) se obtiene:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (3) resulta:

$$\frac{dT}{dz} = C \frac{\gamma - 1}{\gamma} p^{-1/\gamma} (-\rho g) \quad (6)$$

De la ecuación (4) resulta:

$$T = \frac{p}{\rho R} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (2):

$$\frac{p}{\rho R} = C p p^{-1/\gamma} \rightarrow C p^{-1/\gamma} = \frac{1}{\rho R} \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (6) se obtiene:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{R} \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (9)$$

Para el aire $\gamma = 1.41$; $R = 159.6 \frac{m^2}{s^2 \circ R}$ y $g = 9.8 m/s^2$. Sustituyendo:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{9.8}{159.6} \frac{1.41 - 1}{1.41} \cong -1.8 \times 10^{-2} \frac{\circ F}{m} \quad (10)$$

Si $1^{\circ}F = 0.55^{\circ}C$, entonces:

$$\frac{dT}{dz_{ad}} = -1.8 \frac{^{\circ}F}{1000m} = -9.8 \frac{^{\circ}C}{1000m} \quad (11)$$

El aire seco se expande $9.8^{\circ} C$ por cada 100 metros de altura. Luego identificamos los siguientes casos:

- 1) $\frac{dT}{dz} > \frac{dT}{dz_{ad}} \rightarrow$ *atmosfera inestable*
- 2) $\frac{dT}{dz} = 0 \rightarrow$ *atmosfera neutra*
- 3) $\frac{dT}{dz} < \frac{dT}{dz_{ad}} \rightarrow$ *atmosfera estable*

Concluyendo una atmósfera Inestable se da cuando el gradiente de temperatura ambiental excede del gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento en la ascensión es mayor a 1 grado centígrado por cada 100 m, una atmósfera neutralmente Estable tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiental (GTA), es igual al gradiente de temperatura seca Adiabática (GTSA) o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento es igual aproximadamente 1 grado centígrado cada 100 m y una atmósfera Estable tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiente es menor que el gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento, es menor a 1 grado centígrado por cada 100 m (Velasteguí, Nieto, Cahueñas, & Parra, 2018).

2.4.5.2 Clases de Estabilidad Atmosférica

Los parámetros atmosféricos son críticos para el uso de modelos de difusión de contaminantes. En efecto, los coeficientes de dispersión que aparecen en las fórmulas Gaussianas, están determinados por el mezclado o poder dispersivo del flujo turbulento dentro de la capa límite de la atmósfera. Para este propósito, (Pasquill, 1961) propuso un método que permite determinar los coeficientes de dispersión a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, definidas como categorías de estabilidad. La ventaja de esta clasificación es que,

para aplicarla, solamente es necesario utilizar información convencional suministrada por el servicio meteorológico local. Pasquill propuso seis categorías de estabilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de atmósferas por estabilidad.

Tipo	Condición	Categoría
1	Extremadamente inestable	A
2	Moderadamente inestable	B
3	Ligeramente inestable	C
4	Atmósfera neutral	D
5	Ligeramente estable	E
6	Moderadamente estable	F

El método permite asociar a cualquier situación atmosférica, alguna de las seis categorías anteriores. Los factores determinantes de las clases de estabilidad son: la velocidad del viento, nubosidad y el flujo neto de radiación que llega a la Tierra, que afecta al gradiente térmico vertical, a la presencia o ausencia de actividad convectiva y a la dinámica de la capa de mezclado. Los dos primeros parámetros se miden de manera rutinaria en cualquier estación meteorológica, la insolación en cambio no, pero puede calcularse a partir de parámetros astronómicos (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de atmósferas por insolación y nubosidad.

Velocidad del viento	Condición diurna insolación			Condición nocturna nubosidad	
	Fuerte	Media	Ligera	Ligera a media	Mayor que media
(m/s)					
< 2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
4	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
< 6	C	D	D	D	D

2.5 Influencia del medio circundante

2.5.1 Influencia del terreno local

El terreno local puede tener una influencia en el clima y sus características como en la estabilidad del aire. Un viento procedente de un área a cierto nivel cambia de dirección al alcanzar colinas, altas estructuras o montañas, así que la obstrucción debe estar bien localizada. El aire es forzado a elevarse para sobrepasar dichas obstrucciones y puede o no convertirse en inestable dependiendo de la velocidad de ascenso, humedad y del contraste de enfriamiento existente con el aire superpuesto alrededor. Ejemplificando, la zona de los Ángeles, del que proviene aire del mar, no tiene suficiente momentum para rebasar las montañas adyacentes, resultando un clima de inversiones térmicas y aire moderadamente estable, como se mencionó la naturaleza del terreno, influencia en la magnitud de las variaciones diarias de temperatura. Pequeñas variaciones diarias de temperatura, resulta en una gran tendencia a favor de un aire más estable. En contraste en áreas con un gran relieve topográfico se experimentan grandes corrientes de aire, denominadas brisas, éstas tienden a elevarse durante el día, cuando el piso del valle está relativamente caliente y tienden a caer de noche cuando las obstrucciones se enfrían más rápido que lo que se enfría el piso del valle que se encuentra a una altura menor. El efecto mayor que logra la estructura topográfica del terreno local es la introducción de inestabilidad en los movimientos del aire que promueve la turbulencia y las corrientes llamadas Eddy.

Las corrientes Eddy son el resultado aerodinámico de la turbulencia cuando esta se mezcla en su camino con una corriente de aire y termina en diferentes corrientes, cada una de diferente magnitud, momentum y dirección. El coeficiente de difusión de la corriente Eddy es proporcional al producto de la velocidad del viento y una función de la turbulencia existente.

Las obstrucciones incluyen altas estructuras, irregularidades naturales (depresiones y rugosidad inusual del terreno) y efectos topográficos (valles, lagos, montañas, pequeños espacios arbolados etc.).

2.5.2 Influencia topográfica del medio rural y urbano

Existen diferentes parámetros para la clasificación y determinación de los efectos causados por la topografía presente alrededor de la chimenea o fuente contaminante. Los problemas que presentan estas determinaciones pueden ser

de lo más diversos y abarcan parámetros que hasta hoy son muy difíciles de entender y predecir con exactitud. El efecto de la rugosidad de la superficie es la disminución de velocidad del flujo cercano a ésta y la transformación de su energía cinética en turbulenta. Esto nos da como resultado las siguientes posibilidades para la cuantificación de la rugosidad:

- Rugosidad a escala local en la que decrece la velocidad del flujo cuando decrece la altura.
- Rugosidad a mediana escala en donde decrece la velocidad de flujo como este mismo avanza sobre un terreno con discontinuidades.
- Rugosidad con relación directa al nivel de turbulencia.

Para poder clasificar las rugosidades por su estructura y aplicar el criterio adecuado de dispersión para cualquier tipo de terreno, se necesita considerar muchos modelos a escala en equipos como el túnel de viento y equipos aerodinámicos parecidos. La clasificación más clásica para la estimación de rugosidad (Perrier, 1972); tiene las siguientes cuatro categorías:

- a) Suave (smooth): el flujo turbulento corre sobre un terreno muy poco irregular, sin obstáculos que sean los suficientemente prominentes como para producir discontinuidades en flujo de aire. Ejemplos, orilla del mar, lugares enlodados y con nieve.
- b) Semi suave (semi-smooth): el flujo turbulento corre sobre una superficie con obstáculos aislados que se encuentran los suficientemente separados, que las discontinuidades individuales son disipadas antes de alcanzar el siguiente obstáculo. Ejemplos, terreno con pasto y colinas bajas, pocos obstáculos y separados más de 20 m.
- c) Flujo inferido (wake-interfered flow): ocurre cuando el promedio de distancia entre obstáculos son del mismo tamaño que la longitud de las discontinuidades por alguno de ellos en forma individual. Como este efecto no es aditivo para cada una de las interfaces, el flujo turbulento no llega generalmente al equilibrio. Ejemplos, altos valles, parques, prados con obstáculos separados de 10 a 20 m.
- d) Flujo revuelto (skimming Flow): ocurre cuando los obstáculos están tan cerca uno de otro que el flujo que pasa por las cavidades entre éstos, no se

vuelve a mezclar con el conjunto de las discontinuidades logradas para liberar la energía acumulada como un todo, sino que provocando más discontinuidades aun habiendo pasado ya por todos los obstáculos. Ejemplos, bosques tupidos, suburbios, con el panorama lleno de obstáculos y una distancia menor a 10 m entre ellos.

La alta concentración de contaminantes se esperaría que aparezca viento abajo, al momento inmediato en que la pluma toca la punta de un obstáculo, pero ciertas observaciones en plantas termoeléctricas centradas en valles no muy amplios, aseguran que la máxima concentración se alcanza en lugares más cercanos a los obstáculos, exactamente en donde termina la corriente Eddy formada por discontinuidades

2.6 Modelos de contaminación del aire

Los modelos de contaminación del aire nos ayudan a comprender la forma en la que se comportan los contaminantes del aire en el medio ambiente, utilizan ecuaciones matemáticas que describen a la atmósfera y los procesos químicos y físicos dentro de la nube contaminante. Un modelo perfecto permitiría predecir las variaciones espaciales y temporales en la concentración de contaminantes con suficiente precisión para todos los propósitos prácticos y haría innecesarias las mediciones, lamentablemente estamos lejos de este ideal, el proceso de desarrollo de un modelo va de la mano con los avances en la medición. Razones para modelar (Tiwary & Colls, 2010):

- Identificar a las fuentes responsables y en qué proporción de concentración afectan a cualquier receptor.
- Estimar la exposición en la población en una resolución espacial o temporal más alta en comparación a la medición.
- Focalizar la reducción de emisiones en los mayores contribuyentes.
- Predecir cambios de concentración en el tiempo.

2.6.1 Familias principales de modelos de contaminación del aire

1. Modelos de dispersión: se basan en un conocimiento detallado de los procesos físicos, químicos y dinámicos de fluidos en la atmósfera. Permiten

- predecir la concentración en cualquier lugar y momento si se conocen las emisiones y los parámetros de control.
2. Modelos de receptores: se basan en las relaciones entre un conjunto de datos de concentraciones medidas en el receptor y un conjunto de datos de emisiones que podría afectar esas concentraciones.
 3. Modelos estocásticos: se basan en las relaciones matemáticas – semi empíricas entre las concentraciones de contaminantes y cualquier factor que pueda afectarlos, independientemente de los procesos físicos – atmosféricos.
 4. Modelos de caja (Box models): en estos modelos las entradas y salidas de un volumen definido (caja) de la atmósfera se utiliza para calcular la concentración media dentro de dicho volumen. Los modelos de caja se basan en la conservación de la masa. El sitio se trata como una caja en la que se emiten contaminantes y se someten a procesos químicos y físicos. Requiere la entrada de datos meteorológicos y emisiones simples y se permite el movimiento de contaminantes dentro de la caja, el interior de la caja no está definido y la masa de aire se trata como si estuviera bien mezclada y las concentraciones fueran uniformes en todas partes. Una ventaja del box model es que, debido a la meteorología simplificada, éstos pueden incluir esquemas de reacción química más detallados y un tratamiento detallado de la dinámica de aerosoles, que son capaces de representar mejor la química y física de las partículas en la atmósfera. Sin embargo, después de introducir las condiciones iniciales, el box model simula la formación de contaminantes dentro de la caja sin proporcionar ninguna información sobre las concentraciones locales de los contaminantes, por esta razón no son adecuados para modelar las concentraciones de partículas en un entorno local, donde las concentraciones y, por lo tanto, la dinámica de las partículas está muy influenciada por cambios locales como la dirección del viento y las emisiones.
 5. Modelado 3D o CFD: supera las limitaciones del modelado de dispersión convencional. Estos incluyen; inexactitud en las predicciones cerca de la fuente y a bajas velocidades del viento, inexactitud cerca del suelo (Tiway & Colls, 2010). Los modelos computacionales de dinámica de fluidos proporcionan un análisis complejo del flujo de fluidos basado en la conservación de masa y el momentum mediante la resolución de la ecuación de Navier – Stokes utilizando métodos de diferencias finitas y volumen finito en tres dimensiones. La turbulencia se calcula clásicamente utilizando métodos de cierre $k - \epsilon$ para calcular el parámetro de viscosidad de remolino

isotrópico presente en las ecuaciones de transporte de cantidad de movimiento y de contaminación, lo que supone que un contaminante se diluye por igual en todas las direcciones. Este tratamiento funciona adecuadamente en una capa límite plana, sin embargo, cuando existe una capa límite estratificada, el método de cierre debe modificarse para incluir la fuerza de Coriolis y la cizalladura del viento reducida en la atmósfera superior, lo que da como resultado una sobreestimación de la viscosidad de remolinos. (Gidhagen, y otros, 2003) informaron de distintos modelos de CFD mostraron una buena concordancia en el campo de flujo de viento general, pero demostraron que, aunque las entradas eran idénticas, los modelos generaban grandes diferencias en velocidades y niveles de turbulencia.

2.6.2 Modelos de dispersión

El aspecto cualitativo de la teoría de dispersión es describir el destino de una emisión a la atmósfera desde un punto, área o fuente lineal. Cuantitativamente, la teoría de dispersión proporciona un medio para estimar la concentración de una sustancia en la atmósfera, dada la información específica sobre los factores meteorológicos y la geometría y fuerza de la fuente. Los modelos de dispersión incluyen:

- Modelos eulerianos que resuelven numéricamente la ecuación de difusión atmosférica. Los modelos eulerianos trabajan en la medición de las propiedades de la atmósfera a medida que pasa por un punto fijo.
- Modelos gaussianos que se basan en la distribución de probabilidad gaussiana (normal) de las fluctuaciones del vector del viento (y por lo tanto de la concentración de contaminantes). Estrictamente estos son un subconjunto de los modelos eulerianos, pero generalmente se tratan como un grupo propio.
- Modelos lagrangianos: estos modelos son similares a los modelos de caja en que definen una región de aire que contiene una concentración inicial de contaminantes. El modelo lagrangiano entonces sigue la trayectoria de la "caja" a medida que se mueve a favor del viento. La concentración es un producto de un término fuente y una función de densidad de probabilidad a medida que el contaminante se mueve de x a x' . Los modelos lagrangianos

incorporan cambios en la concentración debido a la velocidad media del fluido, la turbulencia de los componentes del viento y la difusión molecular. Funcionan bien tanto para condiciones homogéneas y estacionarias en terreno plano (Oettl, y otros, 2001) (Tsuang, 2003) y para condiciones heterogéneas e inestables en terreno complejo (Du, 2001) (Hurley, y otros, 2003). Es posible modelar la química no lineal usando la superposición de una cuadrícula de concentración en el dominio, seguida del cálculo de la concentración en cada cuadrícula o la partícula puede tratarse como una caja expandida y el módulo fotoquímico del modelo aplicado a cada caja. Los datos meteorológicos calculan la varianza de las fluctuaciones de la velocidad del viento y la función de autorregulación lagrangiana (Holmes & Morawska, 2006).

La dispersión se debe esencialmente a la turbulencia, y esta se produce con una gran variedad de escalas de longitud en la atmósfera (Tiwary & Colls, 2010). Por lo tanto, hay más familias de modelos en función de la escala de duración (o tiempo) de interés:

- Macro escala (≈ 1000 km o días): el flujo atmosférico es impulsado por fenómenos sinópticos como áreas de alta o baja presión. Por ejemplo, el transporte a larga distancia de la contaminación del aire desde Europa Central al Reino Unido.
- Meso escala (10 a 100 km u horas): el movimiento del aire es impulsado sinópticamente, pero modificado por efectos locales como la rugosidad de la superficie y los obstáculos. La dispersión de las emisiones de una chimenea de una central eléctrica a un campo es un ejemplo a meso escala.
- Mico escala (≤ 1 o minutos): el flujo de aire depende de las características locales, por ejemplo, flujos urbanos de cañerías callejeras.

2.7 Teoría de la dispersión de Gauss

En el método gaussiano, la idea central es la "liberación instantánea" de un contaminante desde una fuente puntual. Ésta "bocanada" se mueve a favor del viento a lo largo de la dirección media del viento. Al hacerlo se expande en volumen, incorporando aire de dilución a su alrededor y reduciendo su concentración. La bocanada también experimenta pequeños movimientos

aleatorios, causados por turbulencias, alejándose de la dirección media. Una emisión continua se describe entonces como una serie infinitamente rápida de pequeñas bocanadas individuales (Tiwary & Colls, 2010).

La teoría de la dispersión gaussiana permite calcular la concentración debido a dicha trayectoria en cualquier lugar a favor del viento.

2.7.1 Modelo de Dispersión Gaussiana

Los contaminantes contenidos en una pluma de chimenea se dispersan según el comportamiento de ella, influenciada por factores externos e internos.

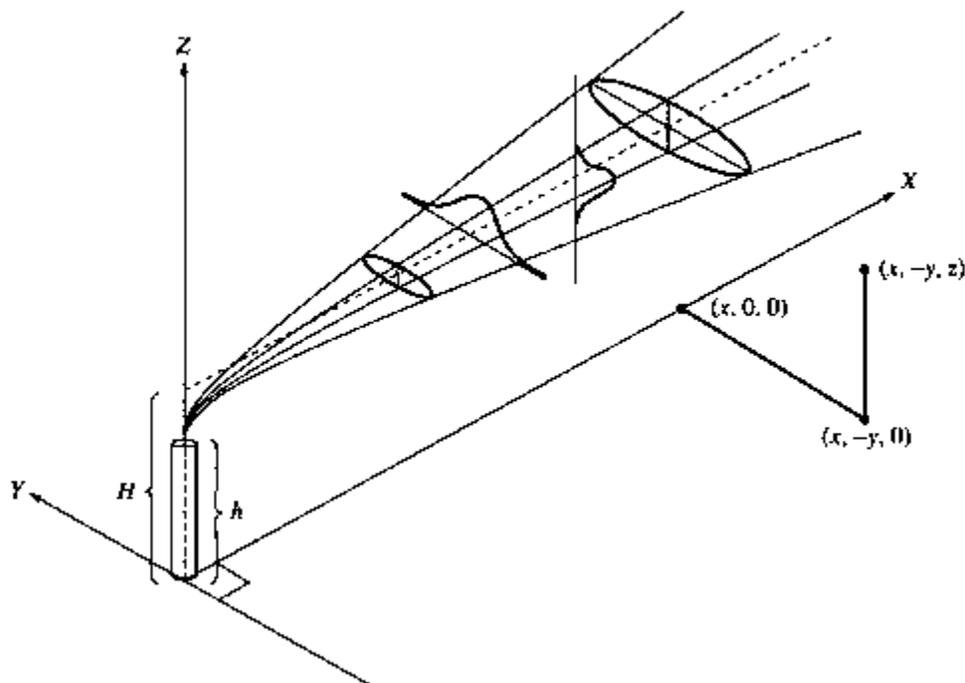


Ilustración 1. Geometría de un modelo gaussiano.

El desarrollo del algoritmo matemático se realiza en función de la hipótesis planteada:

- La fuente puntual se ubica en $x = 0$ y a la altura efectiva de la chimenea (H_e).

- La liberación es un estado estable (estacionario) y la difusión a lo largo de la dirección media del viento es despreciable en comparación con la advección (movimiento con el viento medio).
- La velocidad del viento se considera constante con la altura. Pero la variación de la velocidad del viento con la altura a menudo se puede describir mediante un perfil logarítmico.
- La dirección del viento es constante con la altura.
- El material es químicamente estable y no se deposita en el suelo. Esto significa que los gases no deben ser reactivos y las partículas deben tener un diámetro menor a 20 μm para que no sedimenten. Entonces se aplica la ecuación de continuidad; la integral de la concentración en todo el espacio en cualquier momento es igual a la masa total de material emitido.
- Las variaciones laterales y verticales de la concentración de material pueden describirse mediante distribuciones gaussianas que son funciones de x solamente.

Los parámetros que definen la distribución gaussiana son (Gallardo, 1997):

- Las desviaciones estándar σ_y y σ_z , que varían tanto con la distancia desde la fuente como por las condiciones meteorológicas existentes.
- La altura efectiva de la chimenea H_e , determinada por la altura física de la misma más la elevación que alcanza la pluma a la salida de la chimenea según el empuje térmico y la velocidad de salida de los gases.

El desarrollo matemático inicia postulando una expresión para el caso en el cual los contaminantes emanan a la altura de la chimenea y sin efecto de reflexión del suelo:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{v}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (\text{a})$$

Aquí:

C = concentración $\left(\frac{g}{m^3}\right)$

Q = tasa de emisión $\left(\frac{g}{s}\right)$

$$\pi = 3.141593$$

$$\bar{v} = \text{velocidad del viento } \left(\frac{m}{s}\right)$$

σ_y, σ_z = desviaciones normales horizontal y vertical respectivamente

z = distancia en el eje z (m)

h = altura de la chimenea (m)

H = altura efectiva de la chimenea (m)

2.7.2 Versiones de la ecuación Gaussiana

La ecuación (a) puede ser modificada, asumiendo que la pluma se reflejará a partir de una distancia en el eje x y dispersándose hacia la atmósfera desde el nivel del suelo. Para lograr esto es necesario usar una fuente imaginaria como la que se muestra en la Ilustración 2 la concentración será mayor a la determinada sin incluir la reflexión del contaminante, pues existe una superposición de dos curvas gaussianas, la primera es la fuente virtual en H y la otra en $-H$.

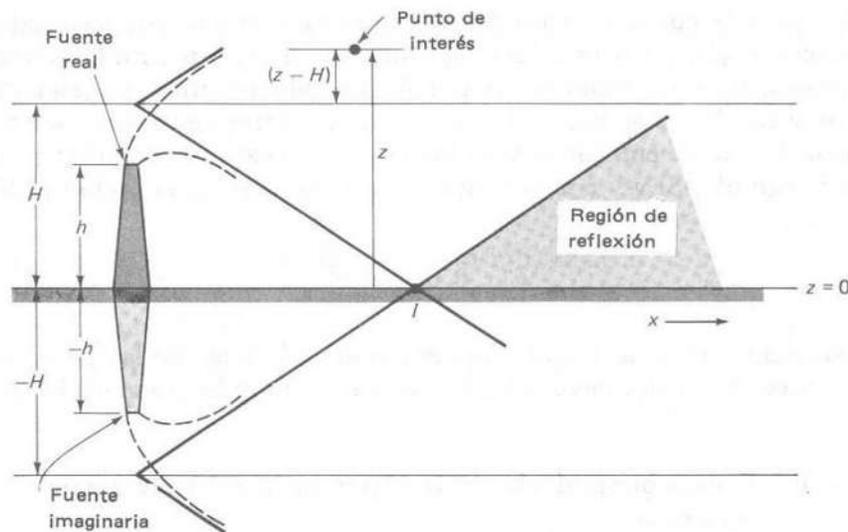


Ilustración 2. Efecto de reflexión del suelo.

El algoritmo matemático es el siguiente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{v}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left[\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right] \quad (b)$$

Si se desea conocer la concentración a nivel del suelo debido a una fuente elevada, delimitada para la superficie del suelo:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi\bar{v}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (c)$$

Concentración a nivel del suelo, debido a una fuente elevada, delimitada por la superficie del suelo, directamente a favor del viento de la fuente a nivel del suelo.

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\bar{v}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (d)$$

2.8 Modelo Screen3

Este modelo se basa en una metodología llamada "balance de población" (Himmelblau & Bischoff, 1976), que considera un dominio de factores discretos (no continuos) y cuantifica el número de individuos en intervalos, generando histogramas de respuesta que, para múltiples sistemas, pueden modelarse usando distribuciones "Normales". En caso de usarse un solo factor se obtiene la famosa curva en forma de campana (Ilustración 3), si se usan dos factores se obtiene una campana tridimensional (Ilustración 4).

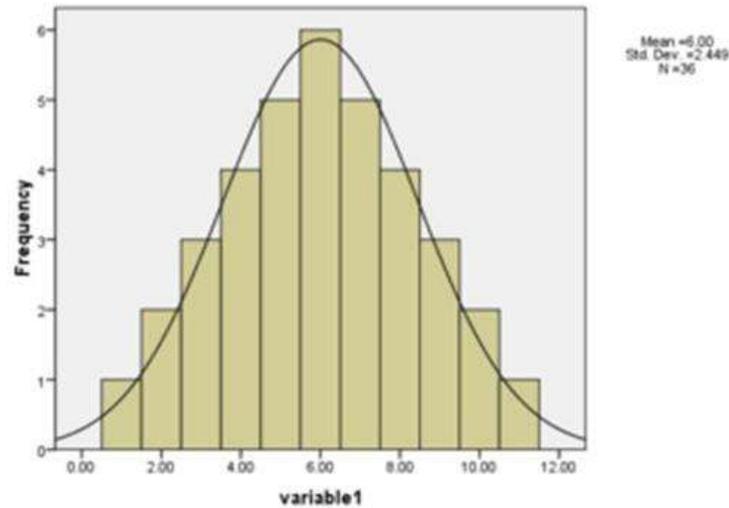


Ilustración 3. Histograma unidimensional y su distribución Normal.

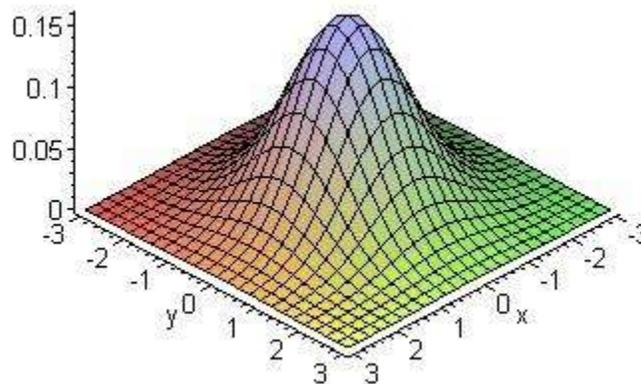


Ilustración 4. Histograma bidimensional y su distribución Normal.

Se pueden incluir más factores, pero ya no es posible visualizar la representación gráfica ni del histograma ni de su ajuste con distribuciones normales de órdenes superiores.

Además, las distribuciones normales se caracterizan por sus parámetros, como la estándar unidimensional, $[N(0, 1)]$, que tiene promedio '0' y desviación estándar '1'; y al ir aumentando de dimensión, aumentan el número de desviaciones estándar (una para cada dimensión) y se conserva un solo promedio. El valor de estos parámetros depende, por supuesto, de cada experimentación en particular; y para estudiar esa distribución se "estandariza"

a los datos (resultados experimentales, x) para que se distribuyan como $[z \sim N(0, 1)]$, restando el promedio a cada dato y dividiendo esta resta por la desviación estándar (Ecuación 12)

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (12)$$

Screen3 fue desarrollado por la US Environmental Protection Agency y utiliza un modelo de pluma Gaussiano, que incluye factores de la fuente y meteorológicos, para calcular la concentración de contaminantes de fuentes continuas. El modelo supone que el contaminante no sufre reacción química y que ningún otro proceso de eliminación (como sedimentación húmeda o seca) actúa sobre la pluma durante el transporte desde la fuente (US EPA, 1995).

El modelo genera distribuciones normales multidimensionales, para estimar sus parámetros y con ellos estimar los balances de población los cuales son parecidos al conjunto de datos que se van a introducir introducido. Por lo cual, los factores de fuente y los meteorológicos a los que se adapta el modelo son aquellos que le dan las características específicas a esas distribuciones normales para parecerse a los datos experimentales que han obtenido.

La ecuación básica para determinar las concentraciones a nivel del suelo debajo de la línea central de la pluma es:

$$X = Q / (2\pi v_s \sigma_y \sigma_z) \left\{ \begin{array}{l} \exp[-1/2 ((z_r - h_e)/\sigma_z)^2] + \exp[-1/2 ((z_r + h_e)/\sigma_z)^2] \\ + \sum_{N=1}^k \left[\begin{array}{l} \exp[-1/2 ((z_r - h_e - 2Nz_i)/\sigma_z)^2] \\ + \exp[-1/2 ((z_r + h_e - 2Nz_i)/\sigma_z)^2] \\ + \exp[-1/2 ((z_r - h_e + 2Nz_i)/\sigma_z)^2] \\ + \exp[-1/2 ((z_r + h_e + 2Nz_i)/\sigma_z)^2] \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (13)$$

Aquí:

X = concentración $\left(\frac{g}{m^3}\right)$

Q = tasa de emisión $\left(\frac{g}{s}\right)$

$$\pi = 3.141593$$

$$v_s = \text{velocidad del viento } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\sigma_y = \text{parámetro de dispersión lateral } (m)$$

$$\sigma_z = \text{parámetro de dispersión vertical } (m)$$

$$z_r = \text{altura del receptor sobre el suelo } (m)$$

$$h_e = \text{altura de la línea central de la pluma } (m)$$

$$z_i = \text{altura de la mezcla } (m)$$

$$k = \text{límite de suma para múltiples reflejos de la pluma desde el suelo e inversión elevada, generalmente } \leq 4$$

En la ecuación 13, el suelo de la fuente, se trata como una superficie plana que no absorbe contaminante. Teniendo en cuenta que para condiciones estables o para alturas de mezcla mayor o igual a 10000 metros, se asume que el término de la sumatoria es cero. La ecuación 13 se emplea para modelar impactos de pluma desde fuentes de punto, liberaciones por incineración, fuentes de área y liberaciones volumétricas (US EPA, 1995). Los parámetros de dispersión (vertical y lateral) son calculados en base al método de Pasquill, donde σ_y y σ_z , se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma_y = ax^b \quad (14)$$

$$\sigma_z = cx^d \quad (15)$$

Aquí:

$$x = \text{distancia de la fuente}$$

Los valores de a, b, c y d, son ajustados para distancias comprendidas entre 100 y 10000 m. La tabla 4, presenta los diferentes coeficientes, según la clase de estabilidad atmosférica usada en la modelación:

Tabla 4. Coeficientes a, b, c y d del método de Pasquill respecto a la clase de estabilidad atmosférica.

Clase de Estabilidad	Coeficientes			
	a	b	c	d
A	0.527	0.865	0.28	0.9
B	0.371	0.866	0.23	0.85
C	0.209	0.897	0.22	0.8
D	0.128	0.905	0.2	0.76
E	0.098	0.902	0.15	0.73
F	0.065	0.902	0.12	0.67

Para el cálculo de la altura de la pluma, se hace uso de la ecuación de Briggs. Dicha ecuación permite hallar el ascenso de la columna de humo Δh , que introduce los efectos del momentum y la estabilidad atmosférica.

$$\Delta h = 114 \frac{CF^{\frac{1}{3}}}{u_s} \quad (16)$$

Aquí:

C = parámetro que depende del gradiente de temperatura

u_s = velocidad del viento a la altura de la chimenea

F = factor de flotación

El factor de flotación se obtiene a partir de:

$$F = gv_s D^2 \frac{(T_f - T_a)}{4T_a} \quad (17)$$

Aquí:

g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

v_s = velocidad del gas a la salida de la chimenea $\left(\frac{m}{s}\right)$

D = diámetro interno de la chimenea (m)

T_f = temperatura de salida del gas ($^{\circ}K$)

T_a = temperatura ambiente ($^{\circ}K$)

Por lo anterior, la altura final de la pluma se calcula por:

$$h_e = h + \Delta h \quad (18)$$

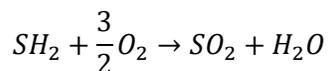
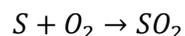
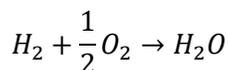
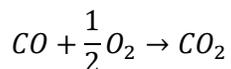
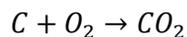
Aquí:

h = altura de la chimenea

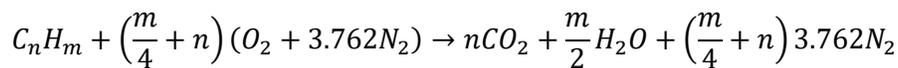
2.9 Procesos de combustión

La combustión es un proceso termoquímico utilizado para la producción de calor, que consiste en una reacción química en la que se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía en forma de calor (reacción exotérmica). El comburente o el agente que aporta dicho oxígeno en la reacción de combustión y la fuente usual y económica es el aire. En una reacción de combustión se suscitan los siguientes casos:

1. Combustión completa: se efectúa a temperaturas suficientemente altas, con un suministro adecuado de O_2 mezclado con el combustible y en un tiempo de residencia suficiente de los componentes del combustible, se originarán sustancias gaseosas tales como CO_2 y H_2O y SO_2 .

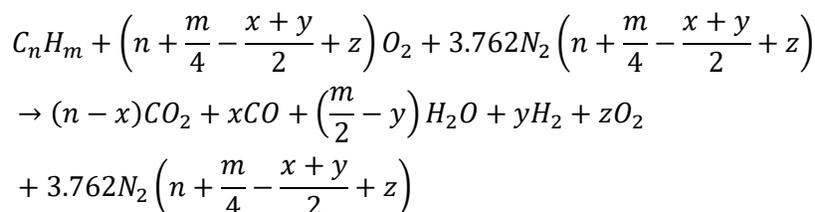


En general para un hidrocarburo de composición general C_nH_m :



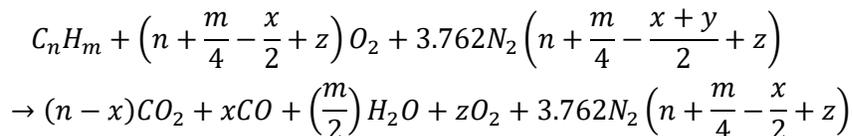
2. Combustión incompleta: la reacción se llevó a cabo con una mezcla inadecuada del aire de combustión y el combustible, a temperaturas muy bajas y tiempos de residencia cortos por lo que no se logra alcanzar el grado máximo de oxidación, se originarán sustancias gaseosas como CO_2 , H_2O , CO , CH_4 , PM , OC . Dentro de la combustión incompleta se encuentran la combustión de Kissel, en la que los inquemados son el CO y el H_2 , y la combustión de Ostwald, en la que hay un solo inquemado, el CO .

3. Combustión de Kissel: Para un hidrocarburo de composición general C_nH_m (1 mol de combustible) con CO y H_2 en los humos.



Aquí: y = moles de H_2 en los humos

4. Combustión de Ostwald: Para un hidrocarburo de composición general C_nH_m (1 mol de combustible) que contiene CO en los humos:



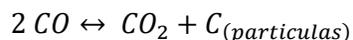
Aquí:

x = moles de CO

z = moles de O_2 en los humos

5. Reacción de Boudouard: reacción química empleada para gasificar el carbón con dióxido de carbono y obtener monóxido de carbono. Se trata de una reacción redox que se encuentra en equilibrio químico a una temperatura dada.

Es la dismutación de monóxido de carbono en su dióxido además de grafito o su ecuación reversa:



En esta reacción a bajas temperaturas el equilibrio es exotérmico en la formación del dióxido de carbono y cuando se presenta a altas temperaturas es endotérmica en la formación de monóxido de carbono.

6. Pirólisis: descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno. La pirólisis siempre es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios (Klug, 2012). El proceso de pirólisis tiene tres etapas:

- Etapa 1: se produce una descomposición lenta con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto es consecuencia de la ruptura de enlaces debido a alta temperatura a la que se lleva el proceso y consecuencia también de la liberación de gases retenidos en el carbón.
- Etapa 2: se conoce como descomposición térmica activa. La temperatura aumenta y se produce una fragmentación más profunda de la molécula de carbón con la formación de hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa comienza alrededor de los 360 °C y finaliza cuando se han alcanzado temperaturas alrededor de los 560 °C aproximadamente.
- Etapa 3: transcurre a temperaturas superiores a los 600 °C, se caracteriza por la eliminación gradual de hidrógeno y otros heteroátomos.

2.10 Estado del arte

Se han realizado diversos estudios cuyo enfoque de interés es la simulación y el modelado de contaminantes atmosféricos, (Khaniabadi, Taiwo, De Marco, Esmaeili, & Rashidi, 2018) identificaron e investigaron la dispersión atmosférica de partículas finas de una chimenea dentro de una planta de cemento en Doroud (Irán) empleado el software Screen3 y un modelo de pluma gaussiana para la dispersión de partículas desde la fuente. Compararon las concentraciones de partículas simuladas con los datos medidos para evaluar el rendimiento de ambos modelos. Obtuvieron concentraciones máximas de partículas en un radio

de 1600 – 1800 m alrededor de la fuente en dirección a favor del viento, los resultados simulados y medidos mostraron que las concentraciones de PM10 superaron significativamente los valores límites diarios ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aproximadamente 62.8%) y anuales ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aproximadamente 82.3%) establecidos por la OMS.

(Mugica-Alvarez, y otros, 2017) realizaron tres campañas de monitoreo atmosférico en el municipio de Zacatepec, México, los datos que obtuvieron fueron utilizados para calibrar un modelo gaussiano integrado en un sistema de información geográfica, destinado a modelar una gran cantidad de parcelas de la base de datos de quema de la zona de Zacatepec. Determinaron que, durante el tiempo de quema y operación del ingenio, las concentraciones de material particulado, incrementaron de tres a cinco veces más para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.



Ilustración 5. Mapa de zona quemada en Morelos en el 2013 - Cosecha 2014. (Fuente: Mugica-Alvarez y col., 2017)

(Ruiz-García, y otros, 2018) midieron las emisiones fugitivas de cuatro de las estufas tipo plancha más difundidas en México (Patsari, ONIL, Ecostufa y Mera-Mera) y emplearon el análisis tridimensional de dinámica de fluidos computacionales (CFD) con el fin de estimar el impacto de las emisiones de estufas de tipo plancha en las casas circundantes aguas abajo. El análisis se realizó para determinar las densidades de las viviendas donde se podrían promover las estufas de planchas sin producir mayores efectos de contaminación del vecindario en las casas circundantes.

Utilizando parámetros estimados para la región de Purépecha de México (velocidad del viento, volumen de la vivienda, rugosidad del suelo, temperatura y velocidad de salida del gas, etc.), en dicho estudio se estimaron concentraciones de penacho para tasas de emisión de 20, 40, 60 y 80 mg/min y determinaron la distancia que debe existir entre viviendas para que las concentraciones disminuyeran a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la altura de respiración del individuo.

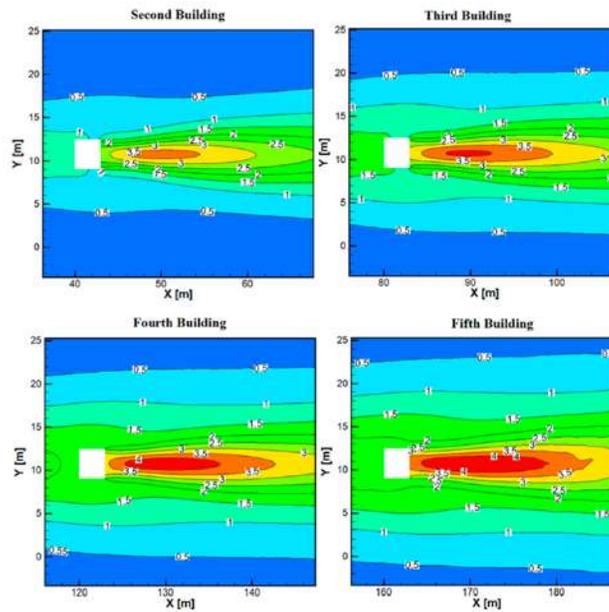


Ilustración 6. Contorno de concentración de contaminantes a 1,5 m para 5 hogares a favor del viento en el centro del penacho con cada hogar emitiendo a 20 mg/min y una distancia de 40 m entre hogares. (Fuente: Ruíz-García y col., 2018)

3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

En este estudio se llevará a cabo una investigación exploratoria, ya que se analizarán fenómenos reales que se obtendrán de las fuentes y se efectuará un acercamiento a factores que no se han estudiado a detalle. A fin de modelar esos fenómenos, se empleó un simulador de tipo Gaussiano, Screen3 y se programó el modelo de Dispersión de pluma Gaussiano. Las etapas de desarrollo de la investigación se muestran en la Ilustración 7.

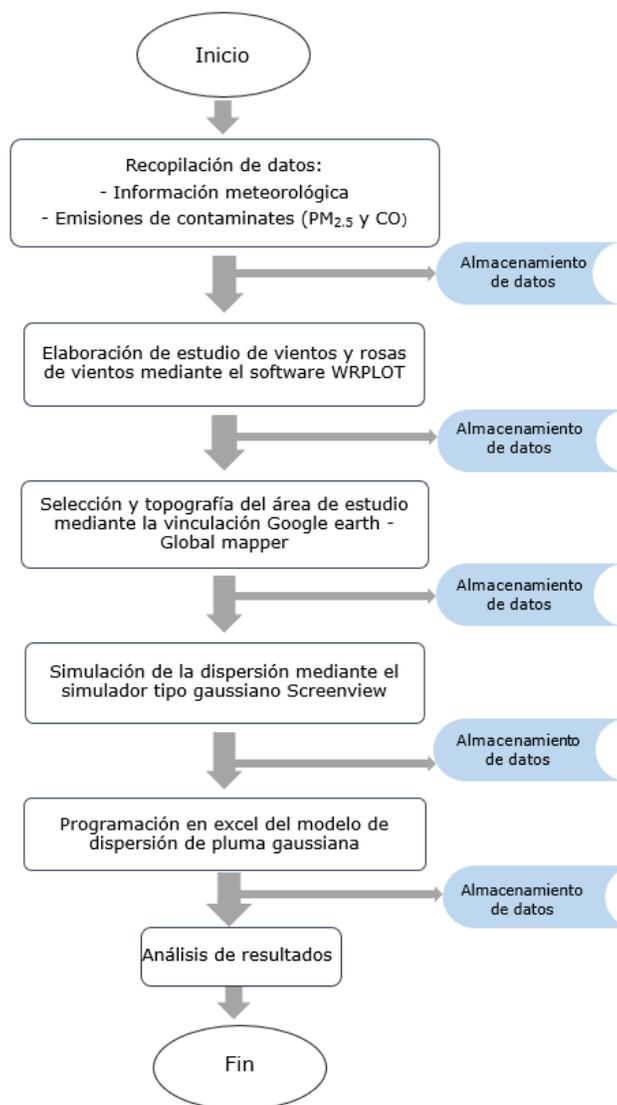


Ilustración 7. Esquema general de la metodología de este estudio.

3.2 Recopilación de los datos

3.2.1 Información meteorológica y geográfica

La mayoría de los modelos gaussianos aceptan datos meteorológicos de superficie que consideran la clasificación de estabilidad atmosférica, dirección y velocidad del viento. Para este estudio se utilizarán los datos de la estación meteorológica ubicada en Morelia, Michoacán y datos geográficos proporcionados por la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.2.2 Datos de emisión de contaminantes

Se recopilaron tasas de emisión de cuatro estufas eficientes de leña (ICS por sus siglas en inglés); Patsari, Onil, Ecostufa, Mera-Mera, así como el promedio de las mismas, de dos dispositivos de cocción con baja eficiencias de combustión; Fogón tres piedras (TSF por sus siglas en inglés) y el Fogón tipo "U" (U-type por sus siglas en inglés) y de la estufa de gas licuado de petróleo (LPG, por sus siglas en inglés) Los datos fueron recopilados de (Medina P. , y otros, 2017), (Ruiz-García, y otros, 2018) y (Medina P. , y otros, 2019) en los tres estudios se determinaron tasas de emisión mediante la aplicación del protocolo de "ciclo de cocinado", el cual se define como el conjunto de actividades de cocción de alimentos que se llevan a cabo en una estufa eficiente o un fogón tradicional a lo largo del día en un hogar rural. Este protocolo CBC (por sus siglas en inglés) vincula las evaluaciones de rendimiento en laboratorio con las actividades diarias de cocinado replicando dichos ciclos de cocción (Johnson, Edwards, Berrueta, & Masera, 2010) y proporciona una oportunidad para cerrar la brecha existente entre las pruebas de laboratorio y las pruebas de campo.

3.3 Estudio de vientos y rosas de vientos

Se emplearon datos meteorológicos de velocidad y dirección del viento los cuales fueron medidos y monitoreados a 24 horas durante un periodo de 2003 a 2018, los cuales fueron proporcionados por la Estación meteorológica de Morelia (longitud 19° 42' 00", latitud 101° 11' 00" y altitud de 1912.7 m S.N.M.).

Estos datos se ingresaron en el software para Windows WRPLOT View (Ilustración 8) el cual generó gráficas de rosa de los vientos, donde se mostró la frecuencia de la ocurrencia, dirección y la velocidad del viento, además se realizaron gráficos estadísticos de las frecuencias para los siguientes cuatro

trimestres: enero – febrero – marzo, abril – mayo – junio, julio – agosto – septiembre y octubre – noviembre – diciembre desde el año 2003 al 2018, el procedimiento implementado se describe a continuación:

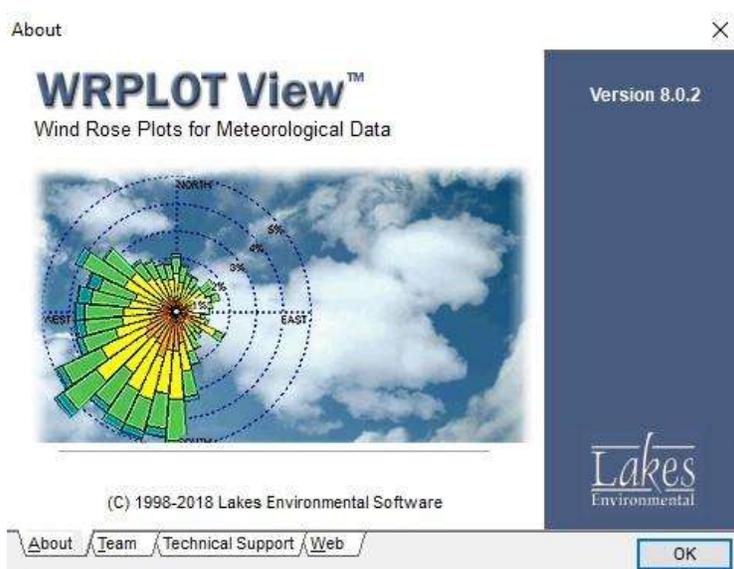


Ilustración 8. Pantalla de inicio del software WRPLOTT View.

1. Se elaboró un archivo en Excel, especificando el año, mes, día, hora velocidad y dirección del viento.
2. Se importó el archivo de Excel desde el programa WRPLOTT, seleccionando el menú Herramientas → Importar desde. En cada una de las áreas de datos de campo del software se indicó en qué columnas se encuentran el año, mes, día, hora, dirección y velocidad del viento.
3. Se insertó la información correspondiente a la estación meteorológica, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: ciudad, estado, latitud, longitud, zona horaria y elevación de la estación.
4. Con dicha información se creó automáticamente un archivo tipo *.sam, generado por el software, este archivo corresponde a la evaluación de los datos ingresados al programa.
5. A partir de este archivo el software generó las rosas de los vientos, la cual tiene dos tipos de visualización de la dirección del viento (desde donde proviene, o hacia donde se dirige) y un gráfico de distribución de frecuencia del viento.

3.4 Selección del área de estudio y topografía del terreno

3.4.1 Área de estudio

Se seleccionó la comunidad de Jesús del Monte, la cual es una localidad circundante al sureste del municipio de Morelia. Está situada en las coordenadas GPS: latitud: N9° 39' 02.44" - longitud: O 101° 09' 07.23" en una loma al pie de las montañas que forman la Sierra de Otzumatlán o Mil Cumbres, a 2180 metros sobre el nivel del mar. Su clima está siempre tres o cuatro grados por debajo de la temperatura promedio de la ciudad (17.8°C), debido a que el viento que corre de sur a norte se humedece y enfría en el bosque de encinos, cedros y abetos que colinda. En esta comunidad de lento crecimiento, la leña es un recurso importante debido a que es un combustible utilizado para la cocción de alimentos, calentamiento de agua y calefacción en el hogar y representa la única fuente de combustible. El patrón de consumo de leña en la localidad puede ser muy particular en función de la disponibilidad del recurso como combustible y forestal, la tenencia de la tierra, el número de integrantes por familia, el nivel de ingreso de las familias, el costo de la leña, las condiciones climatológicas, así como aspectos culturales de tradición y culinarios.

La Ilustración 9 muestra el mapa geográfico de la comunidad, y el polígono geográfico el cual abarca toda el área que será evaluada (incluyendo lugares de interés), indicando la extensión del dominio en estudio y sobre el cuál será aplicado el modelo. Dentro del polígono se contemplan un total de 490 hogares, de los cuales el 69.8%, el 30% y el 0.2% emplean gas LP, leña y carbón respectivamente para satisfacer tareas de cocción y calefacción de acuerdo al estudio reportado por (Serrano-Medrano, y otros, 2018).

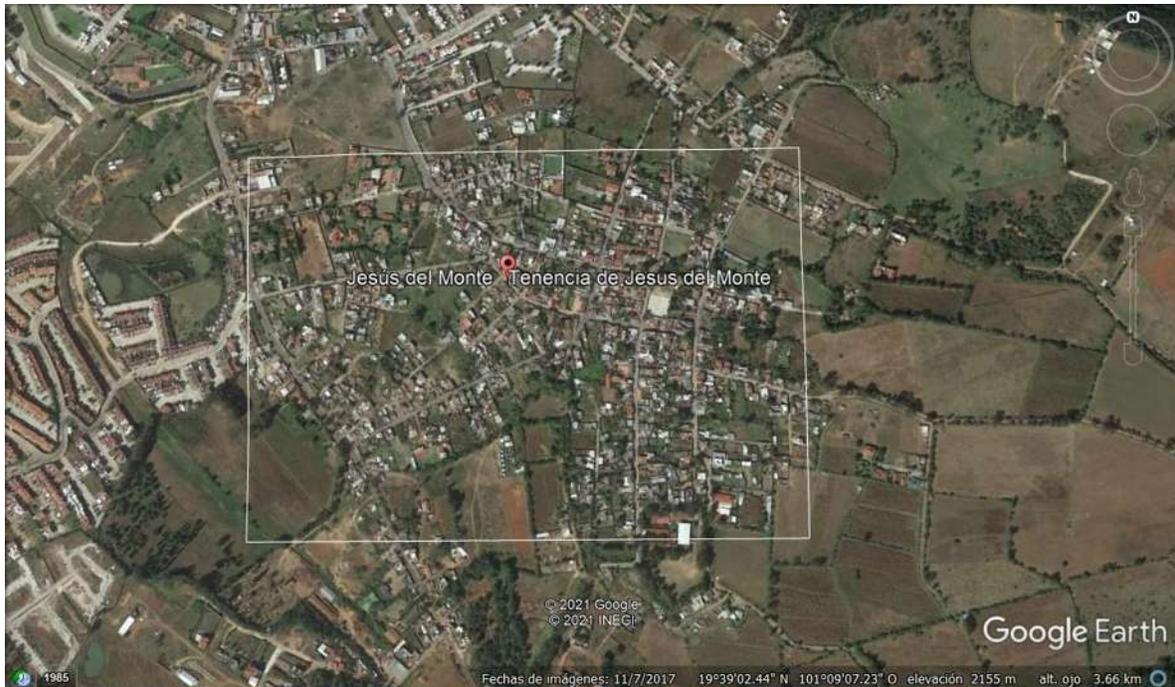


Ilustración 9. Localidad de Jesús del Monte, Michoacán.

3.4.2 Topografía del área de estudio

Se determinó la topografía del área de estudio con el fin de presentar las características del terreno del área que fue evaluada, señalando si las fuentes o los receptores se encuentran en una zona, costera, terreno simple o terreno complejo. Se especificó la ubicación y altura de las elevaciones cercanas, así como otras consideraciones geográficas relevantes.

Se empleó el software de sistema de información geográfica (GIS) Global Mapper el cual tiene la capacidad de mostrar, convertir y analizar cualquier tipo de dato geoespacial en 2D o 3D, de una nube remota o local, de datos raster o vectoriales, archivo plano o base de datos espacial. Los cortes transversal y longitudinal se dividieron en 10 secciones para la obtención de un perfil topográfico.

El procedimiento implementado se describe a continuación:

1. Se descargó e instaló Google Earth y la versión trial de Global Mapper.
2. Se abrió Google Earth y seleccionó la opción de polígono, creamos un polígono en la zona que quisimos abarcar, y posteriormente lo guardamos en el equipo de cómputo.

3. Se abrió la ventana principal del Global Mapper, y se cargó el archivo del polígono.
4. Seleccionamos la herramienta "Tools", y cambiamos projection de Geographic a UTM, aquí se debe poner la zona del mapa, consultando en Google maps las coordenadas del sitio elegido.
5. Seleccionamos "File", y posteriormente click a "Download Online Imagery topo terrain map". Se abrirá una ventana, y aparecerá un cuadro. Buscamos "Select Data Source", luego "World Wide Data" y dentro de este en la segunda opción ASTER GDM WORDWIDE ELEVATION. Le damos a Conect, y a continuación aparecerá un mapa en escala de color (el mapa fotogramétrico) por satélite.
6. Para crear las curvas, cortándolo con planos. Seleccionamos "Analisys, Generate Contour From Terrain Grid", se abrió una nueva ventana, en countour interval colocamos la distancia de corte entre planos, 1m por ejemplo. Más abajo en Minour colocamos la altura menor de las curvas a partir de la cual va a cogernos, de tal modo que, si ponemos 0, no nos cogerá las curvas inferiores a estas. De manera similar en Major, ponemos la curva más elevada que queremos. Si no sabemos las alturas mínimas y máximas, lo recomendable sería inventarse un valor muy bajo y otro muy elevado respectivamente.

3.5 Simulación de la dispersión mediante el modelo Screen3

Se empleó el software SCREEN View el cual es una interfaz para el modelado de detección de la EPA de EE.UU. Screen3 (Ilustración 10). El modelo se empleó para estimar las concentraciones de CO y PM_{2.5} en la comunidad de Jesús del Monte considerando diferentes escenarios propuestos. Dentro del escenario propuesto en esta primera parte de la simulación todos los dispositivos de cocción se consideraron como fuentes de área unificadas, las tasas de emisión individuales fueron multiplicadas por el número total de hogares que emplean el dispositivo de cocción (para estufas eficientes de leña y dispositivos de cocción ineficientes este número fue de un total de 147 hogares, mientras que la para la estufa de gas LP este número fue de 343) y posteriormente divididas entre el área total, se consideró una clase de estabilidad B de acuerdo a la velocidad del viento y la condición diurna de insolación de la comunidad. Se asumió que los dispositivos de cocción se encienden al mismo tiempo y se consideraron los cuatro posibles escenarios en función de los cuatro trimestres comprendidos en el año.

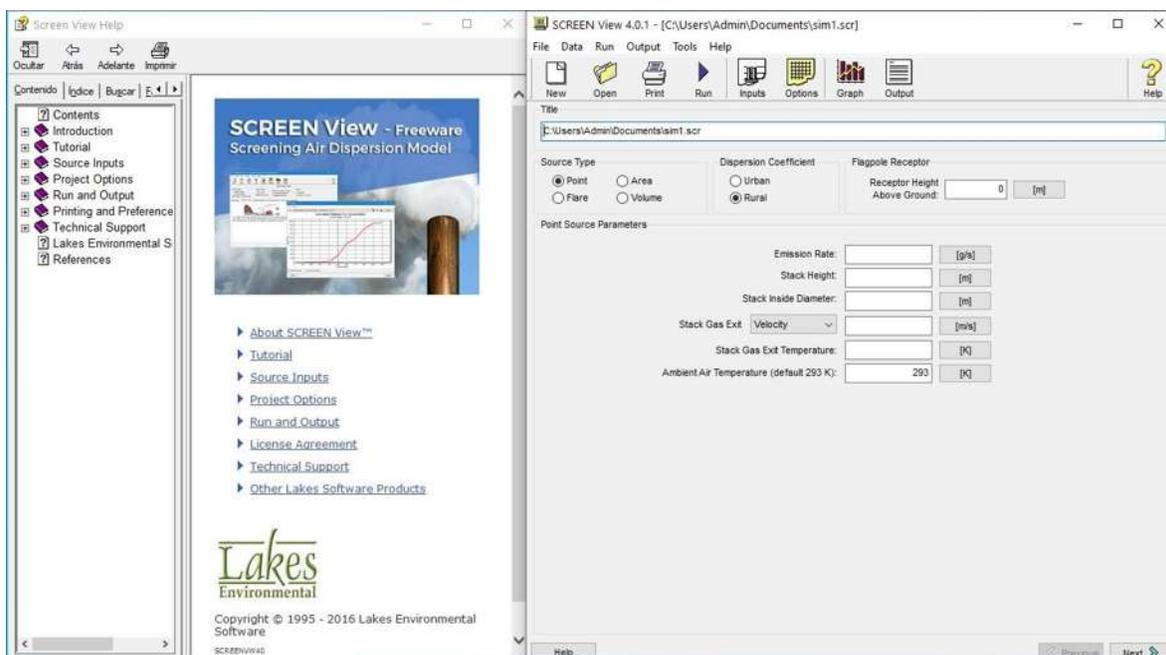


Ilustración 10. Pantalla de inicio del software SCREEN View.

3.6 Programación del Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano

El modelo de dispersión de Pluma Gaussiano fue programado en Excel para el cálculo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y CO en diferentes escenarios propuestos. En el siguiente escenario los dispositivos de cocción se consideraron como fuentes puntales unificadas, las tasas de emisión individuales fueron multiplicadas por el número total de hogares que emplean el dispositivo, se consideró una clase de estabilidad B de acuerdo a la velocidad del viento y la condición diurna de insolación de la comunidad, se realizaron cálculos de concentraciones a lo largo de la línea central de la pluma y a la distancia horizontal del eje central de la pluma variando la velocidad del viento, así como la clase de estabilidad atmosférica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudio de vientos y rosas de vientos

A continuación, se presentan las rosas de vientos, las cuales muestran la frecuencia de ocurrencia de los vientos en cada una de las direcciones del viento y la velocidad promedio durante los trimestres: enero – febrero – marzo, abril – mayo – junio, julio – agosto – septiembre y octubre – noviembre – diciembre del periodo de 2003 al 2018.

En el primer trimestre la dirección del viento predominó hacia el norte (Ilustración 11), en sentido Norte y Nord-Este por el Norte (NEpN) se percibe mayor frecuencia de vientos con velocidades bajas comprendidas entre 0.5 a 2.10 m/s que alcanzan una frecuencia total del 70.6%, se divisa un incremento de velocidad en medida de la dirección Norte Nord-Oeste (NNO) y Sur (S) con frecuencia de velocidades entendidas en un 13.7% entre 2.1 – 3.6 m/s; 3.9% entre 3.6 – 5.7 m/s y velocidades que alcanzan un rango máximo de 5.7 - 8.8 m/s de 0.9% con dirección Norte Nord-Oeste (NNO), solo se percibieron velocidades ≥ 11 en un 0.2% en dirección al Sur (S). En relación a vientos calmos para este trimestre se tiene un 10.7% y una velocidad promedio trimestral de 1.65 m/s (Ilustración 15).

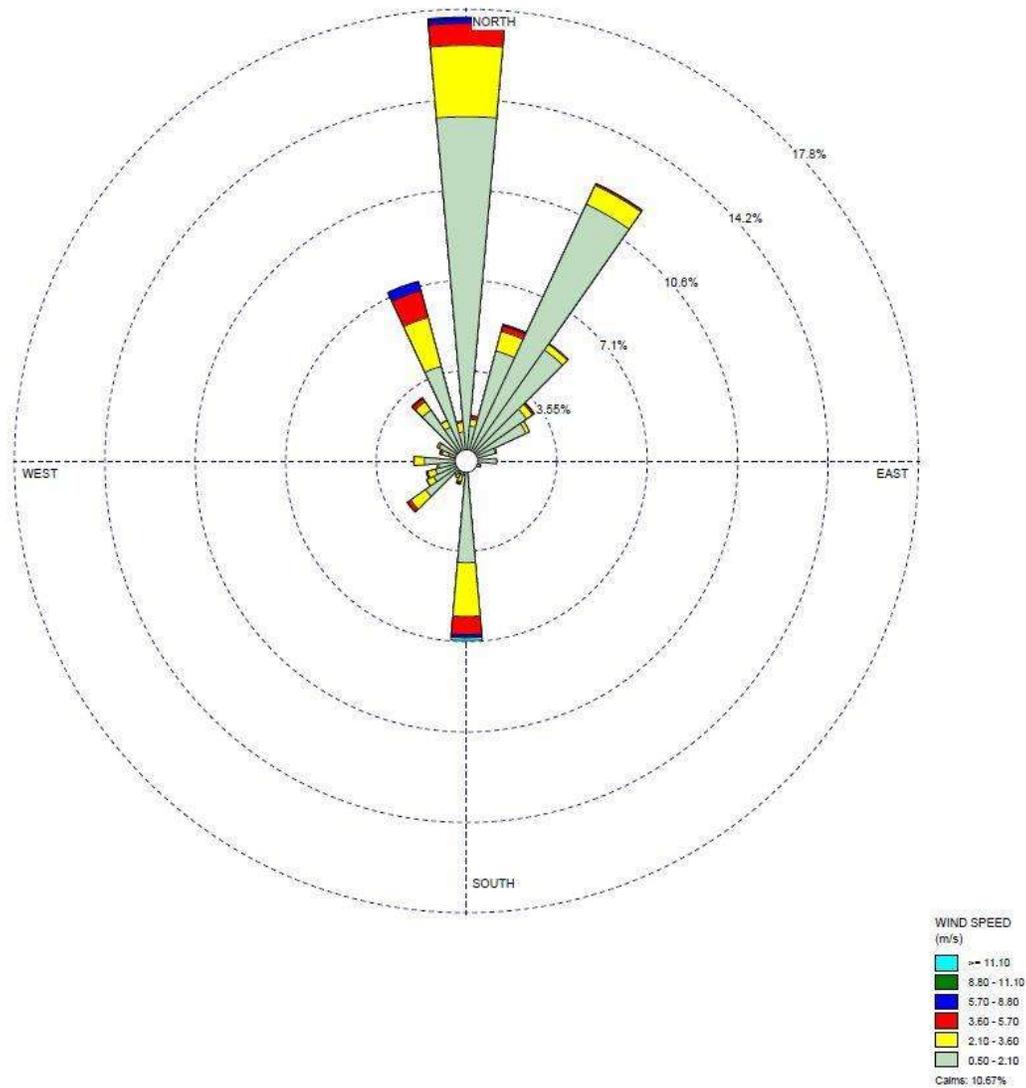


Ilustración 11. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: enero – febrero - marzo del 2003 al 2018.

En el segundo trimestre la dirección del viento predominó hacia el norte (Ilustración 12), en sentido Norte (N), Nord-Este por el Norte (NepN) y Nord-Este (NE) se percibe mayor frecuencia de vientos con velocidades bajas comprendidas entre 0.5 a 2.10 m/s que alcanzan una frecuencia total del 67.2%, se divide un incremento de velocidad en medida de la dirección Norte Nord-Oeste (NNO) con frecuencia de velocidades entendidas en un 16.6% entre 2.1 – 3.6 m/s; 4% entre 3.6 – 5.7 m/s y velocidades que alcanzan un rango máximo de

5.7 - 8.8 m/s de 0.4% con dirección Norte Nord-Oeste (NNO) y sur (S), solo se percibieron velocidades ≥ 11 en un 0.1% en dirección al Sur (S). En relación a vientos calmos para este trimestre se tiene un 11.6% y una velocidad promedio trimestral de 1.55 m/s (Ilustración 16).

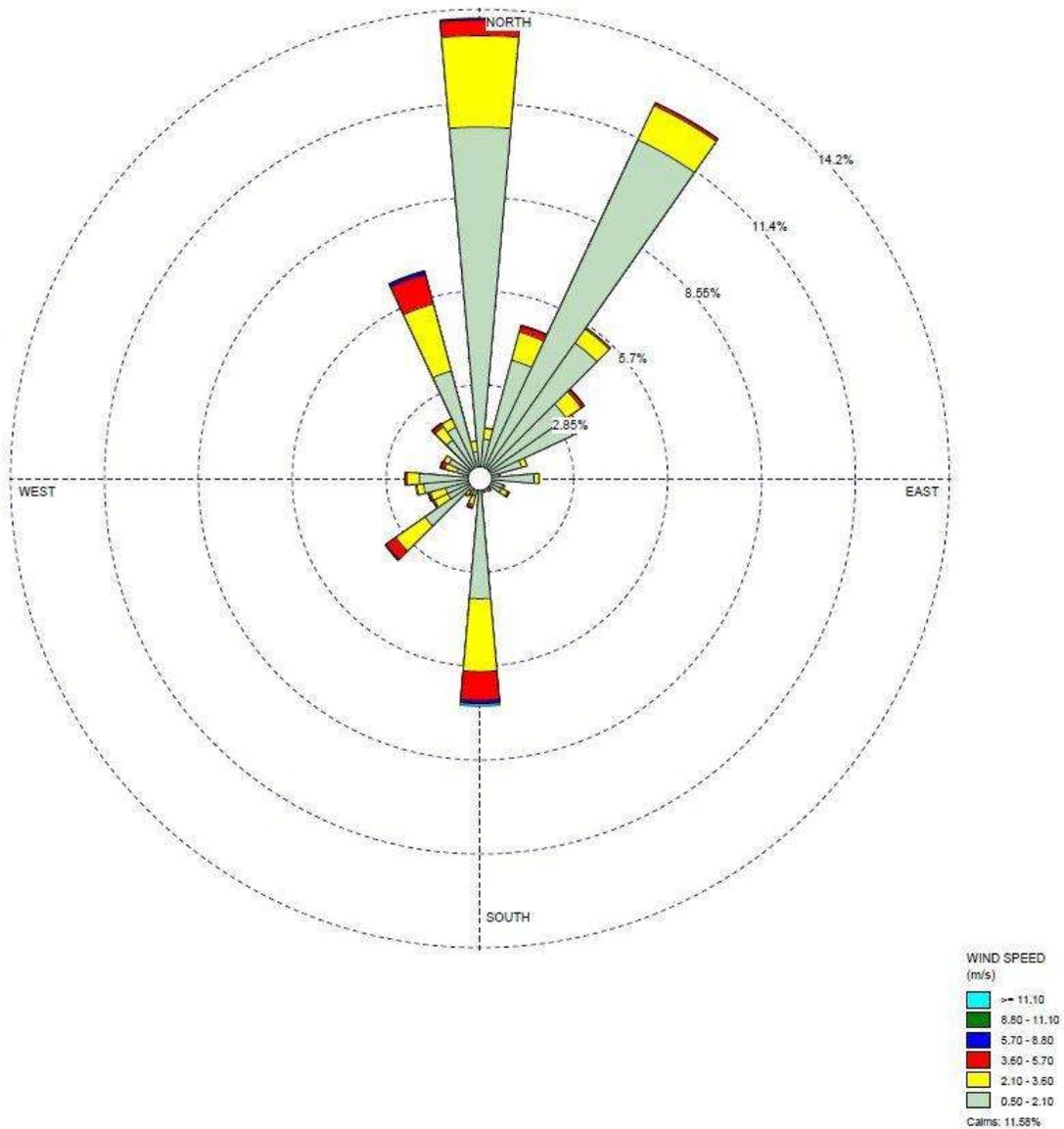


Ilustración 12. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: abril – mayo – junio del 2003 al 2018.

En el tercer trimestre la dirección del viento predominó hacia norte y sur (Ilustración 13), en sentido Norte (N), Sur (S), Nord-Este por el Norte (NepN) y Norte nord-Este (NNE) se percibe mayor frecuencia de vientos con velocidades bajas comprendidas entre 0.5 a 2.10 m/s que alcanzan una frecuencia total del 67.9%, se divisa un incremento de velocidad en medida de la dirección Norte (N), Norte Nord-Oeste (NNO), Sur (S) y Sur-Oeste (SO) con frecuencia de velocidades entendidas en un 12.7% entre 2.1 – 3.6 m/s; 2.1% entre 3.6 – 5.7 m/s y velocidades que alcanzan un rango máximo de 5.7 - 8.8 m/s de 0.3% con dirección Sur-Oeste (SO) y Sur (S). En relación a vientos calmos para este trimestre se tiene un 16.9% y una velocidad promedio trimestral de 1.19 m/ (Ilustración 17).

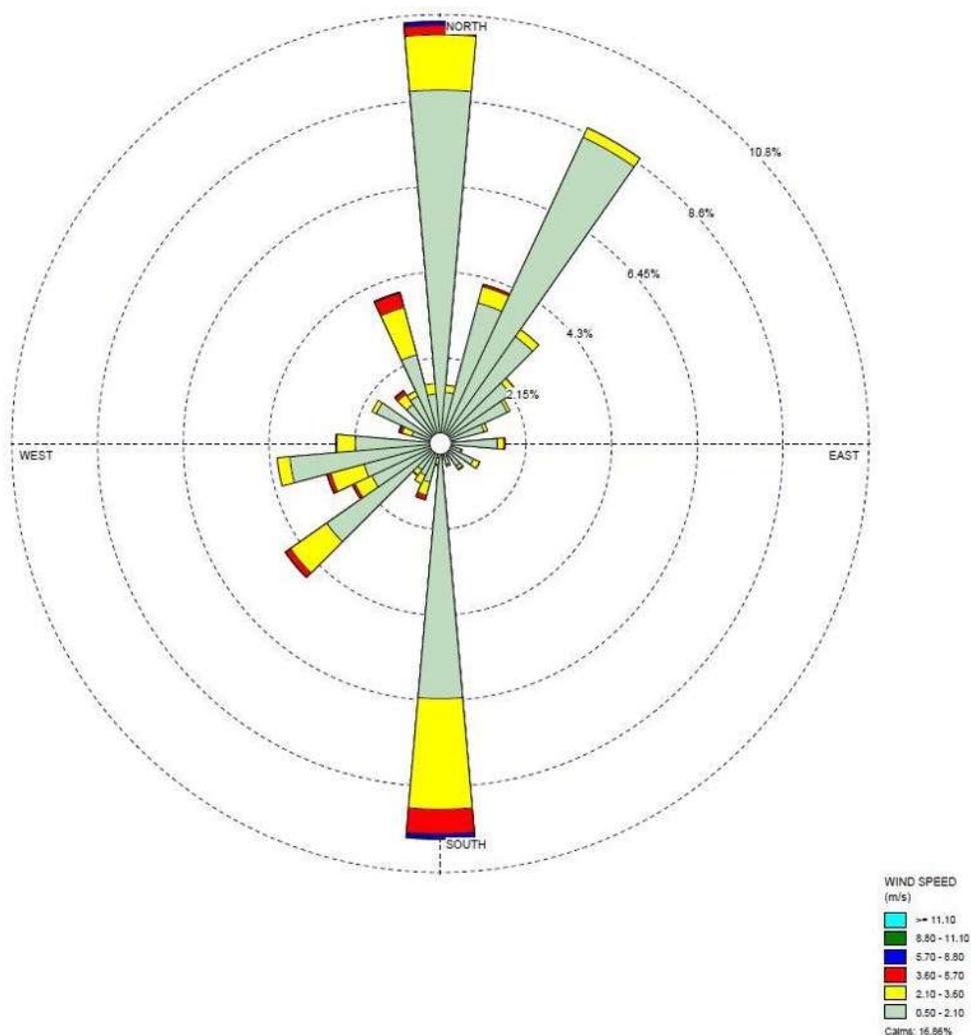


Ilustración 13. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: julio – agosto – septiembre del 2003 al 2018.

Para el cuarto y último trimestre la dirección del viento predominó hacia el norte y sur (Ilustración 14), en sentido Norte (N), Sur (S), Nord-Este por el Norte (NepN) y Norte nord-Este (NNE) se percibe mayor frecuencia de vientos con velocidades bajas comprendidas entre 0.5 a 2.10 m/s que alcanzan una frecuencia total del 69.6%, se divisa un incremento de velocidad en medida de la dirección Norte (N), Norte Nord-Oeste (NNO), Sur (S) y Sur-Oeste (SO) con frecuencia de velocidades entendidas en un 11.4% entre 2.1 – 3.6 m/s; 2.3% entre 3.6 – 5.7 m/s y velocidades que alcanzan un rango máximo de 5.7 - 8.8 m/s de 0.3% con dirección Sur (S) y Norte Nord-Oeste (NNO). En relación a vientos calmos para este trimestre se tiene un 16.3% y una velocidad promedio trimestral de 1.16 m/s (Ilustración 18).

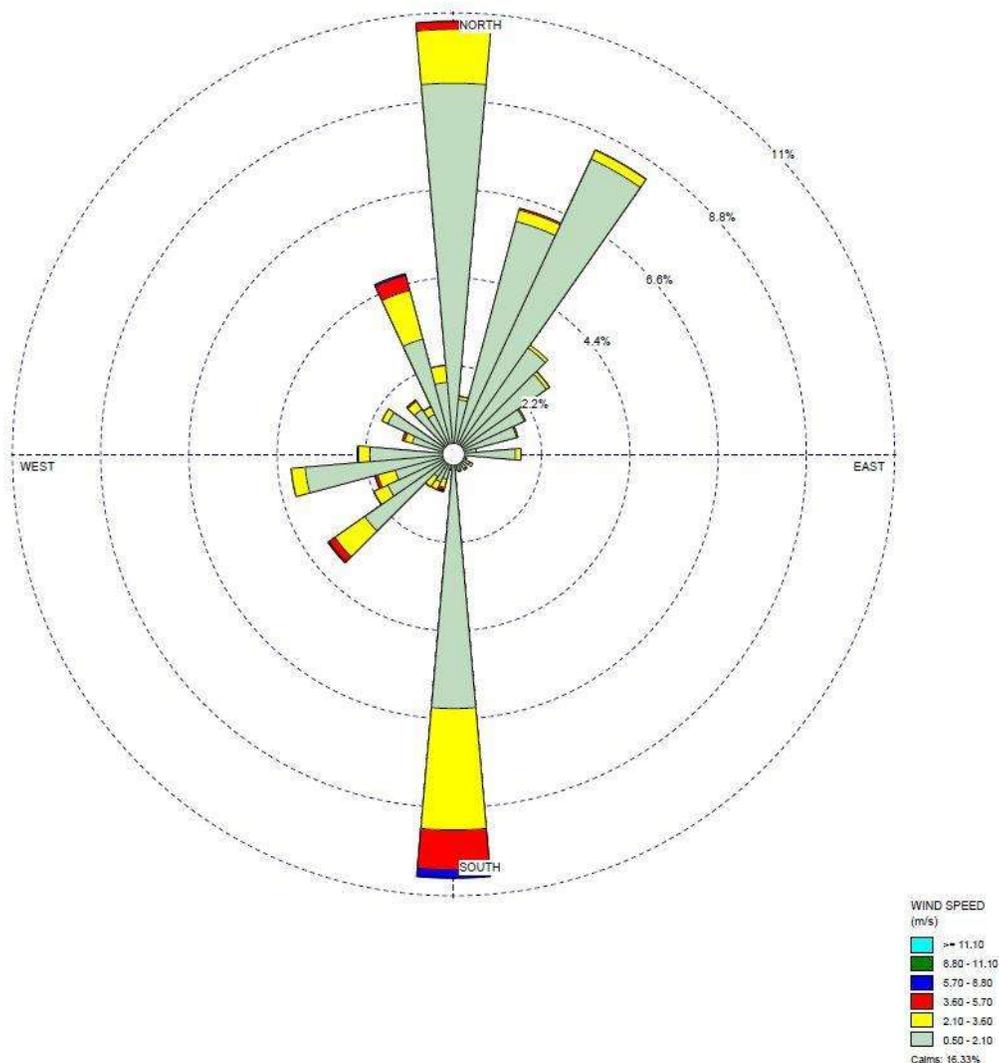


Ilustración 14. Rosa de los vientos correspondiente al trimestre: octubre – noviembre – diciembre del 2003 al 2018.

La Tabla 5 muestra el resumen de la velocidad media del viento y las clases de estabilidad atmosférica correspondientes a los 4 trimestres durante el periodo 2003 – 2018.

Tabla 5. Velocidad del viento correspondientes a los 4 trimestres durante el periodo 2003 – 2018.

Periodo	N	Velocidad promedio (m/s)	SE Promedio	Desviación estándar	Varianza	CoefVar	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 3	IQR	Clase de Estabilidad	Porcentaje de vientos tranquilos (%)
Trimestre 1	34651	1.65/1.664	0.0436	8.119	65.914	487.81	0.6	1.1	1.7	1.1	A-B	10.67
Trimestre 2	34940	1.55/1.562	0.0309	5.776	33.367	369.92	0.688	1.136	1.825	1.137	A-B	11.58
Trimestre 3	35304	1.19/1.2135	0.00558	1.0481	1.0985	86.37	0.6	1.0958	1.6109	1.0109	A-B	16.86
Trimestre 4	35325	1.16/1.182	0.00844	1.586	2.517	134.21	0.6	1.058	1.516	0.916	A-B	16.33

Las Ilustraciones 13, 14, 15 y 16 muestran la frecuencia por clase de vientos o por rango de los vientos que soplaron durante los periodos considerados. Se puede concluir que los vientos más frecuentes se obtuvieron en el rango de 0.5 a 2.1 m/s.

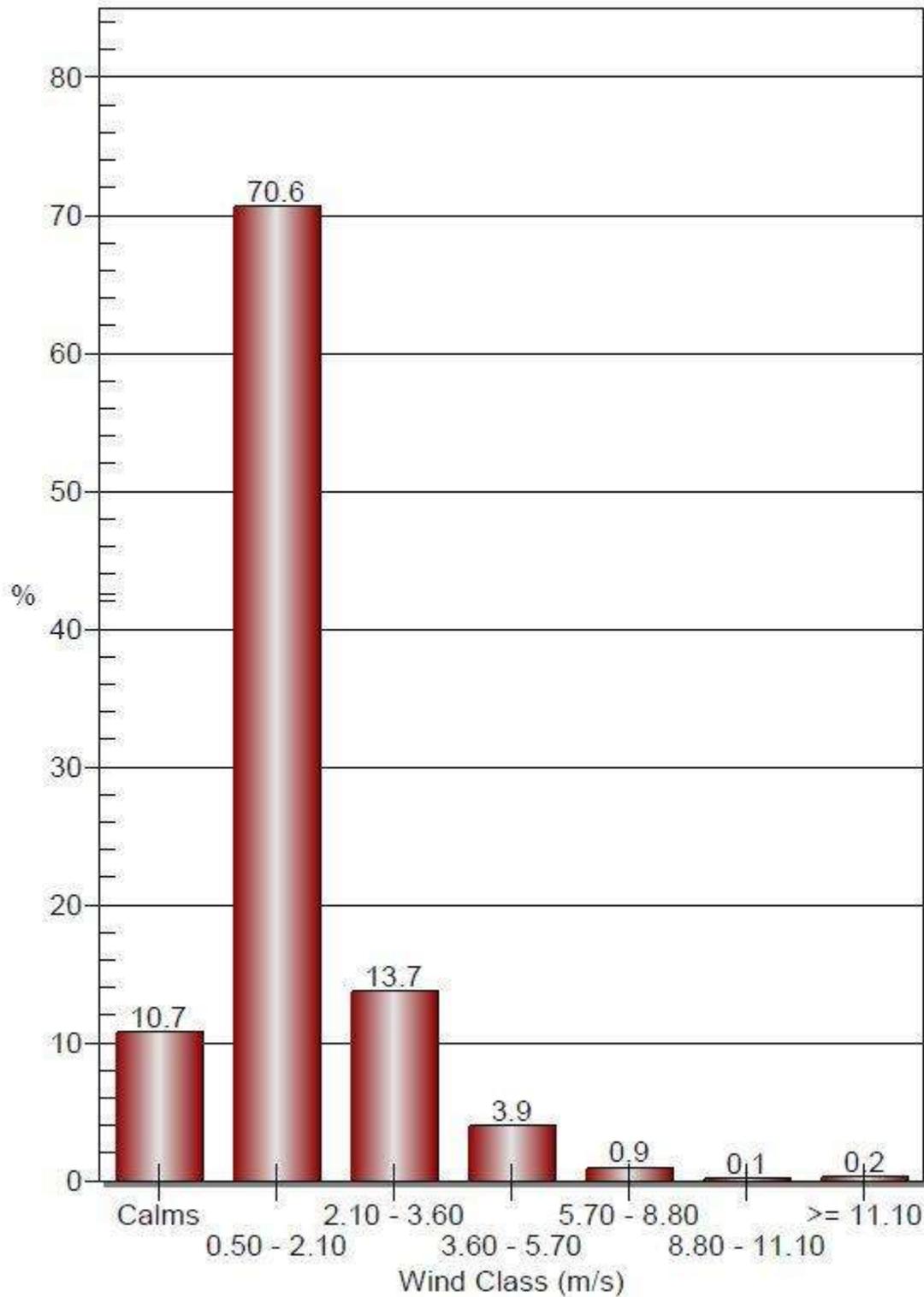


Ilustración 15. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre enero - febrero - marzo del 2003 al 2018.

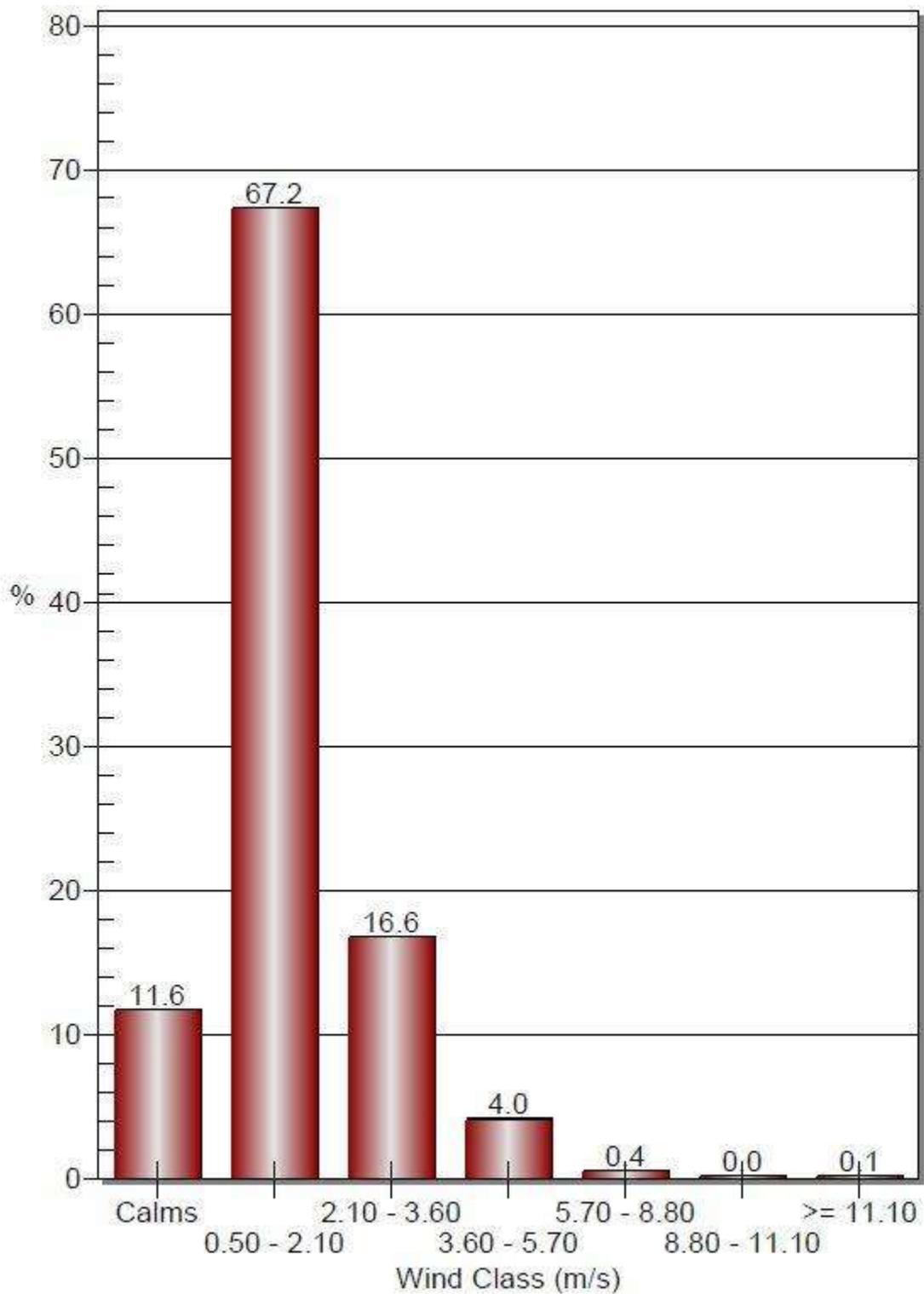


Ilustración 16. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: abril - mayo - junio del 2003 al 2018.

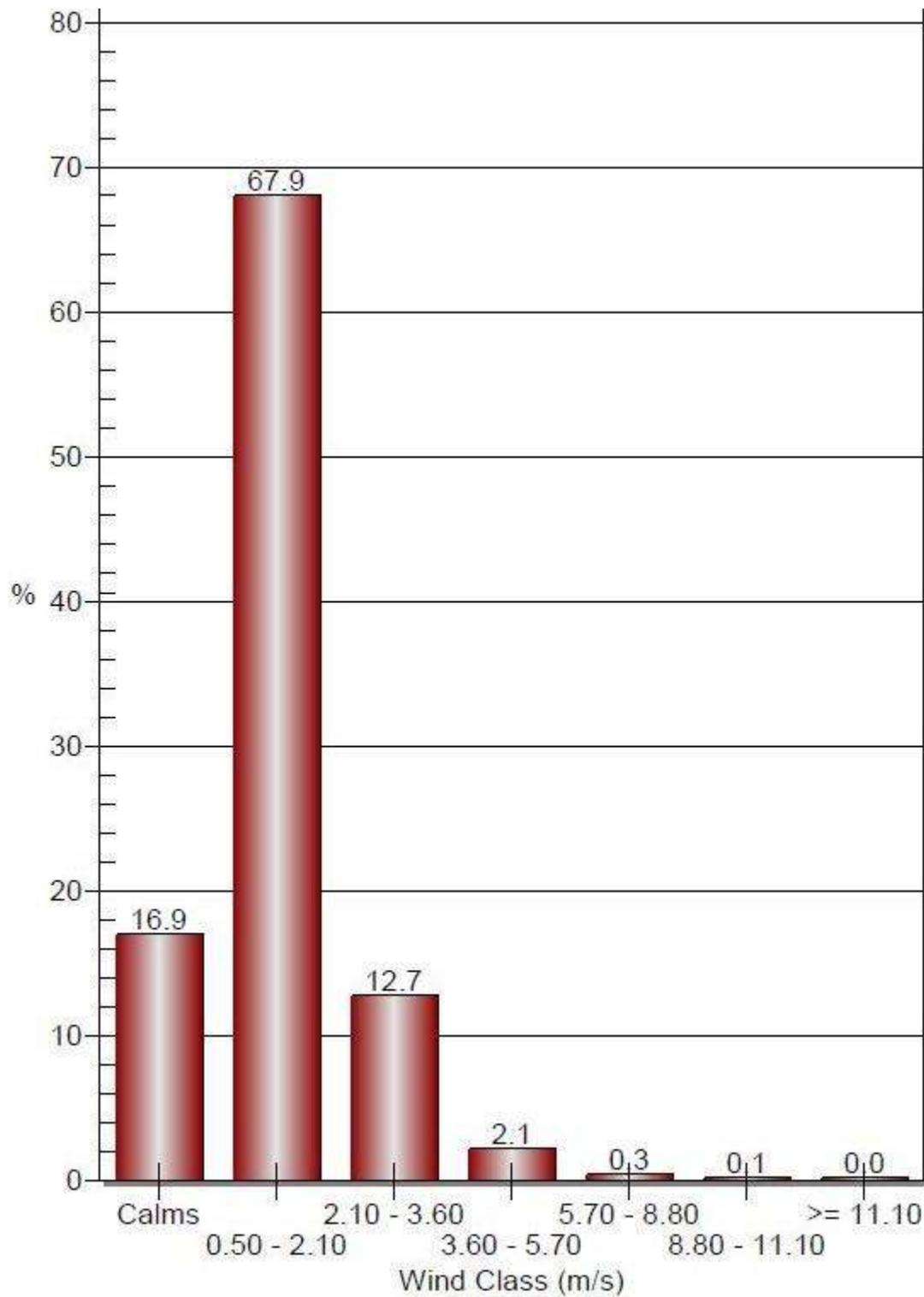


Ilustración 17. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: julio - agosto - septiembre del 2003 al 2018.

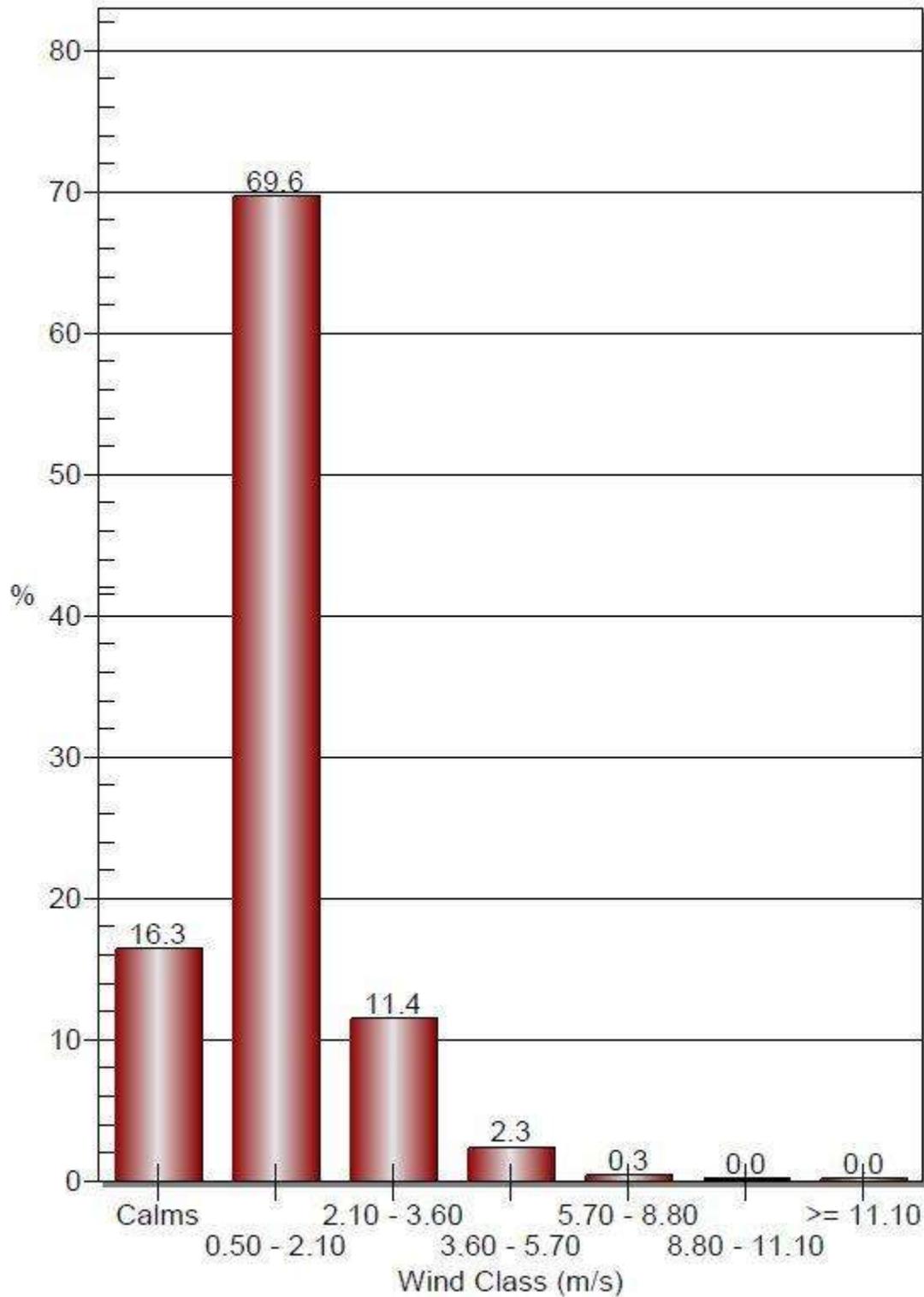


Ilustración 18. Distribución de frecuencia de clases de viento correspondiente al trimestre: octubre - noviembre - diciembre del 2003 al 2018.

4.2 Área de estudio y topografía del terreno

Se seleccionó la comunidad de Jesús del Monte, la cual está situada en las coordenadas GPS: latitud: N9° 39' 02.44" - longitud: O 101° 09' 07.23". La comunidad cuenta con un total de 490 hogares de los cuales el 30.2% emplea leña, y el 69.8% emplea gas LP para satisfacer tareas de cocción. Mediante Google Earth se delimitaron los cortes transversal y longitudinal del área rectangular siendo éstos de 875.2 m y 602.5 m respectivamente. El área comprendida para este estudio fue de 527367.1 m².

En relación a la topografía las Ilustraciones 19 y 20 muestran las curvas de nivel del área de estudio seleccionada en perspectiva aérea y tridimensional respectivamente, las curvas oscilan entre los 2050 y 2150 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) se carecen de curvas de nivel de mayor cota envueltas por otras curvas de nivel de cota menor, es decir existe la ausencia de montes, llanuras o fluctuaciones que pudiesen afectar la dispersión de los contaminantes.

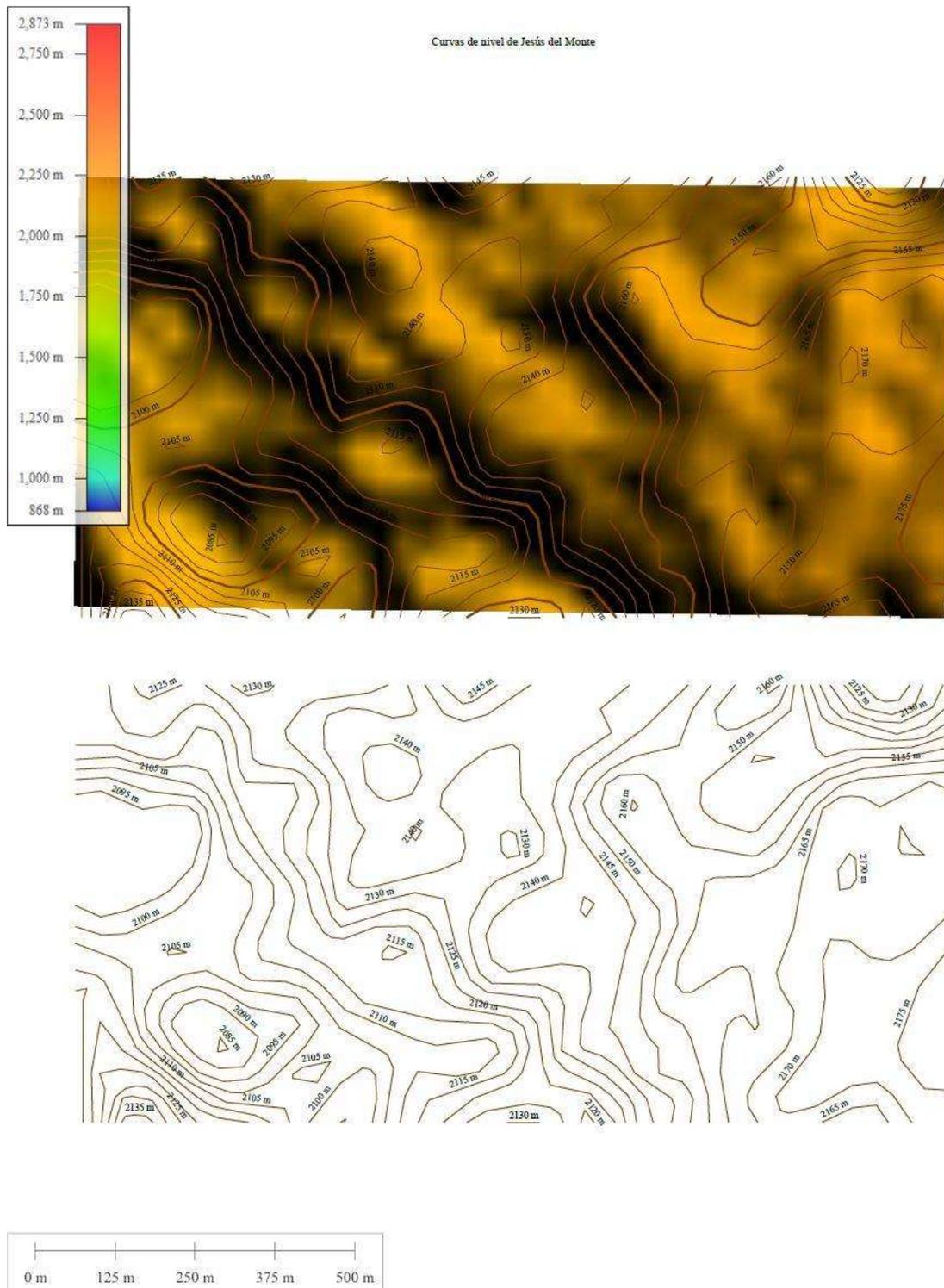


Ilustración 19. Curvas de nivel de la comunidad de Jesús del Monte.

Nota: Curvas de nivel de la Comunidad de Jesús del Monte, la parte posterior de la ilustración muestra la vista satelital en 3D.

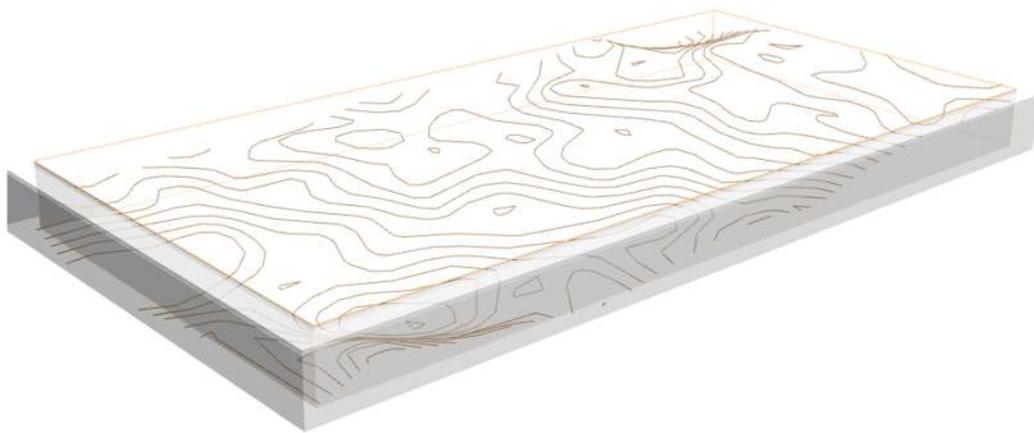
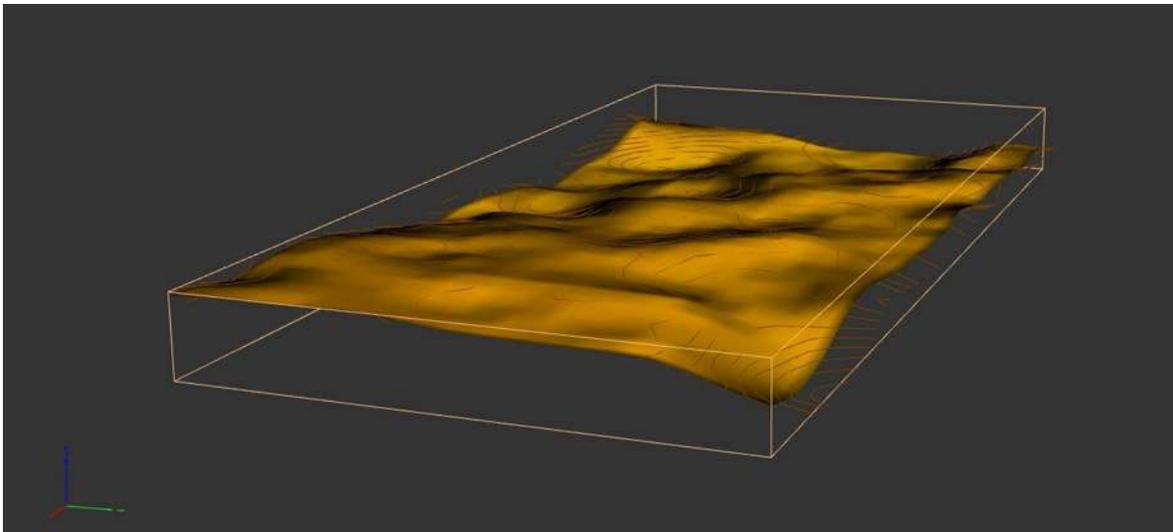


Ilustración 20. Curvas de nivel tridimensionales de la comunidad de Jesús del Monte.

Nota: Curvas de nivel de la Comunidad de Jesús del Monte, la parte posterior de la ilustración muestra la vista en 3D.

Relacionado al perfil topográfico la Tabla 6 y las Ilustraciones 21 y 22 muestran los metros sobre el nivel del mar de cada una de las 10 secciones de los cortes transversal y longitudinal. La altura promedio en el corte transversal fue de 2140.4 m. s. n. m. con una desviación estándar de 16.1 m s. n. m., mientras que la altura promedio en el corte longitudinal fue de 2131.7 m s. n. m. y una desviación estándar de 10.5 m s. n. m. lo cual nos indica una altura sobre el nivel de mar con poca desviación, aunado a las curvas de nivel obtenidas y a la ausencia de elevaciones o fluctuaciones se determinó que el terreno se trata de un terreno **simple**.

Tabla 6. Perfil topográfico de la comunidad de Jesús del Monte.

Perfil topográfico			
Corte transversal		Corte longitudinal	
Vértice	Altura (m)	Vértice	Altura (m)
1	2163.28	1	2135.82
2	2160.74	2	2133.3
3	2155.83	3	2134.53
4	2143.28	4	2125.22
5	2139.13	5	2138.58
6	2134.36	6	2144.26
7	2134.29	7	2141.42
8	2138.3	8	2133.33
9	2121.34	9	2109.06
10	2113.82	10	2121.63

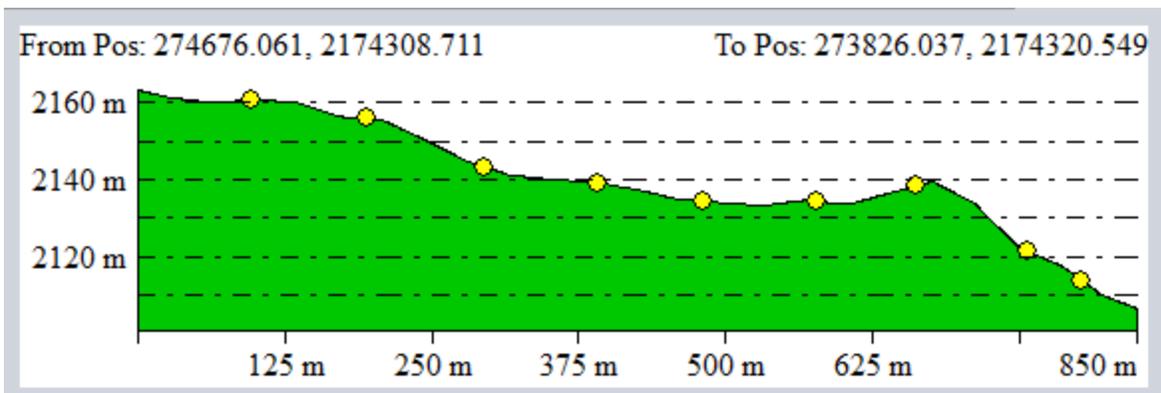


Ilustración 21. Perfil topográfico corte transversal.

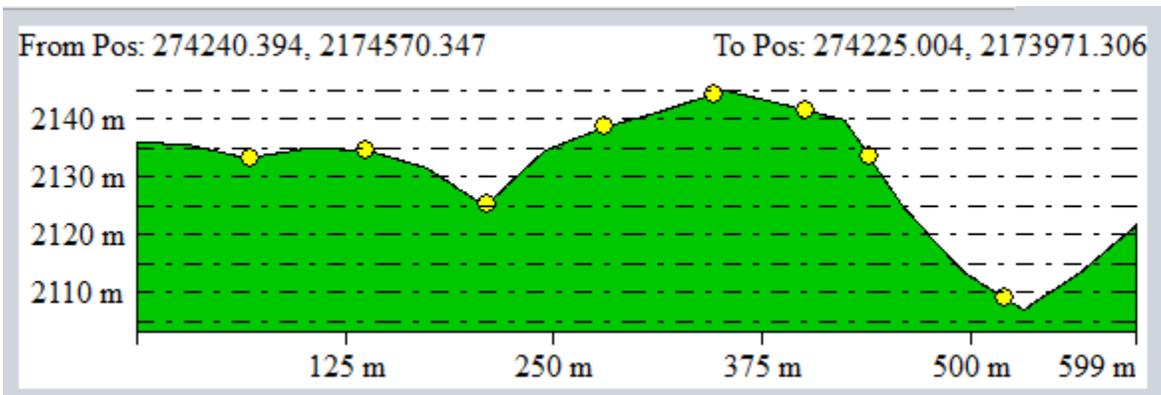


Ilustración 22. Perfil topográfico corte longitudinal.

4.3 Concentraciones de PM_{2.5} y CO obtenidas mediante el simulador de dispersión Screen3 y el modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano

4.3.1 Parámetros de entrada

En la Tablas 7 y 8 se muestran los parámetros de entrada al simulador de dispersión de pluma Gaussiano Screen3 y al modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano, así como las tasas de emisión empleadas en cada escenario propuesto. Las tasas de emisión fueron estimadas a partir de los datos reportados por (Medina P. , y otros, 2017), (Ruiz-García, y otros, 2018).y (Medina P. , y otros, 2019).

Tabla 7. Parámetros de entrada.

Localidad	Dispositivo de cocción	Longitud lateral más grande del área rectangular (m)	Longitud lateral más pequeña del área rectangular (m)	Tipo de terrero	Velocidad del viento por trimestre (m/s)				Estabilidad atmosférica	Altura de liberación total (m)
					1	2	3	4		
Jesu del Monte	Patsari	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	3.57
	Fogón U	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	0.9
	Fogón tres piedras	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	0.3
	Mera-Mera	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	3.45
	Ecostufa	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	3.57
	Onil	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	3.57
	Promedio de estufas con chimenea	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	3.546666667
	Estufa de gas LP	875.24	602.54	Simple	1.7	1.6	1.2	1.2	A-B	0.94

Tabla 8. Tasas de emisión de los dispositivos de cocción.

Dispositivo de cocción	Tasas de emisión		Tasas de emisión totales		Tasas de emisión por área		Referencia
	gCO/s	gPM _{2.5} /s	gCO/s	gPM _{2.5} /s	gCO/sm ²	gPM _{2.5} /sm ²	
Patsari	0.02167	0.002041	3.18549	0.3000	6.04E-06	6.7695E-06	Medina y col., 2017
Fogón U	0.05344	0.004207	7.85568	0.618444	1.49E-05	1.7066E-06	
Fogón tres piedras	0.080033722	0.005309	11.7649571	0.780493	2.23E-05	5.6886E-07	
Mera-Mera	0.02106	0.0013	3.09582	0.1911	5.87E-06	6.5419E-06	Ruiz-García y col., 2018
Ecostufa	0.0156	0.001317	2.2932	0.19354	4.35E-06	6.7695E-06	
Onil	0.0101	0.000917	1.4847	0.13475	2.82E-06	6.7695E-06	
Promedio de estufas con chimenea	0.0186	0.0011	2.7342	0.1617	5.18E-06	3.0662E-07	Medina y col., 2019
Estufa de gas LP	0.00056666	0.00002	0.19379772	0.00684	3.67E-07	1.78E-06	

4.3.2 Escenarios propuestos

Con el propósito de ejemplificar la bondad del simulador de Dispersión Gaussiano Screen3 y del Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano se propusieron diferentes escenarios para el cálculo de concentraciones de PM_{2.5} y CO.

4.3.2.1 Escenario 1

El primer escenario fue evaluado mediante el modelo Screen3, el cual ofrece una interfase gráfica que realiza ciertas preguntas con el fin de obtener la información necesaria para comenzar la simulación. Para este primer escenario los dispositivos de cocción se consideraron como fuentes de área unificadas, las tasas de emisión individuales fueron multiplicadas por el número total de hogares que emplean el dispositivo de cocción (para estufas eficientes de leña y dispositivos de cocción ineficientes este número fue de un total de 147 hogares, mientras que la para la estufa de gas LP este número fue de 343) y posteriormente divididas entre el área total, se consideró una clase de estabilidad B de acuerdo a la velocidad del viento y la condición diurna de insolación de la comunidad. Las Ilustraciones 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, y 30, muestran la concentración de ambos contaminantes en cada trimestre del año. Para el Trimestre 1 en relación a $PM_{2.5}$ (Ilustración 23) se observa que la estufa Patsari alcanzó una concentración de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de 507 m, la Ecostufa y Mera-Mera obtuvieron concentraciones máximas muy similares de 5.9 y $5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 507 y 508 m respectivamente, el fogón tres piedras alcanzó una concentración máxima de $37.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 480 m, rebasando la concentración máxima permitida por la OMS de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En relación al CO (Ilustración 24) la concentración máxima en el promedio de las 4 estufas de chimenea fue de $0.089 \text{ mg}/\text{m}^3$ a los 500 m, la estufa que produjo la concentración más baja fue la Onil con $0.04 \text{ mg}/\text{m}^3$ el fogón tipo U y el fogón tres piedras alcanzaron concentraciones máximas de 0.3 y $0.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ a los 480 y 400 m respectivamente, todos los dispositivos cumplieron con la concentración máxima permisible de la OMS de $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ (WHO, 2014).

Para el Trimestre 2 en $PM_{2.5}$ (Ilustración 25) las estufas con chimenea se mantuvieron por debajo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el fogón alcanzó una concentración de $27.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 528 m de distancia al foco emisor y el fogón tres piedras de $40.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 480 m. en relación a CO (Ilustración 26) todos los dispositivos cumplieron con la norma y se observó un comportamiento muy similar entre la estufa Onil y la Ecostufa con concentraciones de 0.04 y $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ a 400 m respectivamente.

Para el Trimestre 3 con el decremento en la velocidad del viento se observa un incremento en la concentración de $PM_{2.5}$ (Ilustración 27). El comportamiento de las estufas con chimenea es muy similar con concentraciones de $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Ecostufa, Mera-Mera y Onil respectivamente a los 500

m, como se mencionó a partir del decremento de velocidad el Fogón U incrementó su concentración a $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 528 m rebasando los lineamientos de la norma, el Fogón tres piedras alcanzó los $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 480 m, de igual manera se observa un cambio abrupto para el mismo a partir de los 500 a 600 m. En relación a CO (Ilustración 28) se observa un incremento en la concentración debido al decremento de velocidad del viento, pero todos los dispositivos continúan cumpliendo con la norma.

Finalmente, para el Trimestre 4 en relación al PM_{2.5} (Ilustración 29) se hace aún más notorio los cambios de concentración en relación a los decrementos de velocidad del viento, el Fogón U alcanzó los $36.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 528 m, tiene un cambio abrupto de los 500 a 600 m y el Fogón tres piedras alcanzó una concentración de $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los 480 m del foco emisor experimentado también cambios abruptos de concentración de los 500 a 700 m. Todas las estufas tipo plancha cumplieron con la norma de PM_{2.5} y todos los dispositivos cumplieron con la norma para CO (Ilustración 30).

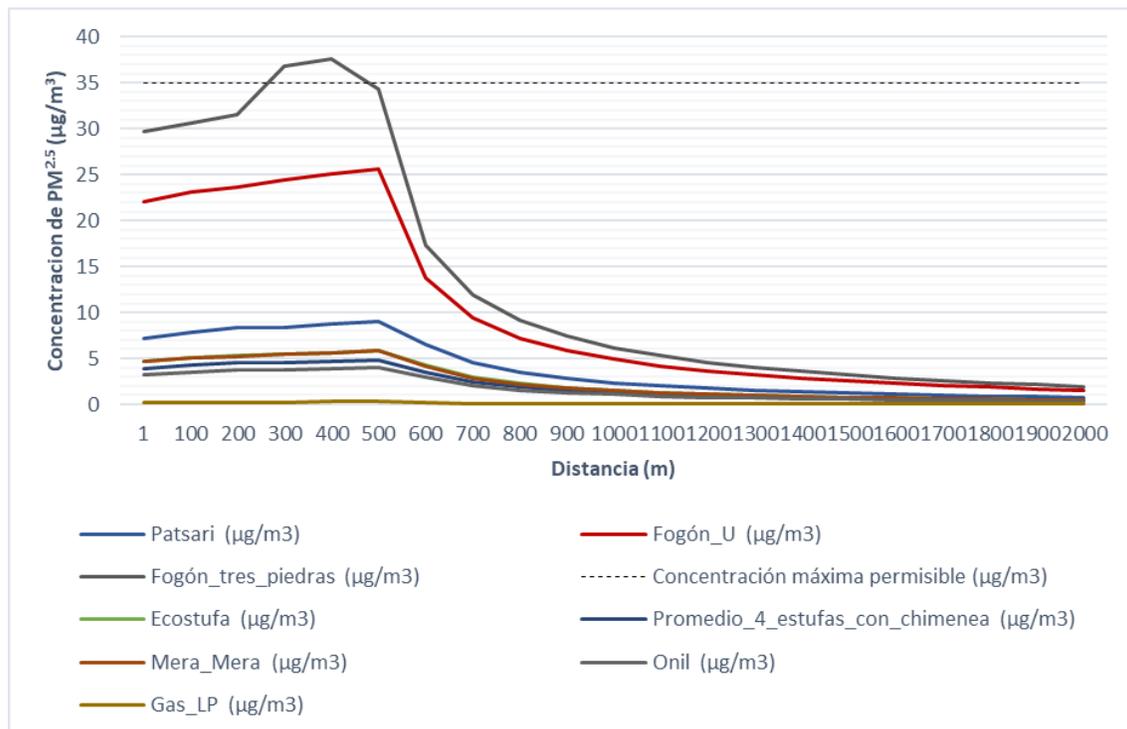


Ilustración 23. Concentración de PM_{2.5} vs Distancia (Trimestre 1).

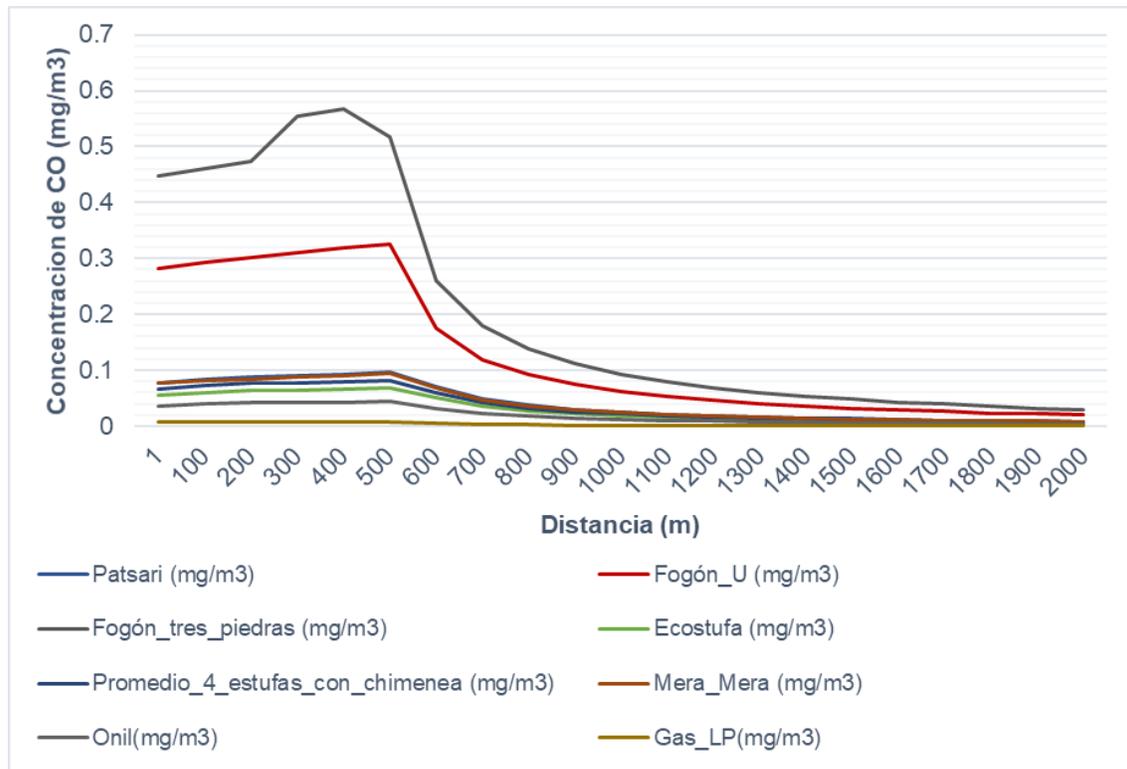
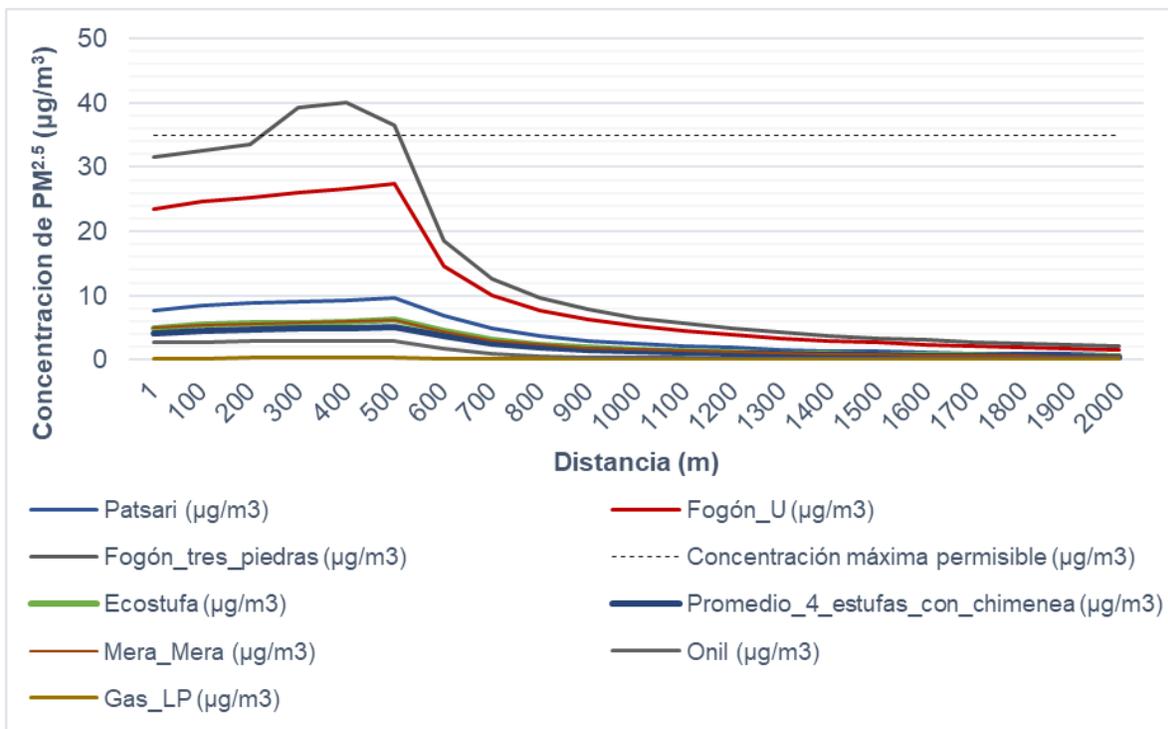


Ilustración 24. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 1).

Ilustración 25. Concentración de PM_{2.5} vs Distancia (Trimestre 2).

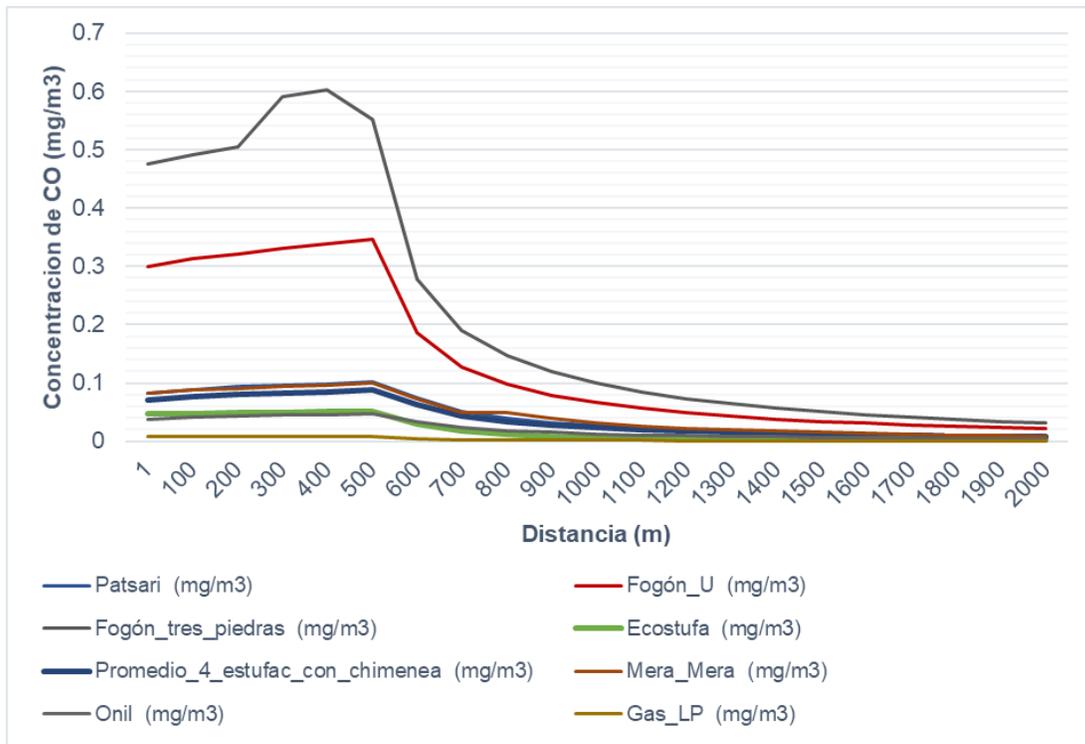


Ilustración 26. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 2).

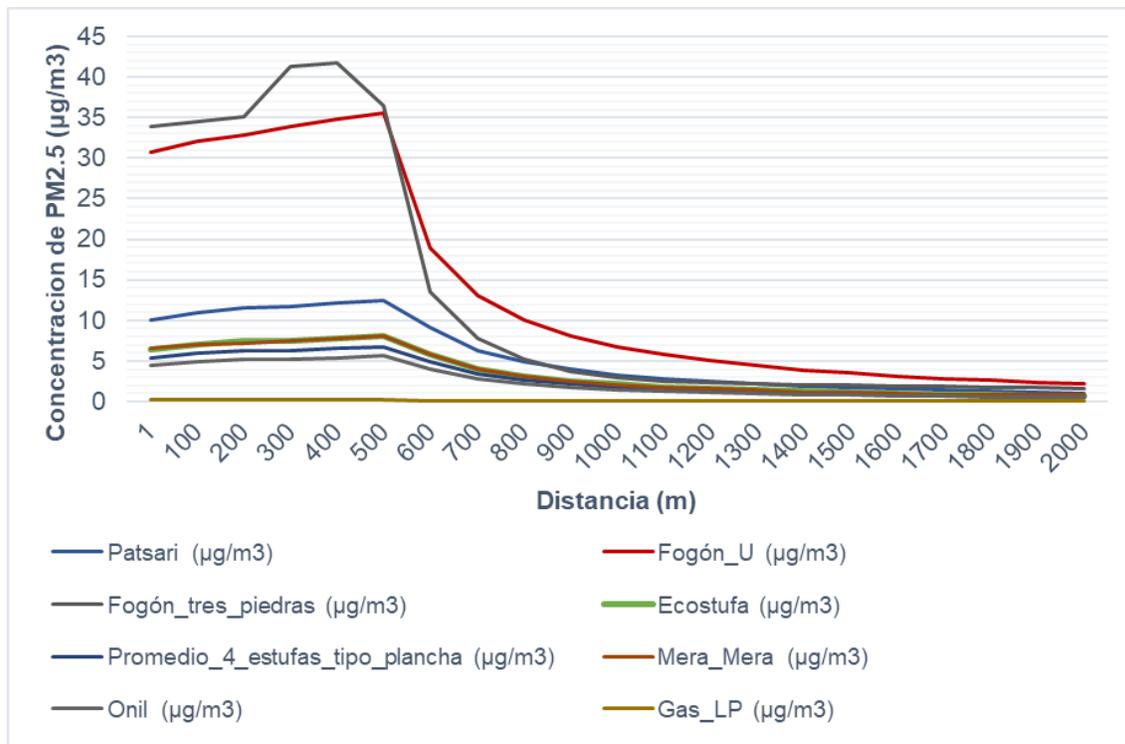


Ilustración 27. Concentración de PM_{2.5} vs Distancia (Trimestre 3).

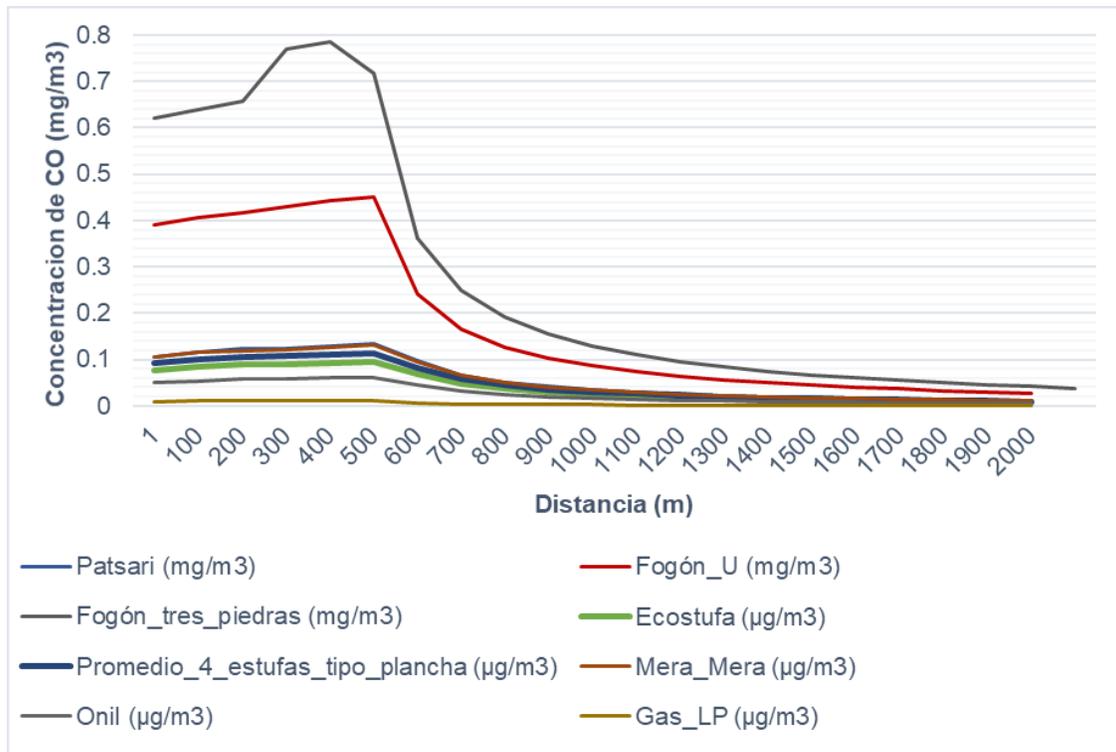


Ilustración 28. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 3).

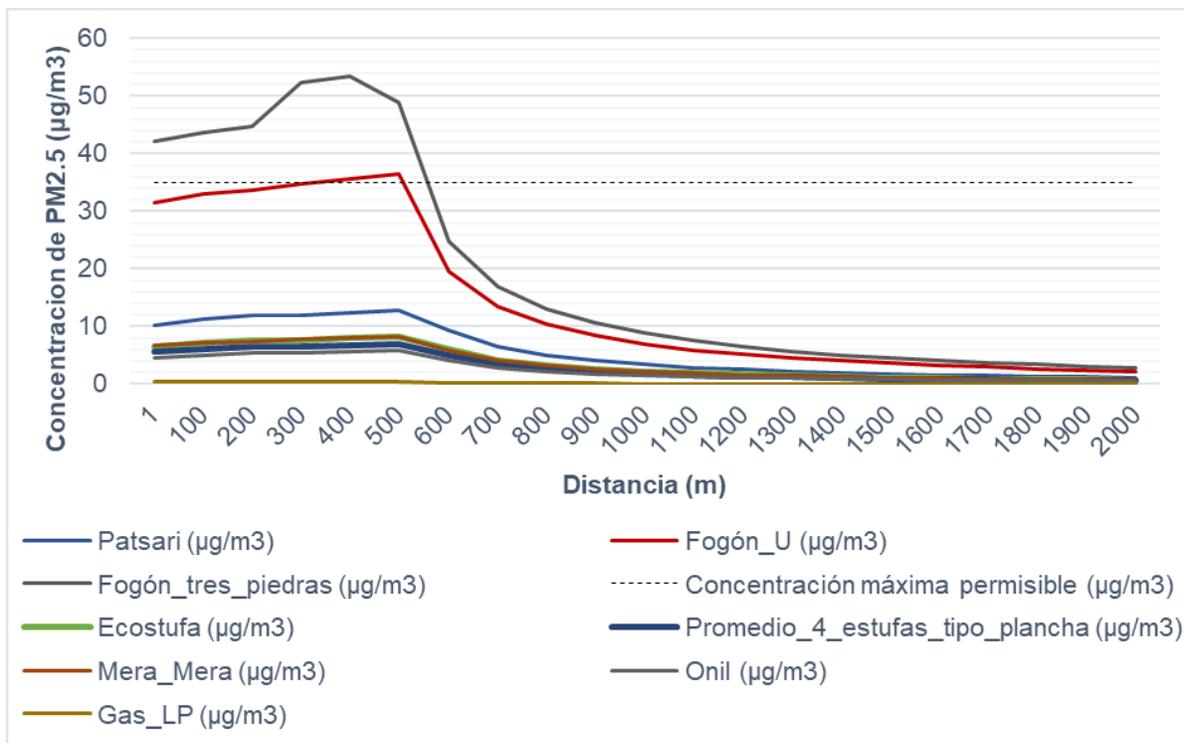


Ilustración 29. Concentración de PM_{2.5} vs Distancia (Trimestre 4).

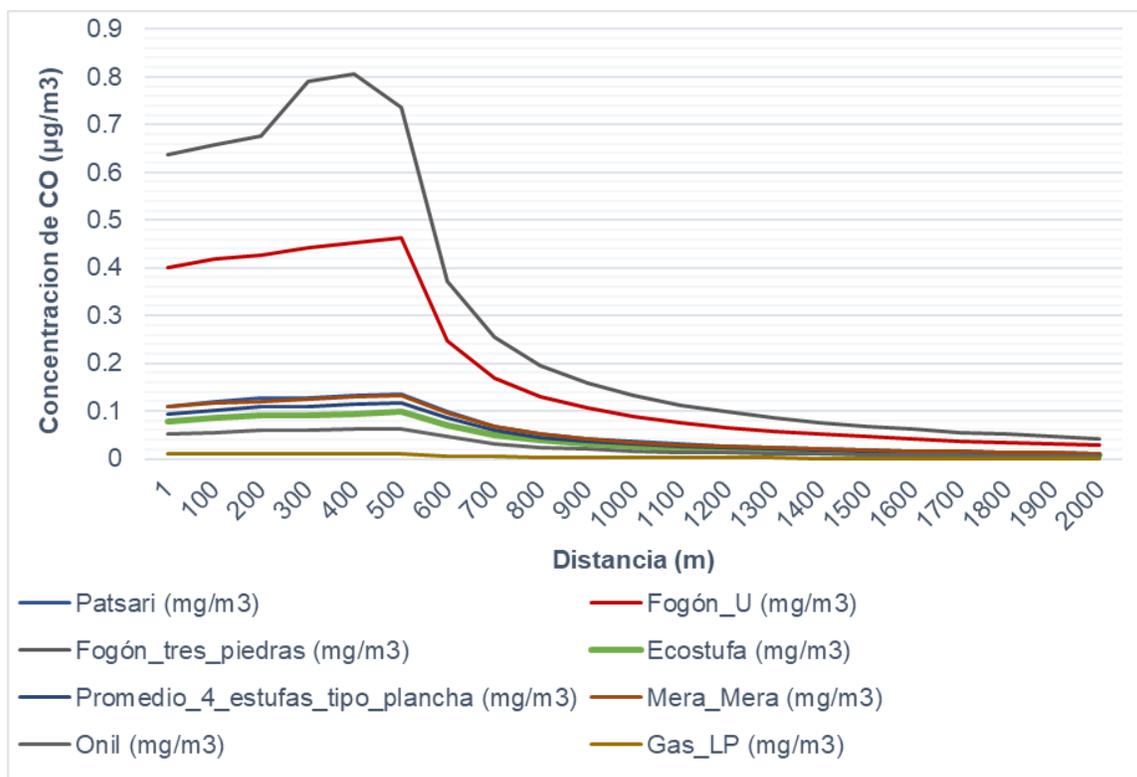


Ilustración 30. Concentración de CO vs Distancia (Trimestre 4).

4.3.2.2 Escenario 2

En el siguiente escenario los dispositivos de cocción se consideraron como fuentes puntuales unificadas, las tasas de emisión individuales fueron multiplicadas por el número total de hogares que emplean el dispositivo, se consideró una clase de estabilidad B de acuerdo a la velocidad del viento y la condición diurna de insolación de la comunidad y se empleó el Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano programado en Excel para calcular la concentración a lo largo del eje central de la pluma y para el cálculo de la concentración al eje horizontal de la pluma. Las Ilustraciones 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 muestran la concentración de ambos contaminantes sobre la línea central de la pluma en cada trimestre del año por dispositivo de cocción. La Ilustración 31 muestra la concentración de $PM_{2.5}$ de la Estufa Patsari, durante los cuatro trimestres del año. Se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 20 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de $PM_{2.5}$ fue de $2495 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2656 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3460 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3549 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, en el primer trimestre a los 300 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $33.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el

segundo trimestre a los 305 m la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el tercer trimestre a los 350 m la concentración decae a los $34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente en el cuarto trimestre a los 360 m la concentración decae a los $33.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual permite cumplir con los lineamientos de $\text{PM}_{2.5}$ establecidos por la OMS.

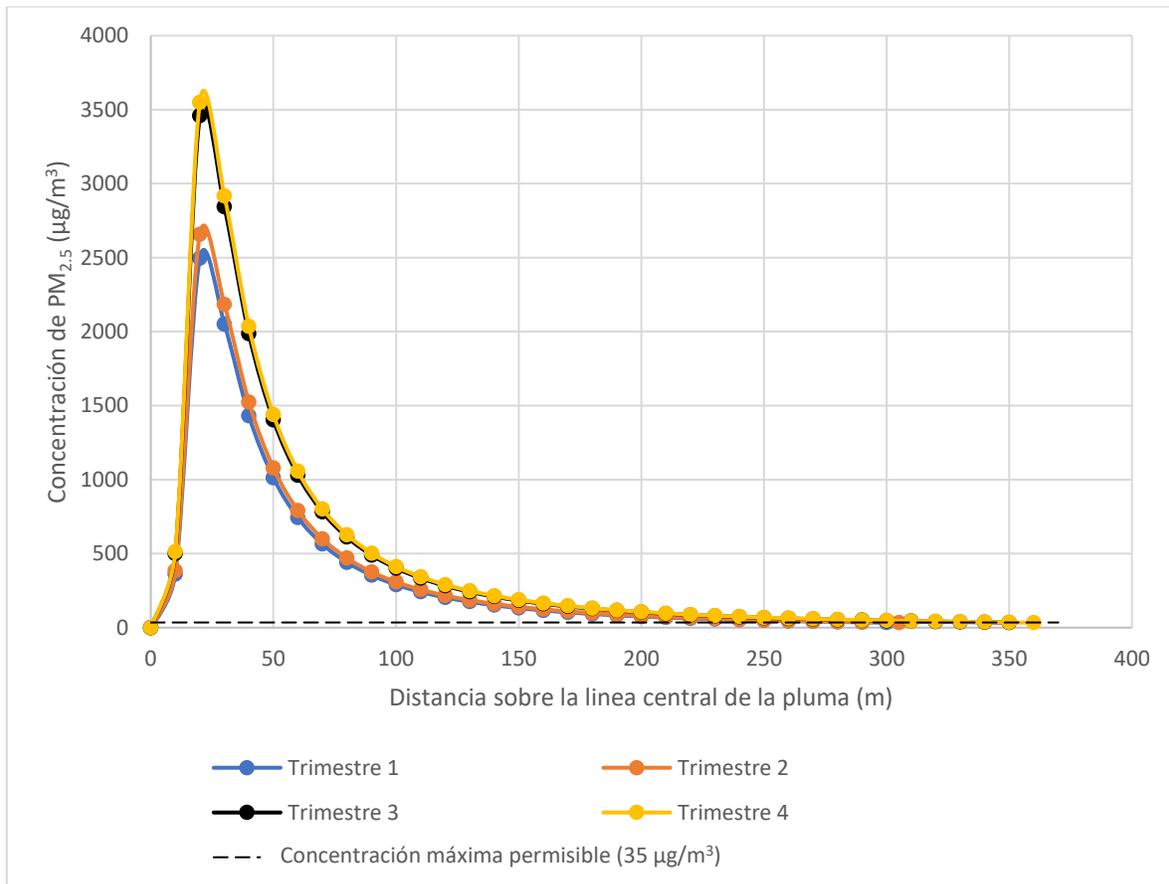


Ilustración 31. Concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la Estufa Patsari.

En relación al CO la Ilustración 32 muestra la concentración del contaminante, se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 20 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de CO fue de $26.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, $28.2 \text{ mg}/\text{m}^3$, $36.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $37.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, a los 65 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $6.84 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 67 m la concentración decae a los $6.9 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 77 m la concentración decae a los $6.9 \text{ mg}/\text{m}^3$ y a los 78 m la concentración decae

a los $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente lo cual permite cumplir con los lineamientos de CO establecidos por la OMS.

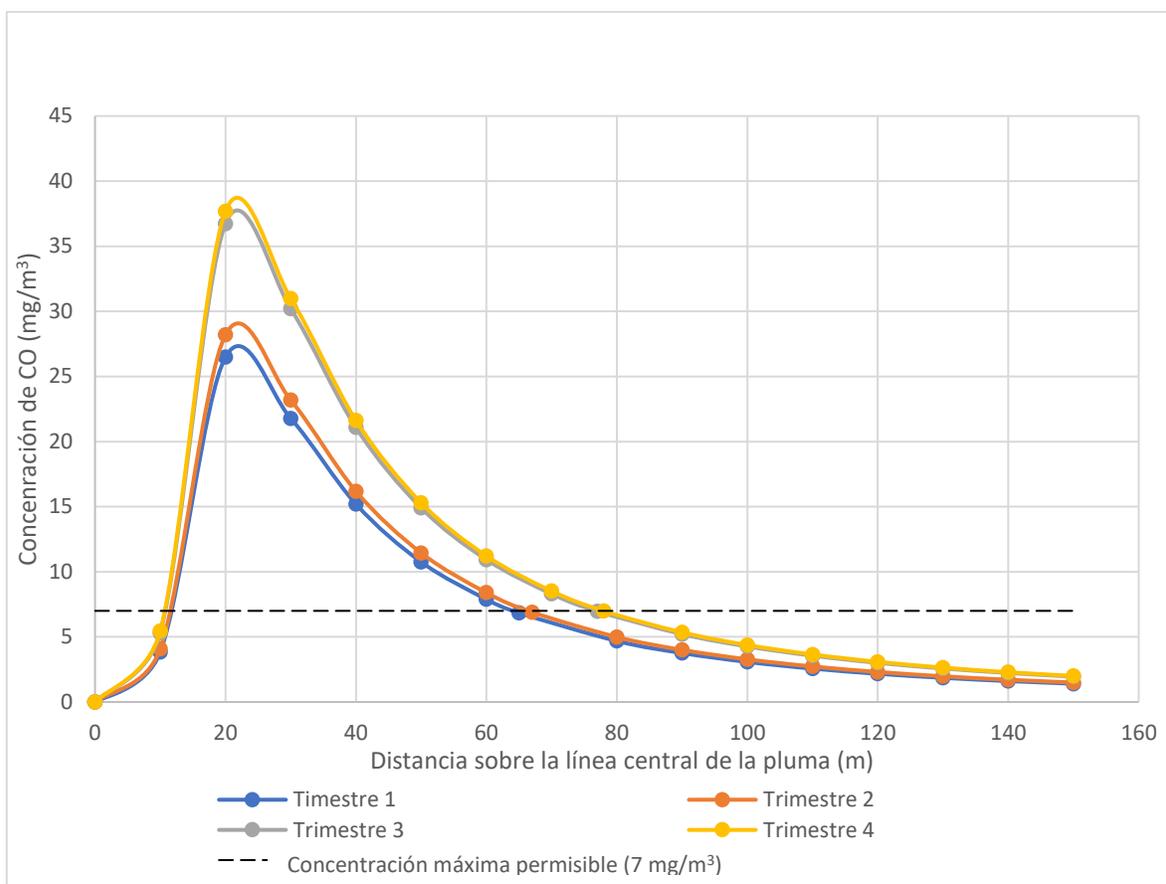


Ilustración 32. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la Estufa Patsari.

La Ilustración 33 muestra la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ del promedio de 4 estufas eficientes de leña (Patsari, Ecostufa, Mera-Mera y Onil) durante los cuatro trimestres del año. Se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 20 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de $\text{PM}_{2.5}$ fue de $1361.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1450 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1888 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1936.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, en el primer trimestre a los 216 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el segundo trimestre a los 229 m la concentración decae a los $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el tercer trimestre a los 255 m la concentración decae a los $34.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente en

el cuarto trimestre a los 260 m la concentración decae a los $34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual permite cumplir con los lineamientos de $\text{PM}_{2.5}$ establecidos por la OMS.

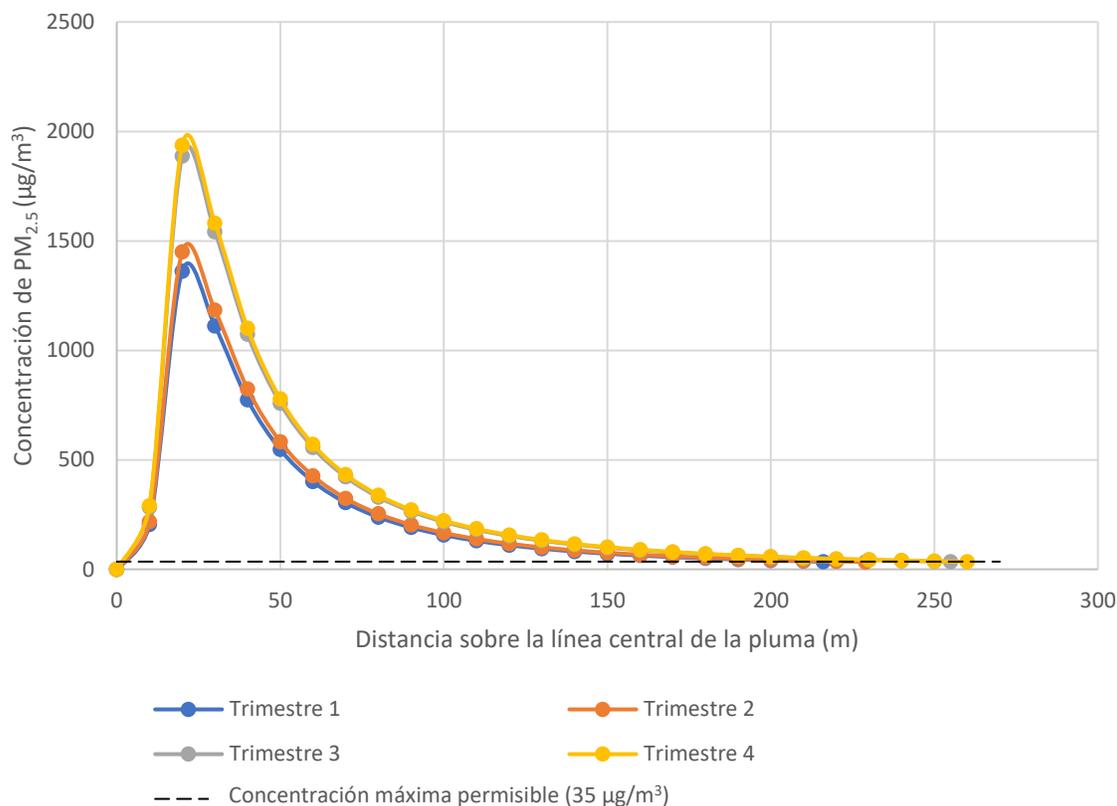


Ilustración 33. Concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el promedio de 4 estufas tipo plancha.

En relación al CO la Ilustración 34 muestra la concentración del contaminante, se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 20 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de CO fue de $23 \text{ mg}/\text{m}^3$, $24.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, $31.9 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $32.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, a los 59 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $7 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 64 m la concentración decae a los $6.4 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 73 m la concentración decae a los $6.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ y a los 77 m la concentración decae a los $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente lo cual permite cumplir con los lineamientos de CO establecidos por la OMS.

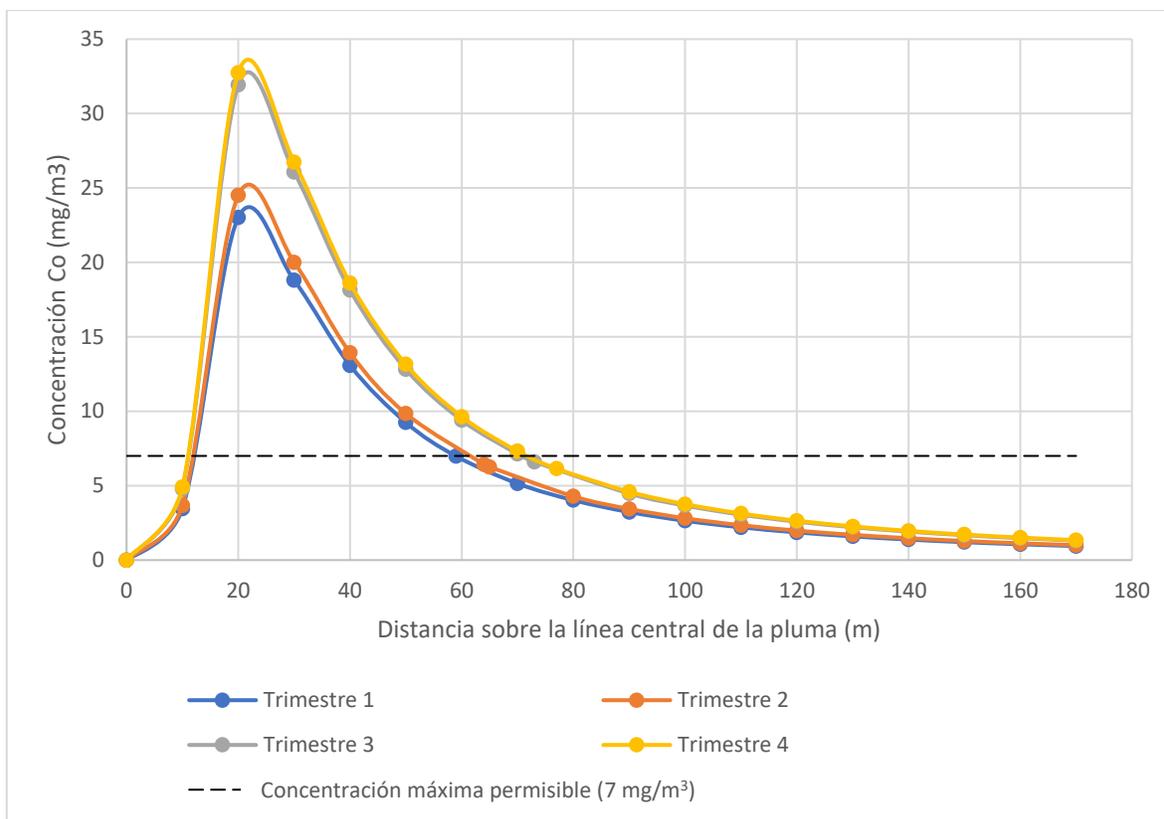


Ilustración 34. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el promedio de 4 estufas tipo plancha.

La Ilustración 35 muestra la concentración de $PM_{2.5}$ del Fogón tipo U durante los cuatro trimestres del año. Se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 5 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de $PM_{2.5}$ fue de $80714.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $85921 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $111015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $114809.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, en el primer trimestre a los 430 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $34.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el segundo trimestre a los 440 m la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el tercer trimestre a los 505 m la concentración decae a los $34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente en el cuarto trimestre a los 510 m la concentración decae a los $34.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual permite cumplir con los lineamientos de $PM_{2.5}$ establecidos por la OMS.

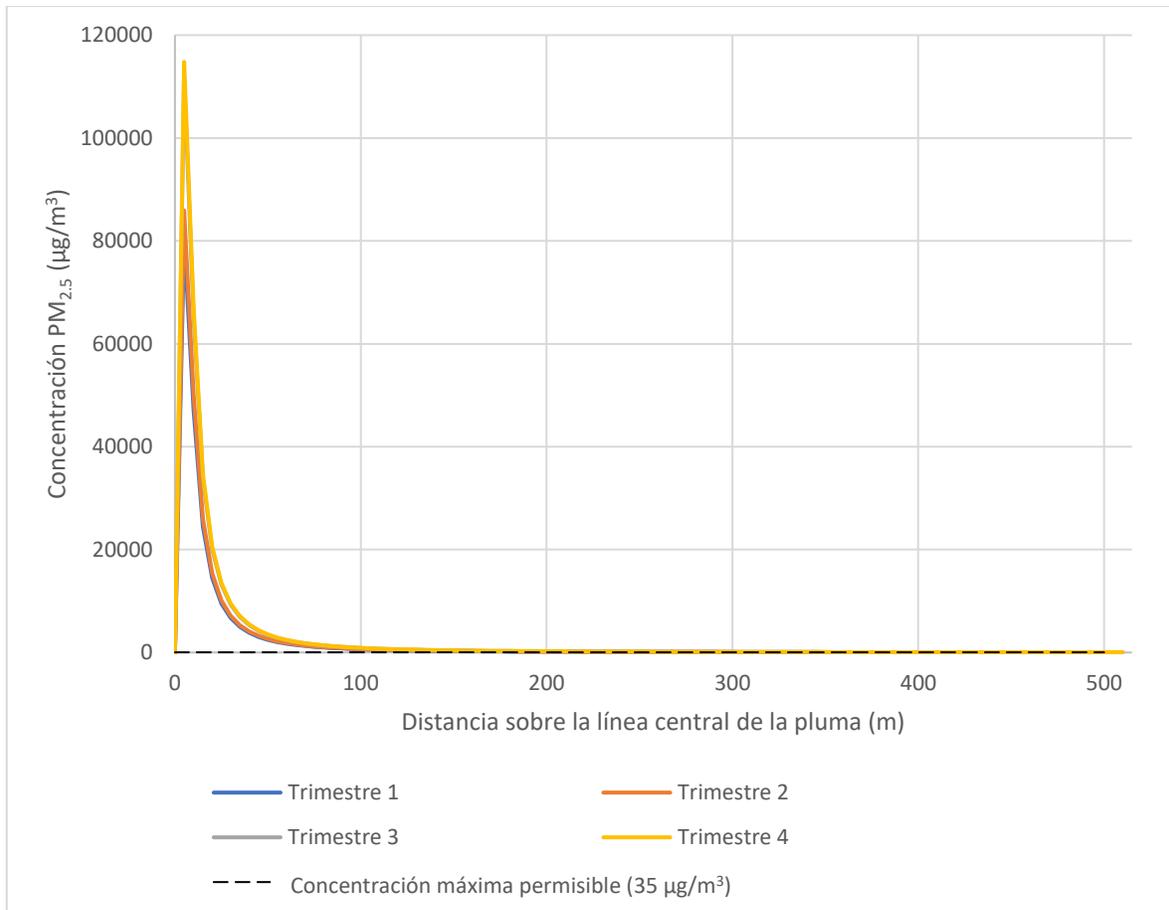


Ilustración 35. Concentraciones de $PM_{2.5}$ sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tipo U.

En relación al CO la Ilustración 36 muestra la concentración del contaminante, se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 20 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de CO fue de $1025 \text{ mg}/\text{m}^3$, $1091.4 \text{ mg}/\text{m}^3$, $1421.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $1458.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, a los 107 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $6.9 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 110 m la concentración decae a los $7 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 128 m la concentración decae a los $6.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ y a los 130 m la concentración decae a los $6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente lo cual permite cumplir con los lineamientos de CO establecidos por la OMS.

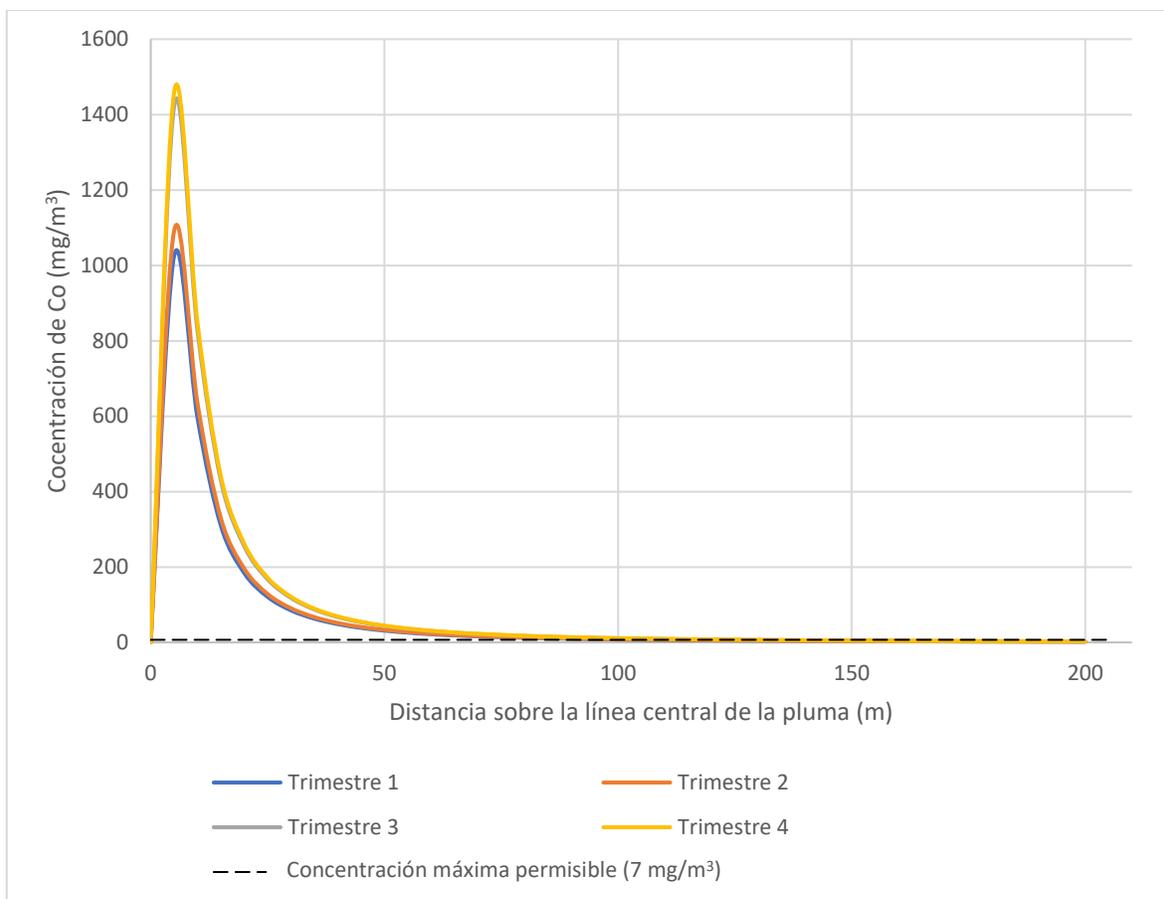


Ilustración 36. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tipo U.

La Ilustración 37 muestra la concentración de $PM_{2.5}$ del Fogón tres piedras durante los cuatro trimestres del año. Se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 2 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de $PM_{2.5}$ fue de $897684.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $955599.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1244688.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1276879 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, en el primer trimestre a los 479 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el segundo trimestre a los 495 m la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el tercer trimestre a los 566 m la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente en el cuarto trimestre a los 573 m la concentración decae a los $34.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual permite cumplir con los lineamientos de $PM_{2.5}$ establecidos por la OMS.

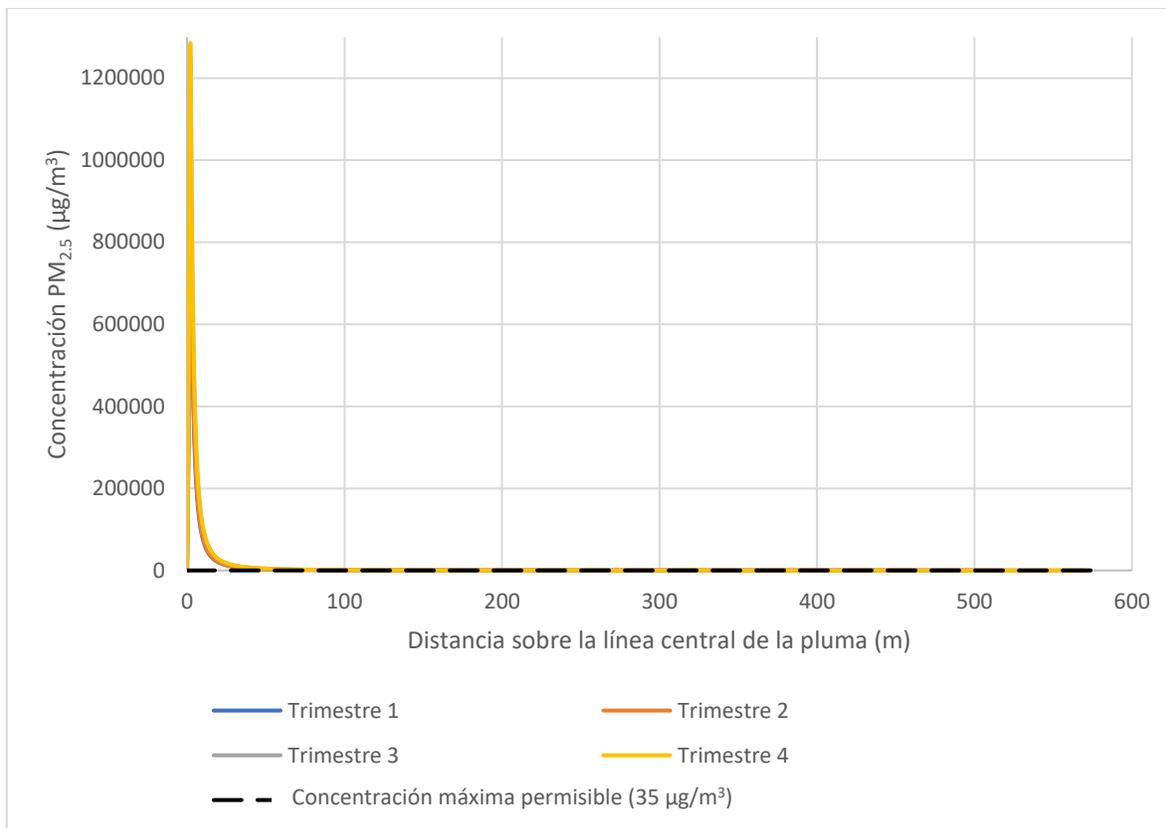


Ilustración 37. Concentraciones de $PM_{2.5}$ sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tres piedras.

En relación al CO la Ilustración 38 muestra la concentración del contaminante, se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 2 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de CO fue de $13531.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, $14404.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, $18762.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $19247.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, a los 131 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los $6.93 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 135 m la concentración decae a los $6.9 \text{ mg}/\text{m}^3$, a los 154 m la concentración decae a los $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ y a los 156 m la concentración decae a los $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente lo cual permite cumplir con los lineamientos de CO establecidos por la OMS.

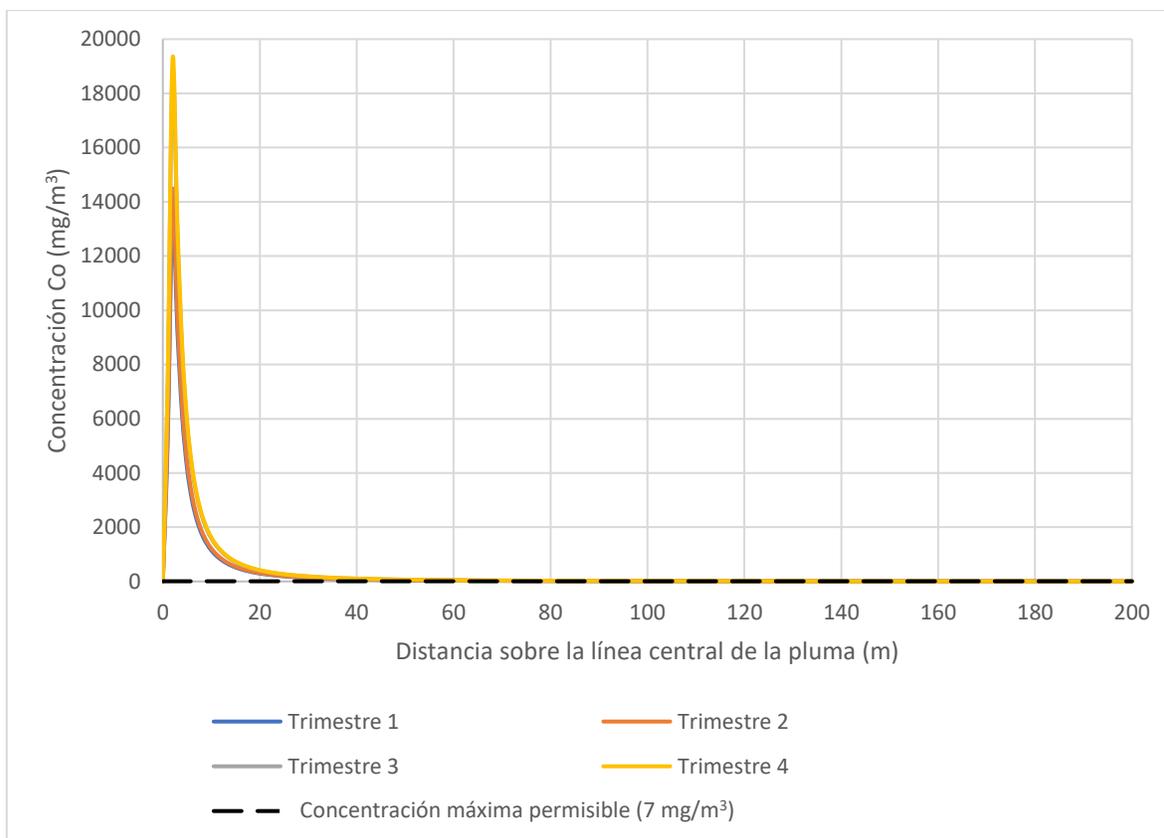


Ilustración 38. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por el Fogón tres piedras.

Finalmente, la Ilustración 39 muestra la concentración de PM_{2.5} de la estufa de gas LP durante los cuatro trimestres del año. Se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 6 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de PM_{2.5} fue de 814.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 866.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1129.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1158.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, en el primer trimestre a los 45 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los 33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el segundo trimestre a los 46 m la concentración decae a los 34.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para el tercer trimestre a los 52 m la concentración decae a los 34.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente en el cuarto trimestre a los 53 m la concentración decae a los 34.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual permite cumplir con los lineamientos de PM_{2.5} establecidos por la OMS.

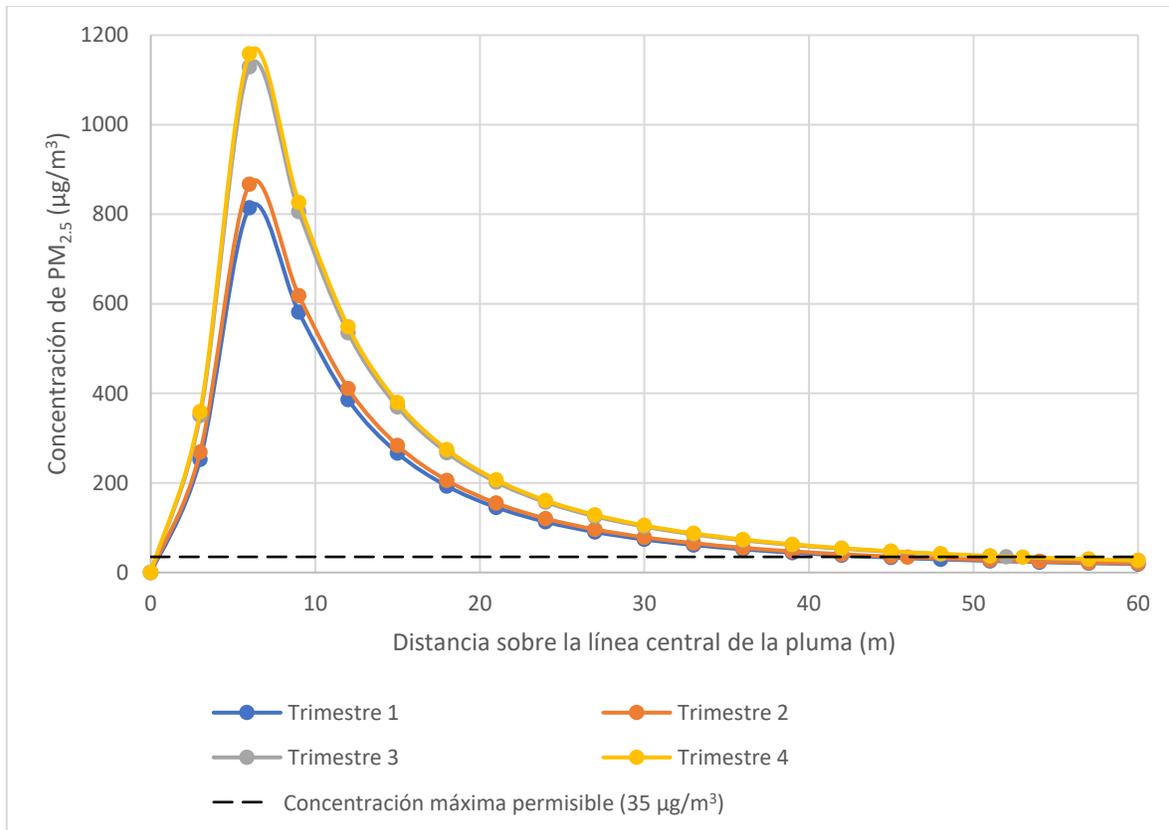


Ilustración 39. Concentraciones de PM_{2.5} sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la estufa de gas LP.

Y relacionado al CO la Ilustración 40 muestra la concentración del contaminante, se observa que la concentración máxima en los 4 trimestres se da a los 6 m de distancia al foco emisor, la concentración máxima alcanzada de CO fue de 142.1 mg/m³, 151.3 mg/m³, 197 mg/m³ y 202.1 mg/m³ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente, a los 43 m de distancia al foco emisor la concentración decae a los 6.4 mg/m³, a los 45 m la concentración decae a los 6.2 mg/m³, a los 51 m la concentración decae a los 6.3 mg/m³ y a los 51 m la concentración decae a los 6.5 µg/m³ para los trimestres 1, 2, 3 y 4 respectivamente lo cual permite cumplir con los lineamientos de CO establecidos por la OMS.

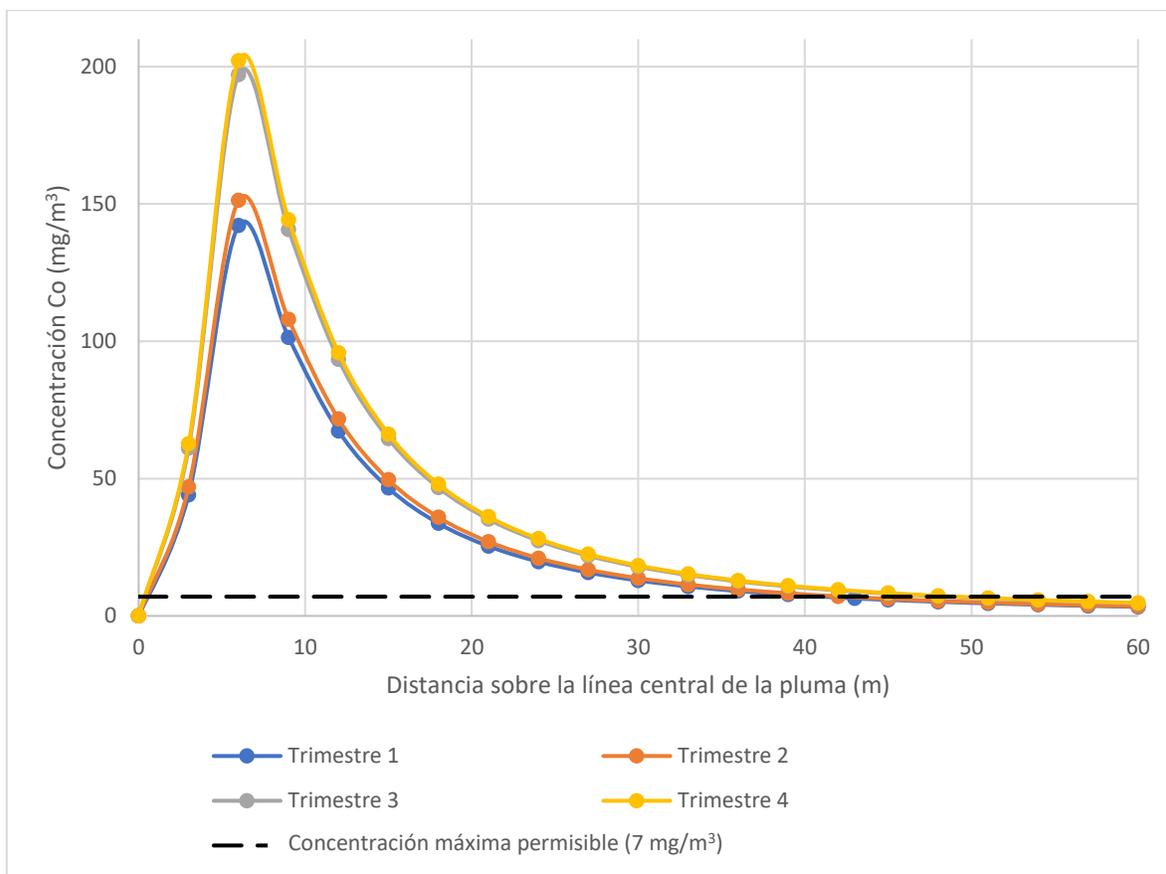


Ilustración 40. Concentraciones de CO sobre la línea central de la pluma durante los cuatro trimestres del año producidas por la estufa de gas LP.

4.3.2.3 Escenario 3

Se determinaron las concentraciones de $PM_{2.5}$ mediante el simulador Screen3 y el modelo de pluma Gaussiano de las estufas eficientes tipo plancha de manera individual durante el cuarto trimestre del año, en el cual se tiene la velocidad de viento más baja (1.16 m/s) variando la clase de estabilidad atmosférica. La Tabla 9 resume los datos de concentraciones máximas obtenidas con ambos modelos y las Ilustraciones 41, 42, 43, 44, y 45 muestran el comportamiento del contaminante de acuerdo a la estabilidad atmosférica y al modelo empleado. Se observa que cuando las estufas tipo plancha son empleadas de manera individual durante un ciclo de cocción son capaces de producir concentraciones de material particulado que entran dentro de los lineamientos máximos permisibles.

Tabla 9. Concentraciones de PM_{2.5} de las estufas tipo plancha obtenidas mediante el simulador Screen3 y el modelo de pluma Gaussiano.

Estufa eficiente	Clase de estabilidad atmosférica	Screen3		Modelo de pluma Gaussiano	
		Distancia (m)	Concentración máxima de PM _{2.5} (µg/m ³)	Distancia (m)	Concentración máxima de PM _{2.5} (µg/m ³)
Ecostufa	A	20	6.9	13	18.9
	B	22	8.0	20	15.6
	D	50	8.8	45	15.1
Patsari	A	17	11.0	13	29.4
	B	22	12.3	20	24.1
	D	50	13.5	45	23.5
Mera-Mera	A	15	7.4	13	19.9
	B	20	8.4	20	16.5
	D	50	9.3	40	16.0
Onil	A	30	2.1	13	13.2
	B	20	5.5	20	10.8
	D	40	5.7	45	10.5
Promedio 4 estufas con chimenea	A	20	5.8	13	16.0
	B	20	6.7	20	13.2
	D	50	7.5	50	12.8

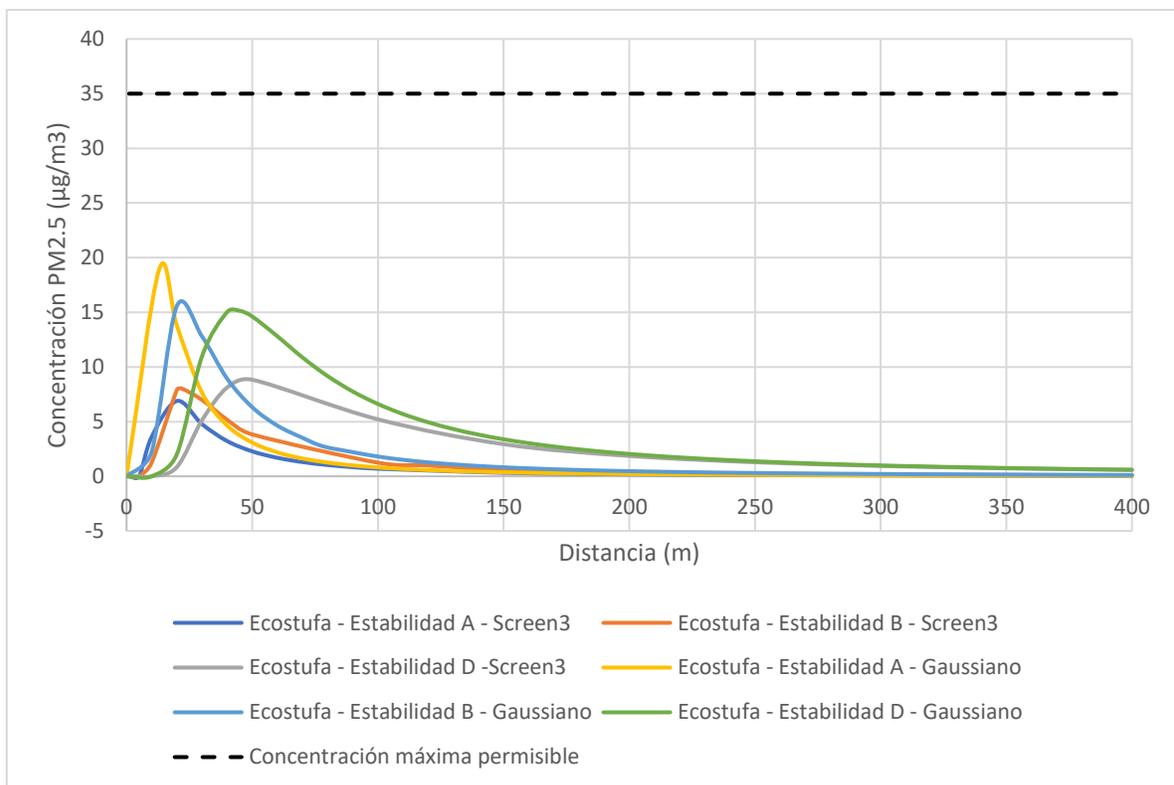


Ilustración 41. Concentraciones de PM_{2.5} sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Ecostufa.

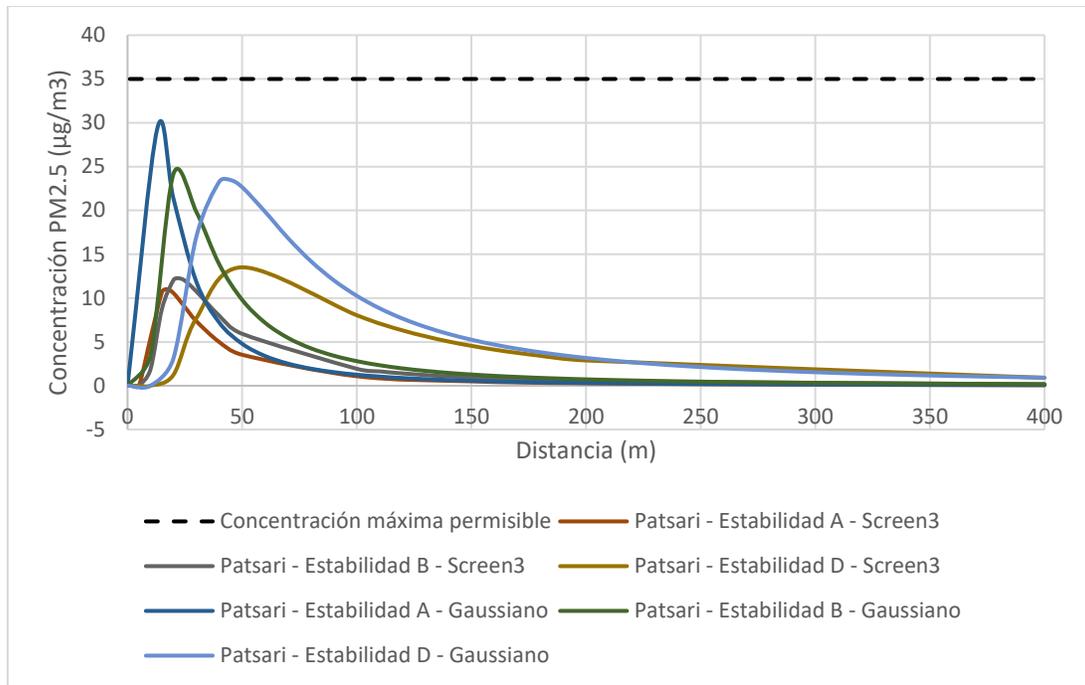


Ilustración 42. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Patsari.

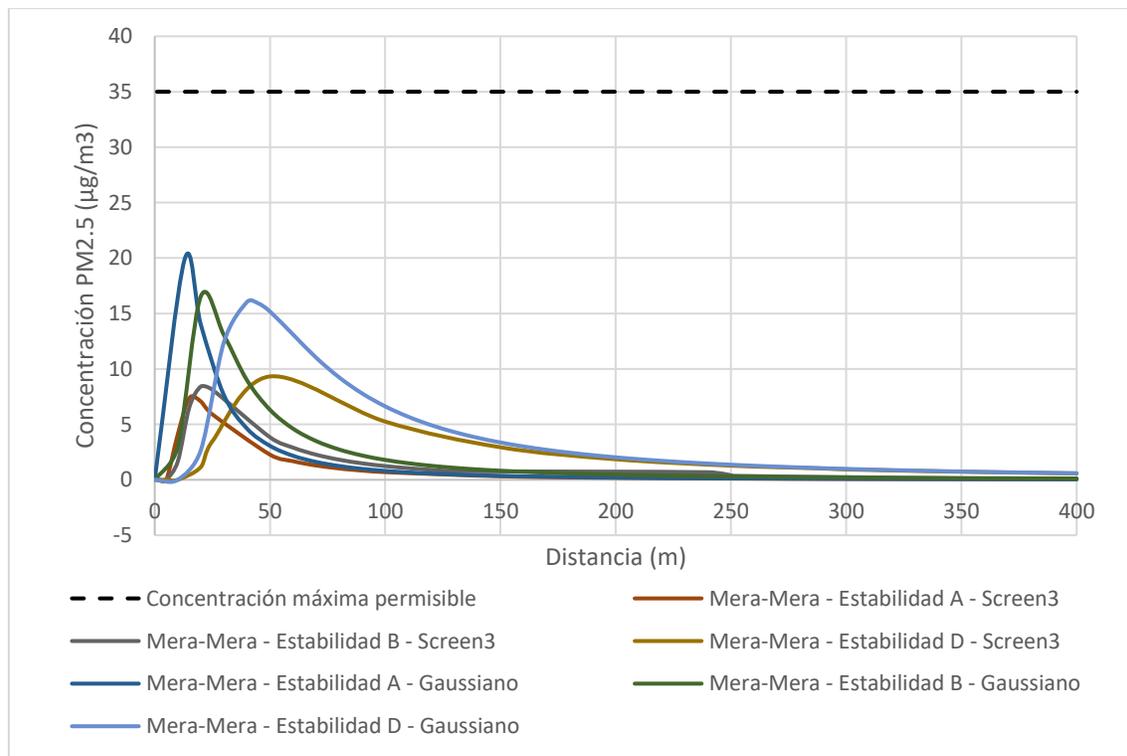


Ilustración 43. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Mera-Mera.

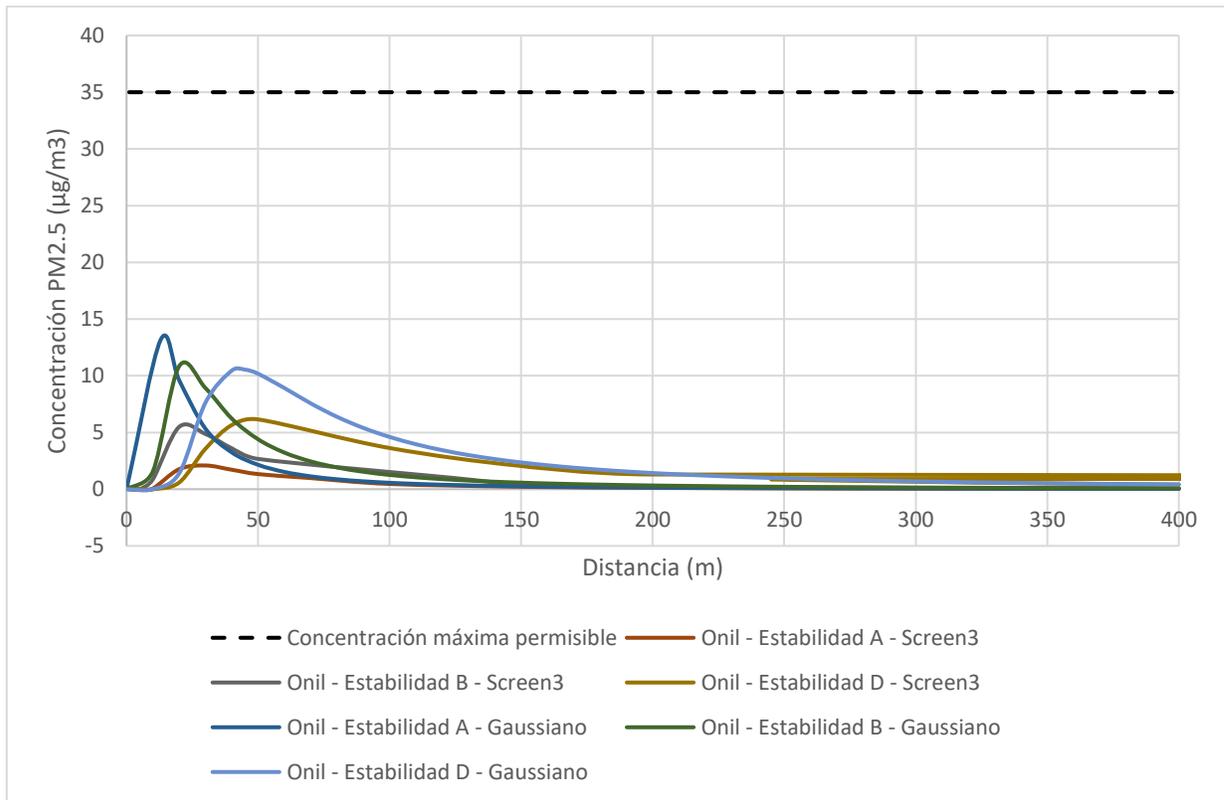


Ilustración 44. Concentraciones de PM2.5 sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Estufa Onil.

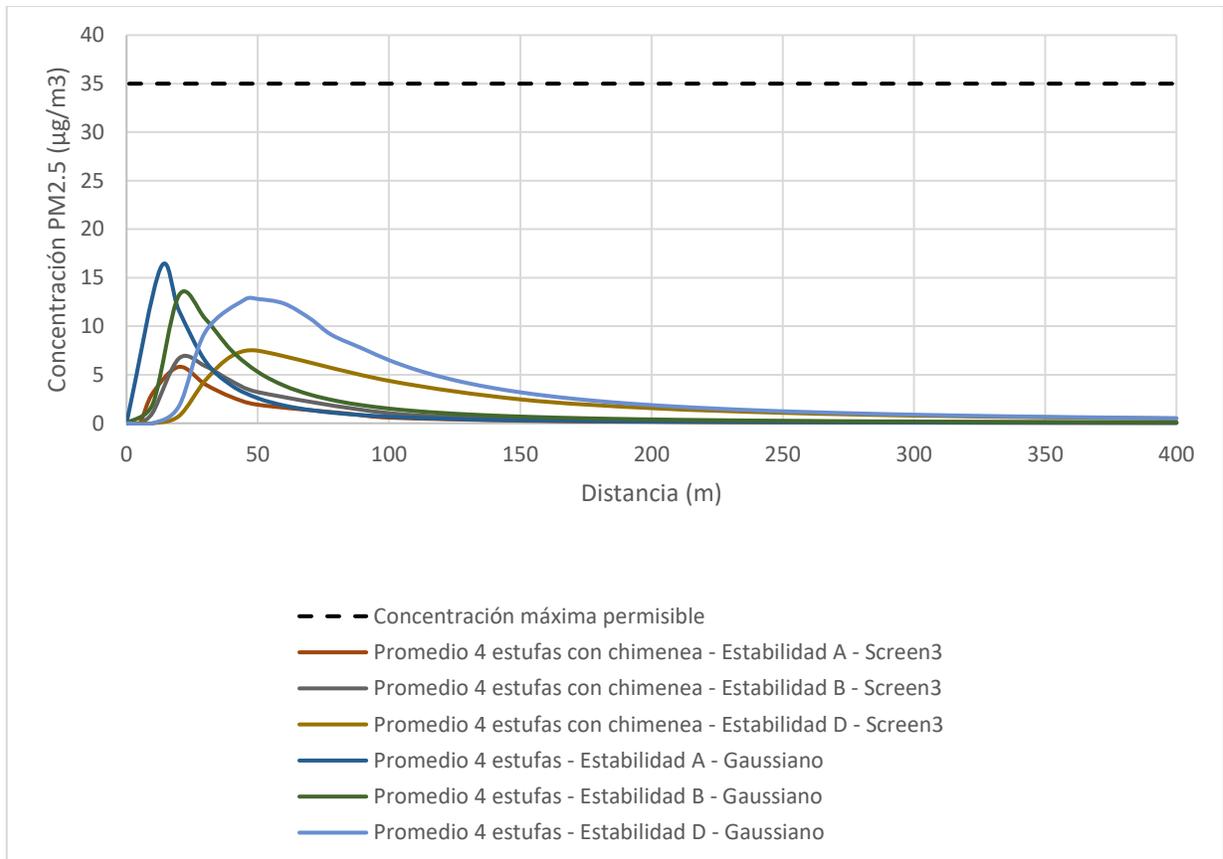


Ilustración 45. Concentraciones de PM_{2.5} sobre la línea central de la pluma variando la clase de estabilidad y el modelo empleado: Promedio 4 estufas con chimenea.

Relacionado a la Estufa de gas LP, el Fogón tipo U y el Fogón tres piedras, se calcularon sus concentraciones de PM_{2.5} en el cuatro trimestre y variando la clase de estabilidad atmosférica, únicamente mediante el Modelo de Pluma Gaussiano debido a que se carecía de un dato para poder simularlo con Screen3 (velocidad de salida de los gases del dispositivo). La Tabla 10 resume la información obtenida y las Ilustraciones 46, 47 y 48 muestran las concentraciones de acuerdo a la estabilidad A, B y D respectivamente.

Tabla 10. Concentraciones de PM_{2.5} de la estufa de gas LP, el fogón U y el fogón tres piedras obtenidas mediante el modelo de pluma Gaussiano.

Dispositivo de cocción	Clase de estabilidad atmosférica	Modelo de pluma Gaussiano	
		Distancia (m)	Concentración máxima de PM _{2.5} (µg/m ³)
Estufa de gas LP	A	5	3.2
	B	5	3.4
	D	11	3.4
Fogón tipo U	A	3	946.6
	B	5	781.0
	D	11	779.3
Fogón tres piedras	A	1	10750.5
	B	2	8686.3
	D	5	7365.7

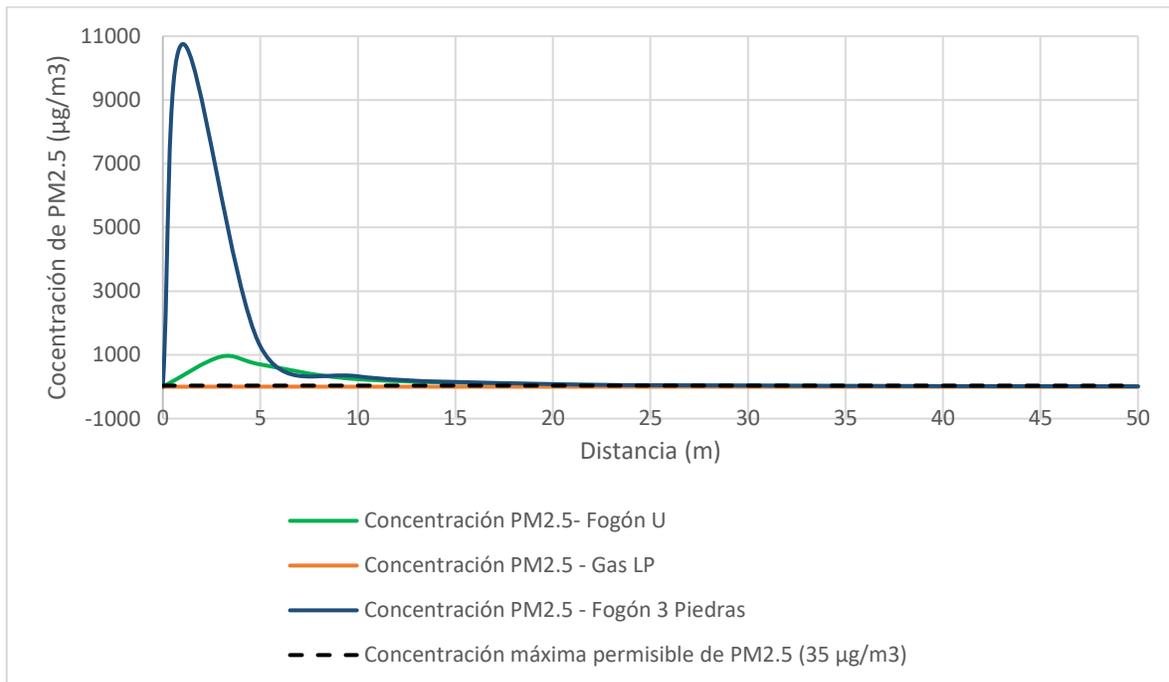


Ilustración 46. Concentraciones de PM_{2.5} en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica A para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.

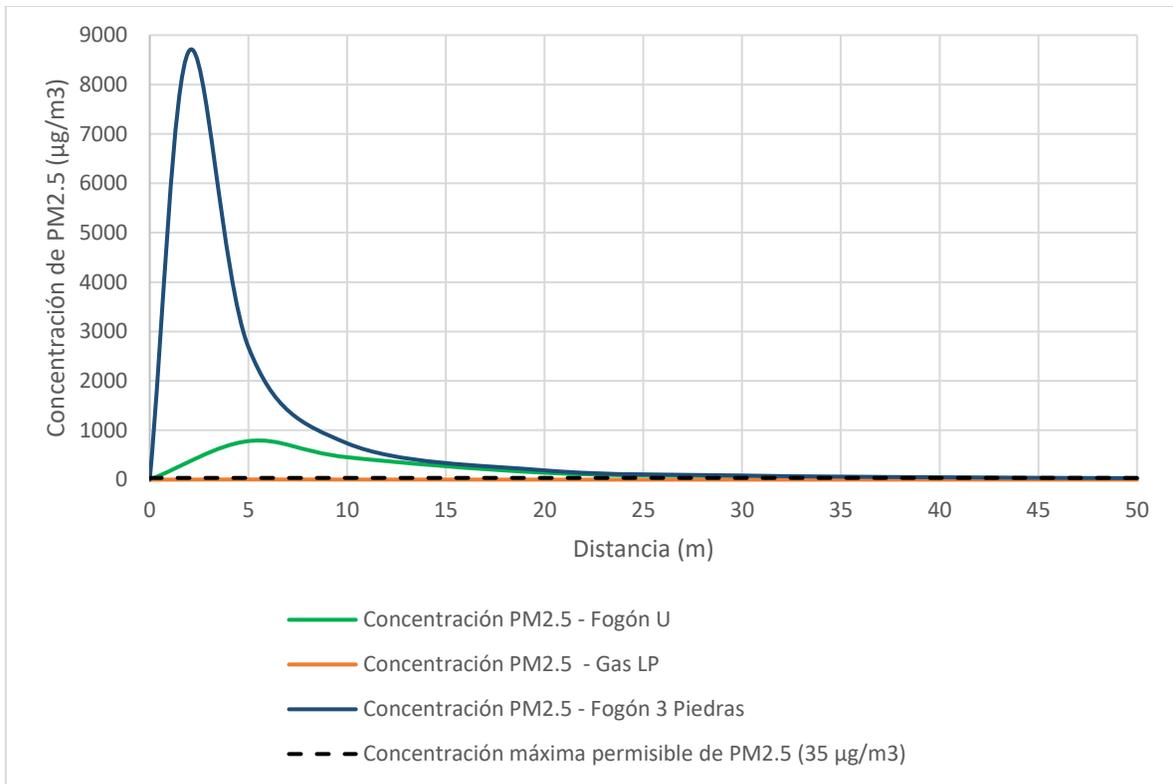


Ilustración 47. Concentraciones de PM2.5 en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica B para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.

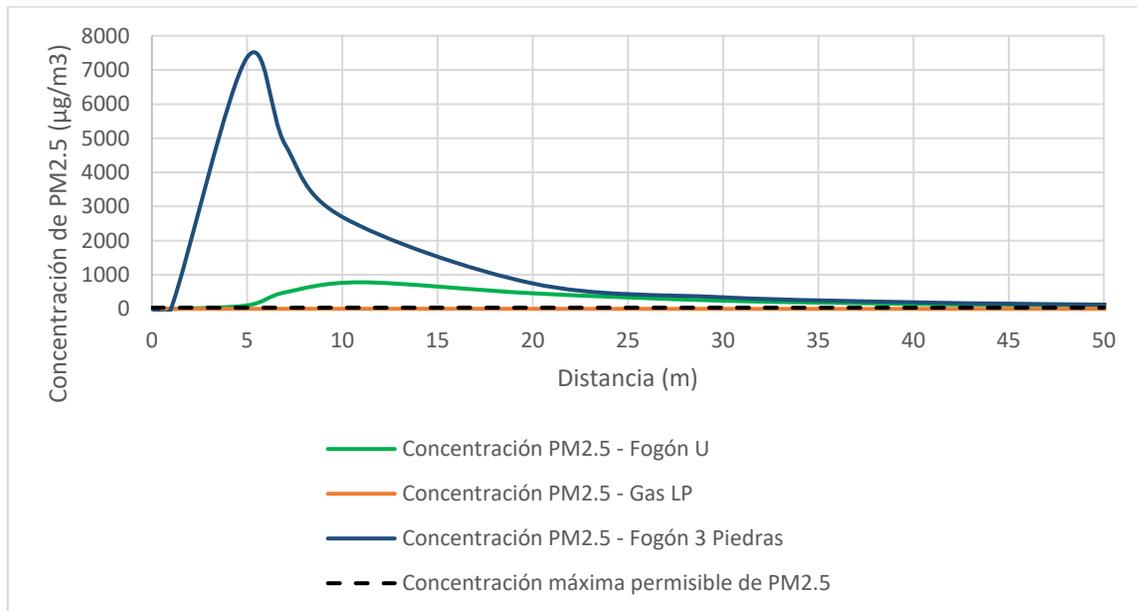


Ilustración 48. Concentraciones de PM2.5 en el 4 trimestre del año con una clase de estabilidad atmosférica D para la estufa de gas LP. El Fogón U y el Fogón tres piedras.

4.4 Comparación de resultados

Se realizó un ejercicio para comparar al Modelo de pluma Gaussiano y al modelo Gaussiano Screen3 con el modelo de dinámica de fluidos computacionales (CFD) empleado por (Ruiz-García, y otros, 2018), en su estudio se estimó el impacto de las emisiones de las estufas tipo plancha empleando CFD para determinar las densidades de viviendas donde las estufas tipo plancha podrían promocionarse sin efectos importantes de contaminación del vecindario en las casas circundantes. Estimaron concentraciones de pluma para tasas de emisión de 20, 40, 60 y 80 mg/min y determinaron la distancia entre viviendas a la cual la concentración de las emisiones disminuiría a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la altura de respiración del individuo con las tasas de emisión mencionadas previamente. La tabla 11 muestra la distancia en metros a la cual la concentración disminuye a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los tres diferentes modelos.

Tabla 11. Distancia entre viviendas para que la concentración de emisiones de PM_{2.5} de las estufas tipo plancha se reduzca a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la altura de respiración del individuo.

Estufa tipo plancha	CFD (Ruiz-García y col., 2018)	Screen3			Modelo de pluma Gaussiano		
	Estabilidad Atmosferica	Estabilidad Atmosferica			Estabilidad Atmosferica		
	B	A	B	D	A	B	D
ONIL	96	69	124	247.8	64	96	207
Ecostufa	136	80	119	192	77	117	254
Mera-Mera	138	80	110	290.6	77	116	252
Patsari	93	100	140	400	97	146	323
Promedio 4 tipos de estufas tipo plancha	115	84	100	250	70	106	229

La tabla 12 muestra la recreación del ejercicio de (Ruiz-García, y otros, 2018) empleando el Modelo de Dispersión de pluma Gaussiano y el simulador Screen3.

Tabla 12. Distancia entre viviendas para que la concentración de emisiones de PM_{2.5} de las estufas tipo plancha se reduzca a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la altura de respiración del individuo empleando diferentes tasas de emisión.

Tasa de emisión de mgPM _{2.5} /min	Modelo de Dispersión Gaussiano			Screen3		
	Estabilidad A	Estabilidad B	Estabilidad D	Estabilidad A	Estabilidad B	Estabilidad D
	Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)
20	36.5	55	114	35.4	49.2	123.5
40	54	81	173	55.3	76.7	193.3
60	66	100	217	69.7	97.3	246.9
80	77	116	255	81.6	114.5	292.1

Los datos se graficaron como se muestra en las Ilustraciones 47 y 48.

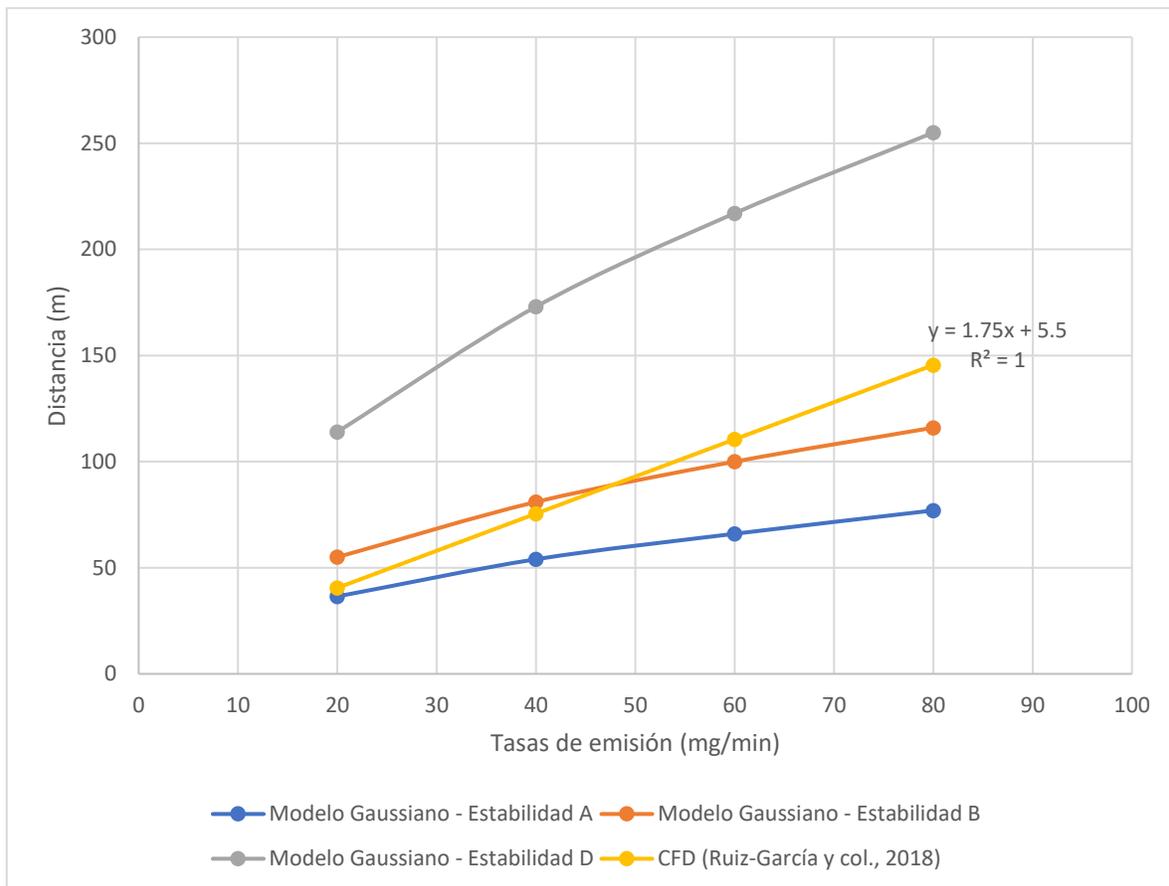


Ilustración 49. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM_{2.5} disminuya 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tasas de emisión de chimeneas (Modelo de pluma Gaussiano).

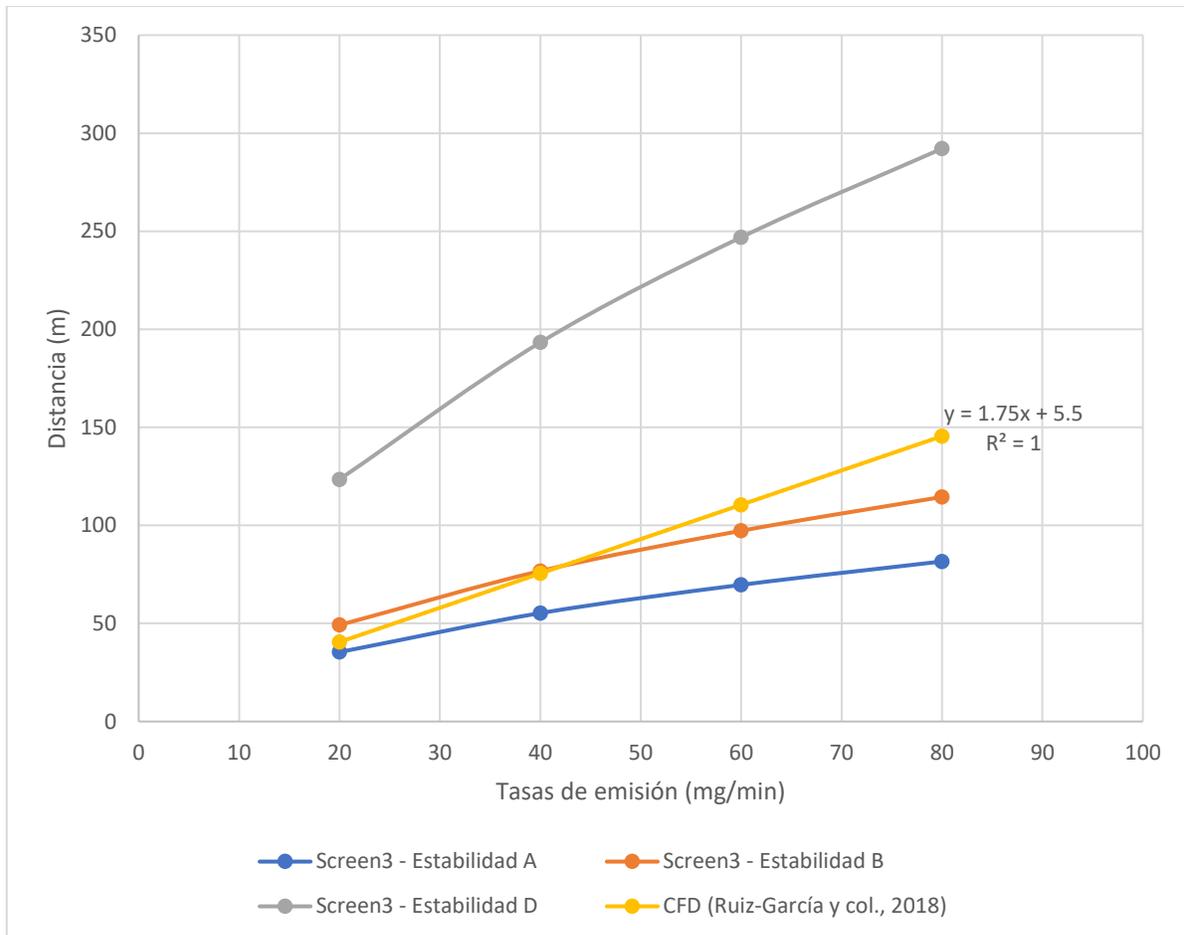


Ilustración 50. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM_{2.5} disminuya 1 µg/m³ para diferentes tasas de emisión de chimeneas (Screen3).

Se omitió a la estabilidad D como se muestra en la Ilustración 51 y posteriormente se emplearon las ecuaciones de cada modelo para interpolar nuevas tasas de emisión como se muestra en la Ilustración 52.

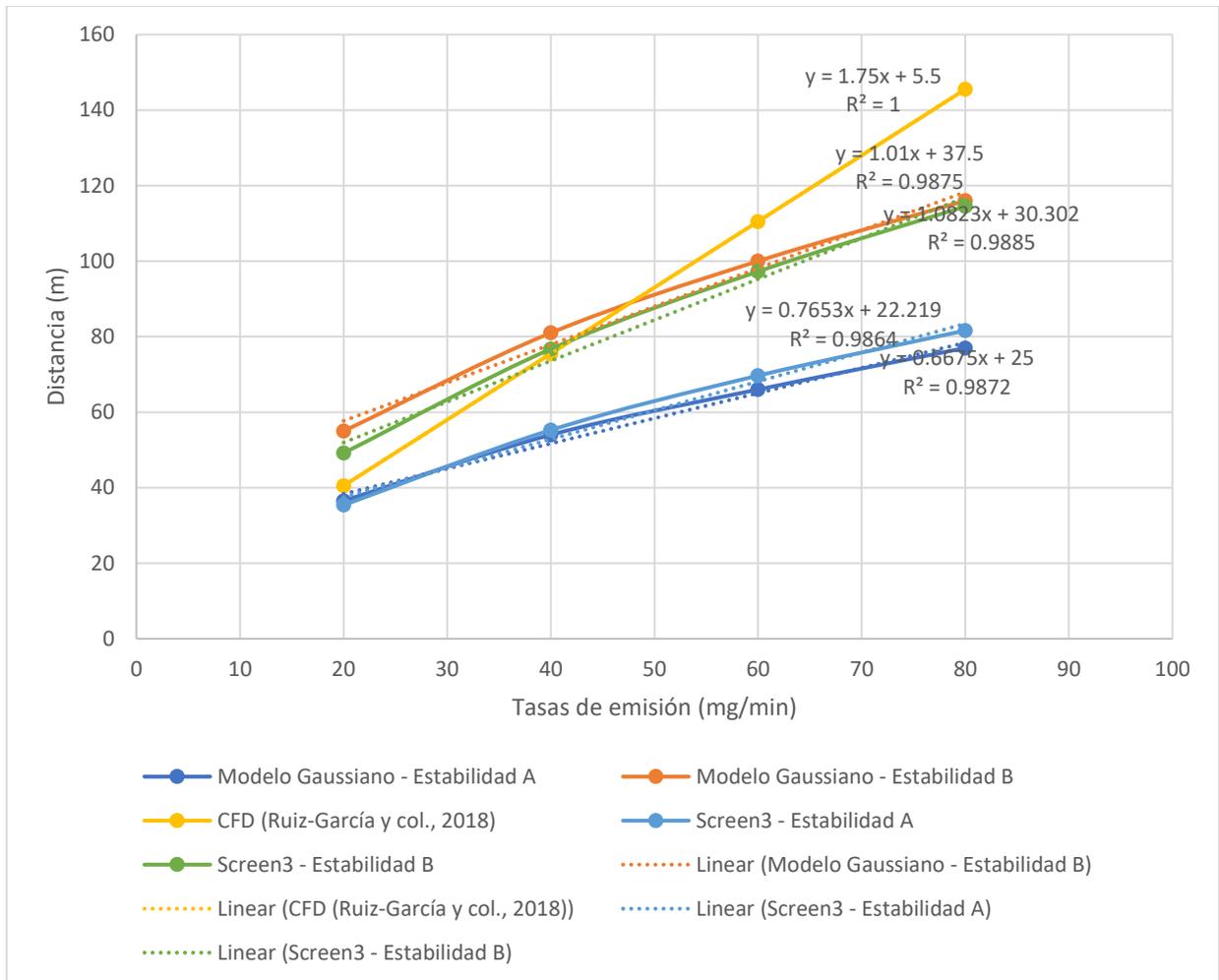


Ilustración 51. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM_{2.5} disminuya 1 µg/m³ para diferentes tasas de emisión de chimeneas para tres modelos de contaminación de aire.

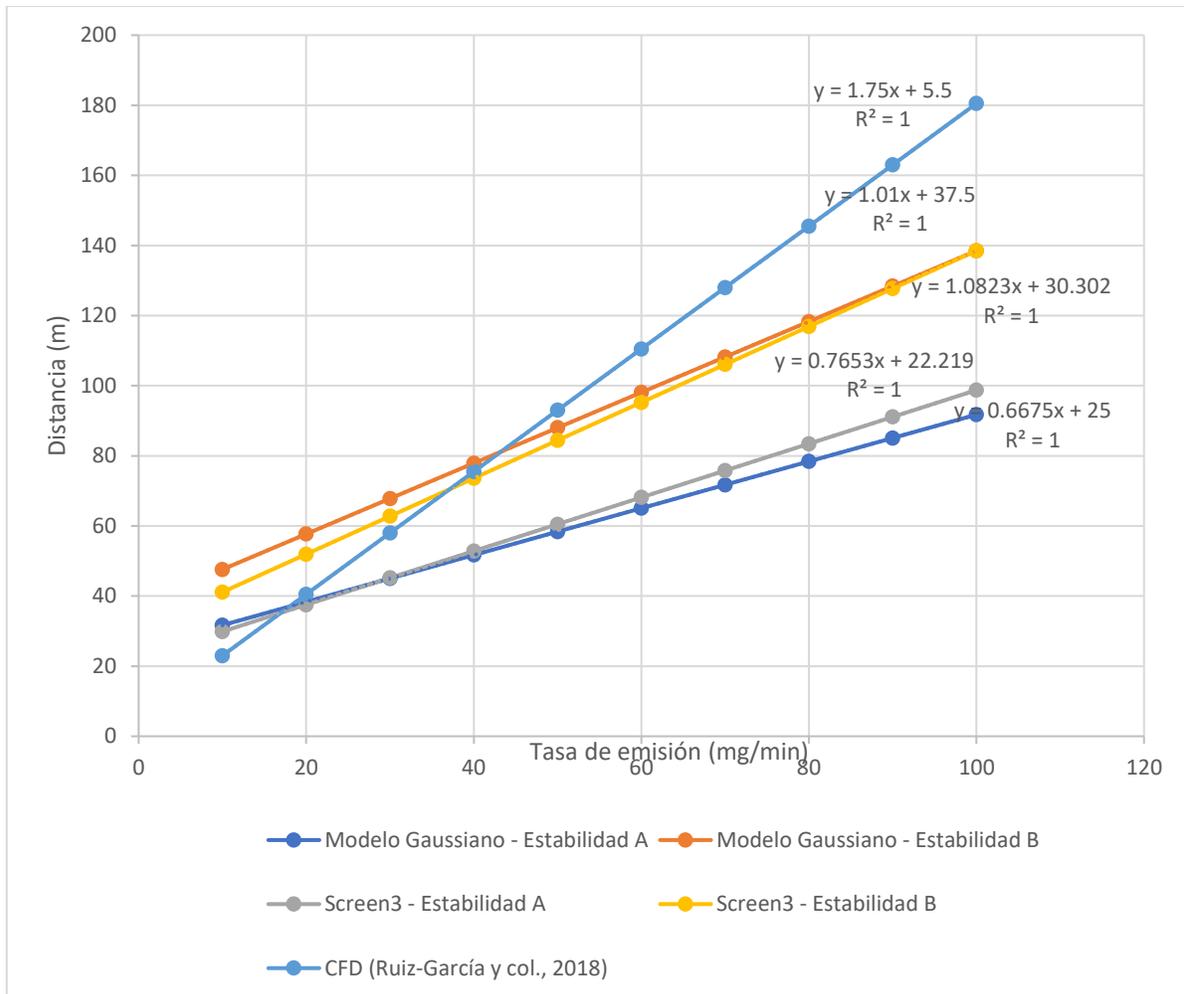


Ilustración 52. Distancia entre viviendas para que la concentración de las emisiones de PM_{2.5} disminuya 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tasas de emisión de chimeneas para tres modelos de contaminación de aire.

5. CONCLUSIONES

Se estudió la dispersión de contaminantes, productos de la combustión de leña, en dispositivos para satisfacer tareas de cocción; este estudio tuvo lugar en la Comunidad de Jesús del Monte, el estudio se realizó de manera trimestral para los cuatro trimestres que conforman el año.

Primeramente se realizó un estudio de vientos y se elaboraron rosas de vientos para los cuatro trimestres del año (trimestre 1; enero – febrero – marzo, trimestre 2; abril – mayo – junio, trimestre 3; julio – agosto – septiembre, trimestre 4; octubre – noviembre – diciembre) en un periodo de 15 años para determinar la dirección y la velocidad promedio del viento en la región, de acuerdo a los resultados obtenidos se observó que los vientos en la región predominan en dirección Norte (N) en sentido Norte y Nord-Este por el norte (NEpN) y Nord- Este (NE), la mayor frecuencia de vientos se dio en velocidades bajas comprendidas entre 0.5 a 2.1 m/s en un $\approx 70\%$ y las velocidades promedio fueron de 1.65 m/s, 1.55 m/s, 1.19 m/s y 1.16 m/s para los cuatro trimestres del año respectivamente.

Mediante el uso de dos modelos probabilísticos; el Modelo de Dispersión de Pluma Gaussiano y el Modelo de dispersión Gaussiano Screen3, se obtuvieron concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ y CO, así como su distribución espacial, siendo de particular interés el alcance de éstas.

Relacionado a los escenarios simulados, en el primer escenario donde los dispositivos de cocción se consideraron como fuentes de área unificadas se observa que todas las estufas tipo plancha y la estufa de gas LP cumplen con los lineamientos de la OMS ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7 \text{mg}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y CO respectivamente) para ambos contaminantes criterio, en relación al fogón "tres piedras", este incumple durante los cuatro trimestres del año con los lineamientos para $PM_{2.5}$, no así para el CO y finalmente en relación al fogón tipo "U" se observa que durante los dos primeros trimestres del año cumple con los lineamientos de $PM_{2.5}$ establecidos por la OMS, pero al decaimiento de velocidad en los dos trimestres posteriores se da un incremento en su concentración lo que implica que deje de cumplir con los lineamientos para este contaminante, relacionado al CO cumplió con lo establecido por la OMS, esto nos indica que las variables que afectan a la dispersión de contaminantes son la velocidad del viento y la clase de estabilidad atmosférica presente. En el escenario donde los dispositivos son considerados

como fuentes puntuales, donde se emiten las emisiones de manera individual se observó que en los tres tipos de estabilidad atmosférica (A, D y B) las estufas tipo plancha y la estufa de gas LP cumplen con los lineamientos para ambos contaminantes criterio y no así para el fogón tipo "U" y el fogón "tres piedras", los cuales incumplen con los lineamientos de la OMS para ambos contaminantes criterio.

El modelo Gaussiano es uno de los más utilizados en la evaluación de la dispersión atmosférica; sin embargo, incluye diversas simplificaciones que se establecen para su desarrollo. Al observar la formulación del Modelo de Pluma Gaussiano, se nota que a mayor velocidad del viento y o mayor estabilidad atmosférica, el modelo predecirá menor concentración de contaminantes a nivel del suelo.

Cualquier simulación matemática de algún fenómeno tan complejo como lo es la dispersión atmosférica permite obtener resultados aproximados, más no reflejar en su totalidad, al fenómeno. Por tanto, estos resultados pueden ser considerados como instrumentos preliminares para planificar y adoptar medidas correctoras, ya que a través de ellos se pueden identificar las zonas con mayor y menor incidencia de contaminación atmosférica.

La aplicación desarrollada permitió obtener el cálculo de posibles concentraciones de contaminantes presentes en la pluma de chimenea para diversos escenarios comunes en la región de la Comunidad de Jesús del Monte.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahrens, C. (1998). *Essentials Of Meteorology: an invitation to the atmosphere. Wadsworth Publishing Company. 2nd edition.*
- AL, E., & L., P. (2003). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.*
- Barton, C., Buttler, L., Zarzecki, C., Flaherty, J., & Kaiser, M. (2006). Characterizing Perfluorooctanoate in Ambient Air near the Fence Line of a Manufacturing Facility: Comparing Modeled and Monitored Values. *Journal of the Air & Waste Management Association, 56*, 48-55.
- Bracho , L., & Bravo, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles:¿ hacen daño a la salud?;¿ podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica, 69*, 29-44.
- D' amato, G. (2000). Urban air pollution and plant-derived respiratory allergy. *Clinical and Experimental Allergy,, 30(5)*, 628-636.
- Du, S. M. (2001). A heuristic Lagrangian stochastic particle model of relative diffusion: model formulation and preliminary results. *Atmospheric, 35(9)*, 1597-1607.
- EPA. (27 de September de 2016). *United States Environmental Protection Agency.* Recuperado el Noviembre de 2020, de <https://www.epa.gov/cram/air-quality-models>.
- Gallardo, L. (1997). *Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.* Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile.
- Gidhagen, L., Johansson, C., Ström, J., Kristensson, A., Swietlicki, E., Pirjola, L., & Hansson, H.-C. (2003). Model simulation of ultrafine particles inside a road tunnel. *Atmospheric Environment, 37*, 2023-2036.
- Himmelblau, D. M., & Bischoff, K. B. (1976). *Process Analysis and Simulation.* (Reverté, Ed.)
- Holmes, N., & Morawska, L. (2006). A Review of Dispersion Modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment, 40(30)*, 5902 - 5928.
- Hurley, P., Manins, P., Lee, S., Boyle, R., Leung, Y., & Dewundege, P. (2003). Year-long, high-resolution, urban airshed modelling: verification of TAPM predictions of smog and particles in Melbourne, Australia. *Atmospheric Environment, 37(14)*, 1899-1910.

- Jiménez, R. (2004). *Development and Application of UV-Visible and Mid-IR Differential Absorption Spectroscopy Techniques for Pollutant Trace Gas Monitoring. Tesis Doctoral*. Lausana: EPFL.
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., & Maser, O. (2010). New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 368-374.
- Khaniabadi, Y. O., Taiwo, A. M., De Marco, A., Esmaeili, S., & Rashidi, R. (2018). Modeling of particulate matter dispersion from a cement plant: Upwind-downwind case study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3104-3110.
- Khaniabadi, Y., Daryanoosh, S., Hopke, P., Ferrante, M., De Marco, A., Conti, G., . . . Mohammadi, M. (2017). Acute myocardial infarction and COPD attributed to ambient SO₂ in Iran. *Environmental research*, 156, 683-687.
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.
- Leahey, D., & Davies, M. (1984). Observations of plume rise from sour gas flares. *Atmospheric Environment (1967)*, 18(5), 917-922.
- Manahan, S. (2007). Introducción a la química ambiental.
- Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., . . . Maser, O. (2019). Understanding Household Energy Transitions: From Evaluating Single Cookstoves to "Clean Stacking" Alternatives. *Atmosphere*, 10, no 11, p. 693.
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruíz-García, V., Edwards, R., & Maser, O. (2017). Influence of laboratory test on performance of plancha-type stoves in Mexico. *Dev Eng*, 2, 20-28.
- Mugica-Alvarez, V., Hernández-Moreno, A., Valle-Hernández, B., Espejo-Montes, F., Millán-Vázquez, F., & Torres-Rodríguez, M. (2017). Characterization and modeling of atmospheric particles from sugarcane burning in Morelos, Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(5), 1056-1071.
- Oettl, D., Kukkonen, J., Almbauer, R. A., Sturm, P. J., Pohjola, M., & Härkönen, J. (2001). Evaluation of a Gaussian and a Lagrangian model against a roadside data set, with emphasis on low wind speed conditions. *Atmospheric Environment*, 35(12), 2123-2132.
- Park, S.-J., Park, S.-U., & Ho, C.-H. (2009). Flux-gradient relationship of water vapor in the surface layer obtained from CASES-99 experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D8). doi:<https://doi.org/10.1029/2008JD011157>

- Pasquill, F. (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Meteorol. Mag.*, 90, 1961.
- Romero, E., & Reyes, L. (2009). Influencia de emisiones naturales y antropogénicas en el material aerotransportado del Valle de Toluca. *Contacto nuclear*, 12-17.
- Ruiz-García, V., Edwards, R., Ghasemian, M., Berrueta, V., Princevac, M., Vázquez, J., & Masera, O. (2018). Fugitive emissions and health implications of plancha-type stoves. *Environmental science & technology*, 52(18), 10848-10855.
- Sánchez, H. (2015). *Comportamiento espacial de las partículas suspendidas PM 10 y estrategias de gestión Ambiental del Aire en la Zona Metropolitana de Toluca, México. Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma del Estado de México. Mexico.
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13, 115004.
- Solís, L., & López, J. (2003). *Principios básicos de contaminación ambiental*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Tiwary, A., & Colls, J. (2010). *Air pollution: measurement, modelling and mitigation*. Oxon, United Kingdom: Routledge; Taylor & Francis Group.
- Tsuang, B. (2003). Quantification on the source/receptor relationship of primary pollutants and secondary aerosols by a Gaussian plume trajectory model: Part I theory. *Atmospheric Environment*, 37(28), 3981-3991.
- UJAEN. (2009). *Análisis de la calidad del aire atmosférico. Tesis de Maestría*. UNIVERSIDAD DE JAÉN, ANDALUCIA, ESPAÑA.
- US EPA. (1995). SCREEN3 Model User's Guide.
- Velasteguí, A. X., Nieto, C. T., Cahueñas, N. P., & Parra, M. I. (2018). Evaluación de la Estabilidad Atmosférica Bajo Condiciones Físicas y Meteorológicas del Altiplano Ecuatoriano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(2), 336-343. doi:http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786332015
- Wade, K., Mulholland, J., Marmur, A., Russell, A., Hartsell, B., Edgerton, E., . . . Tolbert, P. (2006). Effects of Instrument Precision and Spatial Variability on the Assessment of the Temporal Variation of Ambient Air Pollution in Atlanta, Georgia. *Journal Air & Waste Management Association*, 56, 876-888.

Wallace , J., & Hobbs, P. (2006). Atmospheric Science. An Introductory Survey. *Elsevier*.

WHO. (2014). Guidelines for indoor air quality: household fuel combustion, WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion (World Health Organization).

Apéndice A: Tasas de emisión empleadas en este estudio

A continuación, se presentan los cálculos de las tasas de emisión empleadas en este estudio:

Factores de emisión: (Medina P. , y otros, 2017).

Estufa: Patsari

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Consumo de combustible: 3066 g
Tiempo de cocción: 110 minutos
Factor de emisión: $20 \frac{g(c)CO}{kg}$

Partiendo de 1 mol de sustancia de CO:

- Masas atómicas: C: 12 u, O: 16 u
- Masa molecular del CO (masa de 1 molécula):

$$\text{Masa de 1 molécula de CO} = 1 \text{ átomo de C} \left(\frac{12 \text{ u}}{1 \text{ átomo de C}} \right) + 1 \text{ átomo de O} \left(\frac{16 \text{ u}}{1 \text{ átomo de O}} \right) = 28 \text{ u}$$
- La masa molar del CO (M_{CO}) es la masa de 1 mol de moléculas de CO

$$M_{CO} = 28 \text{ g/mol}$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{1 \text{ mol de CO}}{12 \text{ g de C}} \right) \left(\frac{28 \text{ g de CO}}{1 \text{ mol de CO}} \right) = \left(\frac{28 \text{ g de CO}}{12 \text{ g de C}} \right)$$

Tasa de emisión:

$$\left(20 \frac{g(c)CO}{kg} \right) \left(\frac{28 \text{ g CO}}{12 \text{ g C}} \right) \left(\frac{3.066 \text{ kg}}{110 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 0.02167 \frac{gCO}{s}$$

Estufa: Patsari

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tiempo de cocción: 110 minutos
Emisiones totales de PM _{2.5} : 13.47gPM _{2.5}

Tasa de emisión:

$$\left(\frac{13.47gPM_{2.5}}{110\text{ min}}\right)\left(\frac{1\text{ min}}{60\text{ s}}\right) = 2.04057 \times 10^{-3} \frac{gPM_{2.5}}{s}$$

Estufa: Fogón tipo U

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Consumo de combustible: 4718 g
Tiempo de cocción: 103 minutos
Factor de emisión: $30 \frac{g(c)CO}{kg}$

Tasa de emisión:

$$\left(30 \frac{g(c)CO}{kg}\right)\left(\frac{28\text{ g CO}}{12\text{ g C}}\right)\left(\frac{4.718\text{ kg}}{103\text{ min}}\right)\left(\frac{1\text{ min}}{60\text{ s}}\right) = 0.05344 \frac{gCO}{s}$$

Estufa: Fogón tipo U

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tiempo de cocción: 103 minutos
Emisiones totales de PM _{2.5} : 26gPM _{2.5}

Tasa de emisión:

$$\left(\frac{26gPM_{2.5}}{min}\right)\left(\frac{1min}{60s}\right) = 4.207 \times 10^{-3} \frac{gPM_{2.5}}{s}$$

Factores de emisión: (Ruiz-García, y otros, 2018).

Estufa: Mera-Mera

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tasa de emisión: $78 \frac{mg PM_{2.5}}{min}$

$$\left(78 \frac{mg PM_{2.5}}{min}\right)\left(\frac{0.001g}{1mg}\right)\left(\frac{1min}{60s}\right) = 1.3 \times 10^{-3} \frac{g PM_{2.5}}{s}$$

Estufa: Ecostufa

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tasa de emisión: $79 \frac{mg PM_{2.5}}{min}$

$$\left(79 \frac{mg PM_{2.5}}{min}\right)\left(\frac{0.001g}{1mg}\right)\left(\frac{1min}{60s}\right) = 1.3166 \times 10^{-3} \frac{g PM_{2.5}}{s}$$

Estufa: ONIL

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tasa de emisión: $55 \frac{mg PM_{2.5}}{min}$

$$\left(55 \frac{mg PM_{2.5}}{min}\right)\left(\frac{0.001g}{1mg}\right)\left(\frac{1min}{60s}\right) = 9.1666 \times 10^{-4} \frac{g PM_{2.5}}{s}$$

Estufa: Promedio de cuatro estufas con chimenea (ONIL, Ecoestufa, Mera – Mera y Patsari)

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tasa de emisión: $66 \frac{mg PM_{2.5}}{min}$

$$\left(66 \frac{mg PM_{2.5}}{min}\right) \left(\frac{0.001 g}{1 mg}\right) \left(\frac{1 min}{60 s}\right) = 1.1 \times 10^{-3} \frac{g PM_{2.5}}{s}$$

Estufa Mera – Mera

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Tasa de emisión: $1264 \frac{mg CO}{min}$

$$\left(1264 \frac{mg CO}{min}\right) \left(\frac{0.001 g}{1 mg}\right) \left(\frac{1 min}{60 s}\right) = 0.02106 \frac{g CO}{s}$$

Estufa Ecoestufa

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Tasa de emisión: $936 \frac{mg CO}{min}$

$$\left(936 \frac{mg CO}{min}\right) \left(\frac{0.001 g}{1 mg}\right) \left(\frac{1 min}{60 s}\right) = 0.0156 \frac{g CO}{s}$$

Estufa ONIL

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Tasa de emisión: $606 \frac{mg CO}{min}$

$$\left(606 \frac{\text{mg CO}}{\text{min}}\right) \left(\frac{0.001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 0.0101 \frac{\text{g CO}}{\text{s}}$$

Estufa: Promedio de cuatro estufas con chimenea (ONIL, Ecoestufa, Mera – Mera y Patsari)

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Tasa de emisión: $1116 \frac{\text{mg CO}}{\text{min}}$

$$\left(1116 \frac{\text{mg CO}}{\text{min}}\right) \left(\frac{0.001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 0.0186 \frac{\text{g CO}}{\text{s}}$$

Factores de emisión: (Medina P. , y otros, 2019)

Estufa de gas LP

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: CO
Tasa de emisión: $34 \frac{\text{mg CO}}{\text{min}}$

$$\left(34 \frac{\text{mg CO}}{\text{min}}\right) \left(\frac{0.001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 0.000567 \frac{\text{g CO}}{\text{s}}$$

Ciclo de cocción: CBC
Contaminante: PM _{2.5}
Tasa de emisión: $1.2 \frac{\text{mg PM}_{2.5}}{\text{min}}$

$$\left(1.2 \frac{\text{mg PM}_{2.5}}{\text{min}}\right) \left(\frac{0.001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 0.02x^{-3} \frac{\text{g PM}_{2.5}}{\text{s}}$$

Apéndice B: Descripción detallada del modelo Screen3

B.1. Desarrollo del modelo Screen3

Fue desarrollado para proporcionar un método simple para obtener estimaciones de concentración de contaminantes basadas en el documento de procedimientos de filtración. Aprovechando la gran disponibilidad de las computadoras personales (PCs), el modelo hace los cálculos de filtración accesibles a una gran variedad de usuarios (US EPA, 1995).

B.2. Capacidades y limitaciones de Screen3

Screen3 se ejecuta interactivamente en una computadora personal, lo que significa que el programa le hace al usuario una serie de preguntas con el fin de obtener los datos de entrada necesarios y para determinar qué opciones utilizar. Puede realizar todos los cálculos de corto plazo para una sola fuente en del documento de procedimientos de filtrado, incluyendo la estimación de concentraciones del máximo nivel de piso y la distancia a éste, incorporando los efectos del flujo de caída por edificios en las concentraciones máximas para las regiones cercanas y lejanas de la estela, estimando las concentraciones en la zona de recirculación de cavidad, estimando las concentraciones debido al rompimiento de inversión y fumigación de litoral, y determinando el ascenso de la pluma para liberaciones por incinerado. El modelo puede incorporar los efectos de terreno elevado sencillo en concentraciones máximas, y puede calcular las concentraciones promedio de 24 horas ocasionadas por la impactación de la pluma en terreno complejo usando el procedimiento de filtrado de 24 horas del modelo VALLEY.

El modelo Screen3 también puede calcular la concentración máxima a cualquier número de distancias especificadas por el usuario en un terreno simple elevado o plano, incluyendo distancias de hasta 100 km para transporte de largo alcance.

El modelo puede realizar todos los cálculos a corto plazo de una sola fuente, incluida la estimación de las concentraciones máximas a nivel del suelo y la distancia al máximo. No puede determinar los impactos máximos de múltiples

fuentes excepto por un procedimiento que puede manejar múltiples fuentes cercanas, fusionando sus emisiones en una única fuente “representativa”.

B.3. Supuestos del modelo Screen3

El modelo supone que la atmósfera y la fuente de emisión se encuentran en estado estacionario. Esto significa que las condiciones físicas (temperatura, presión y características del viento) se mantienen constantes durante un periodo de tiempo dado. Los supuestos de estado estacionario también se aplican a los parámetros físicos de la fuente de emisión como la temperatura, altura y el caudal de gas de la chimenea. Es aconsejable comprobar varios escenarios que predicen el comportamiento de la dispersión del aire en condiciones extremas.

El modelo supone la “conservación de masa” del contaminante que se emite. Esto significa que se supone que la reducción de la concentración de un contaminante se debe únicamente a su dispersión, y no a ninguna otra transformación o reacción química con otras sustancias. El modelo supone que el contaminante del aire que se modela no participa en ninguna reacción química con otras sustancias presentes en la atmósfera cercana, en otras palabras, la cantidad neta original de un contaminante dado permanecerá constante durante todo el proceso. Cuando este sea el caso, la reducción de la concentración neta del contaminante será una función únicamente de la dispersión y del transporte en la atmósfera cercana, por lo cual la dispersión exhibirá un patrón de distribución gaussiano.

B.4. Opciones de modelado

El modelo Screen3 proporciona al usuario una variedad de opciones para modelar:

B.4.1. Tipos de fuente de emisión

Las fuentes se clasifican en puntuales (chimeneas, ventilaciones o cualquier punto de liberación discreto y bien definido), de área (elementos que pueden no verse como fuentes puntuales debido a sus características físicas particulares, por ejemplo una sección rectangular de una carretera) de volumen (estructuras con dimensiones físicas, como un cubo rectangular, por ejemplo, las emisiones fugitivas del proceso de una operación de recubrimiento que se ventilan a través de las puertas y ventanas de un edificio) y de incineración (bengalas).

- **Fuente de punto.** Para una fuente de punto, el usuario debe proporcionar los siguientes datos de entrada:

Tasa (o cantidad) de emisión $\left(\frac{g}{s}\right)$

Altura de la chimenea (m)

Diámetro interior de la chimenea (m)

Velocidad de salida del gas de la chimenea $\left(\frac{m}{s}\right)$ o tasa de flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

Temperatura del gas de la chimenea (K)

Temperatura ambiente (K) (por predeterminación 293 °K si se desconoce)

Altura del receptor sobre el suelo (m)

Opción urbana / rural (U = urbana, R = rural). La determinación de la aplicabilidad de la dispersión urbana o rural se basa en el uso de la tierra o densidad de población.

Fuente de área. Para modelar impactos de fuentes de área el Screen3 emplea un algoritmo de integración numérica, este supone que la fuente de área tiene forma rectangular y el modelo puede usarse para estimar concentraciones dentro del área. Para fuente de área se deben ingresar los siguientes datos de entrada:

Tasa (o cantidad) de emisión $\left(\frac{g}{sm^2}\right)$

Altura de la fuente de liberación (m)

Altura del receptor sobre el suelo (m)

Longitud del lado más largo del área rectangular (m)

Longitud del lado más corto del área rectangular (m)

Dirección del viento (°)

Velocidad del viento $\left(\frac{m}{s}\right)$

Clase de estabilidad Pasquill

Opción urbana / rural (U = urbana, R = rural)

- **Fuente de volumétrica.** El algoritmo de fuente de volumétrica se basa en un enfoque de fuente de punto virtual y se puede usar para fuentes no flotantes cuyas emisiones ocupan un volumen inicial. Los datos de entrada solicitados para fuentes volumétricas son los siguientes:

Tasa (o cantidad) de emisión ($\frac{g}{s}$)

Altura de la fuente de liberación (m)

Dimensión lateral inicial del volumen (m)

Dimensión vertical inicial del volumen (m)

Altura del receptor sobre el suelo (m)

Opción urbana / rural (U = urbana, R = rural)

Es necesario determinar las dimensiones iniciales de la fuente antes de ejercitar la fuente volumétrica de Screen3. La siguiente tabla proporciona una guía para determinar estos datos de entrada. Debido a que el algoritmo de fuente volumétrica no puede calcular concentraciones dentro de la fuente volumétrica, el modelo dará una concentración de cero para distancias de menos de $2.15\sigma_{y0}$ (medidos desde el centro de volumen).

Tabla 13. Resumen de procedimientos sugeridos para estimar las dimensiones iniciales laterales y las dimensiones verticales para fuentes volumétricas.

Descripción de la Fuente	Dimensión inicial
(a) Dimensiones Iniciales Laterales (σ_{y0})	
Fuente volumétrica sencilla	σ_{y0} = longitud del lado dividido entre 4.3
(b) Dimensiones Iniciales Verticales (dz_0)	
Fuente con base superficial ($h_e \sim 0$)	σ_{z0} = dimensión vertical de la fuente dividida entre 2.15
Fuente elevada ($h_e > 0$) sobre o adyacente a un	σ_{z0} = altura de edificio dividida entre 2.15
Fuente elevada ($h_e > 0$) no sobre no adyacente a un	σ_{z0} = dimensión vertical de fuente dividida entre 4.3

- **Liberaciones por incineración.** Para esta opción, se calcula el ascenso de la pluma en base a un parámetro de flujo por flotación inducida. Se asume una temperatura ambiente de 293 °K en este cálculo y, por lo tanto, ésta no se proporciona por el usuario. Esta opción es similar a la fuente de punto descrita anteriormente a excepción de los datos de entrada necesarios para calcular el

ascenso de la pluma. Los datos de entrada para liberación por incineración son los siguientes:

Tasa (o cantidad) de emisión ($\frac{g}{s}$)

Altura de la chimenea de incineración (m)

Tasa de liberación total de calor ($\frac{cal}{s}$)

Altura del receptor sobre el nivel de piso (m)

Opción urbana / rural (U = urbana, R = rural).

En caso de las liberaciones por incineración, el factor de flotación, F es calculado por la siguiente ecuación:

$$F = 1.66 * 10^{-5} * H \quad (18)$$

Aquí:

H = tasa de liberación total de calor (cal/s)

La fórmula anterior, es derivada de la fórmula de la fórmula de Briggs, asumiendo $T_a = 293 \text{ }^\circ\text{K}$, $C_p = 0.24 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{K}}$, $v_s = 20 \text{ m/s}$, $T_f = 1273 \text{ }^\circ\text{K}$ y la tasa de calor sensible como $Q_H = 0.45 * H$. se supone que 55% del calor total se pierde debido a la radiación (Leahey & Davies, 1984). El diámetro de la chimenea se asume, como un diámetro eficaz por la siguiente ecuación:

$$D = 9.88 * 10^{-4} (Q_H)^{0.5} \quad (19)$$

El ascenso de la pluma se calcula desde la cresta de la flama, suponiendo que la flama está inclinada 45° con respecto al eje vertical.

B.4.2. Tipos de terreno

El modelo Screen3 permite al usuario identificar si los receptores están ubicados en terreno plano, terreno elevado siempre, a la altura de una asta bandera o en terreno complejo.

- El terreno plano es una característica topográfica ubicada dentro del mismo nivel que la base de la fuente emisora.
- El terreno elevado simple es el área de elevación entre la base de la fuente y su altura total. Aquí las alturas del terreno exceden la base de la chimenea,

pero se mantienen por debajo de la altura de ésta, o un terreno simple plano, donde se supone que las alturas del terreno no exceden a la elevación de la base de la chimenea. Si el usuario decide no usar la opción de filtrado en terreno simple con el terreno por encima de la base de la chimenea, entonces se supone que el terreno es plano y se le asigna un valor de altura de cero. Si se usa la opción de terreno elevado.

- Las alturas de las astas banderas son características como balcones, techos u otras áreas de construcción que pueden estar ocupados por un receptor. Estos tipos de estructuras generalmente no obstruyen la dispersión de la pluma contaminante, como lo haría un terreno elevado neutral.
- El terreno complejo es una característica topográfica ubicada por encima de la fuente emisora, la cual puede obstruir a la pluma, por ejemplo, una instalación ubicada en un valle, colina o montaña. Si la fuente de emisión está ubicada en el área del valle, la pluma tiende a colisionarse con la colina cercana, reduciendo la dispersión adecuada del contaminante que se emite. En tal caso la dispersión de contaminantes causada por una dispersión inadecuada puede causar efectos perjudiciales sobre los posibles receptores (flora, fauna o comunidades circundantes).

B.4.3. Opciones meteorológicas

Screen3 examina un amplio intervalo de condiciones meteorológicas, incluyendo todas las clases de estabilidad y velocidades del viento para encontrar impactos máximos (concentración máxima). El modelo hace uso de un conjunto completo de condiciones meteorológicas debido a que las concentraciones máximas también se dan como una función de la distancia, y porque la estabilidad A, C y E o F podría no controlar en fuentes con flujo de caída por edificio y calcula explícitamente los efectos de múltiples reflexiones de la pluma fuera de la inversión elevada y fuera del piso cuando se calculan concentraciones bajo condiciones de mezclado limitadas. Así mismo, trata el caso de velocidad del viento cercana a neutral/alta examinando un intervalo de velocidades del viento para clase de estabilidad y seleccionando el máximo.

Las combinaciones de velocidad del viento y clases de estabilidad que usa Screen3 se dan en la Tabla 14. Las velocidades del viento a 10 m, se ajustan a la altura de la chimenea usando los exponentes para la ley de potencia para el perfil del viento. Para alturas de liberación menores a los 10 m, las velocidades del viento se usan sin ajustar. Para distancias mayores a los 50 km, Screen3

toma 2 m/s como límite inferior para la velocidad del viento a 10 m para evitar tiempos de transporte irreales.

Tabla 14. Combinaciones de velocidad del viento y clase de estabilidad usadas en el modelo Screen3.

Clase de Estabilidad	Velocidad del viento a 10 m (m/s)													
	1	2	2	3	3	4	4	5	5	8	10	15	20	
A	*	*	*	*	*									
B	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
C	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
D	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
F	*	*	*	*	*	*	*							

Los resultados del modelo SCREEN también incluyen los efectos de la dispersión por flotación inducida (BID, por sus siglas en inglés), la inclusión de BID en SCREEN podría incrementar o decrementar las concentraciones calculadas, dependiendo de la fuente y la distancia.

El modelo screen3 ofrece tres opciones meteorológicas y permite al usuario seleccionar el tipo de entradas meteorológicas requeridas para el modelo. El modelo permite al usuario elegir el estado meteorológico completo que incluyen todas las clases de estabilidad y velocidades del viento, alternativamente, el usuario puede optar por una única clase de estabilidad con todas las velocidades del viento o elegir una clase de estabilidad específica con una velocidad de viento específica.

Distancia corriente abajo: screen3 permite al modelador ingresar la distancia aguas debajo de la fuente a la que se requiere una concentración de contaminante deseada. Esta opción es importante cuando el modelador necesita información confiable sobre la concentración máxima de un contaminante en el área cercana a un receptor en particular.

B.4. Concentraciones máximas para promedios de corto y largo plazo

Dado que los datos de salida de Screen3 están referidos a periodos promedios de 1 hora, en aquellas situaciones para las cuales la normativa indica los límites máximos admisibles de corto plazo para periodos diferentes, se pueden obtener los valores de concentración máxima promedio de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_{max}(D_t) = C_{max}(60) \left(\frac{D_t}{60} \right)^{-0.20} \quad (20)$$

Donde: D_t es el periodo promedio regulado (minutos)

Para periodos mayores que 1 hora se recomienda usar los factores de conversión dados en la Tabla 15:

Tabla 15. Factores de conversión recomendados para periodos de largo plazo.

Periodo promedio	Factor multiplicativo
1 h	1
3 h	0.9 ± 0.1
8 h	0.7 ± 0.2
24 h	0.4 ± 0.2
Anual	0.08 ± 0.02

Apéndice C: Vocabulario básico para el uso de Screen3

Tiempo promedio: Periodo durante el cual se promedia la concentración del contaminante. Para convertir de un periodo promedio de una hora a otros periodos de tiempo se pueden usar los siguientes factores:

- 3 horas: multiplicar por 0.9
- 8 horas: multiplicar por 0.7
- 24 horas: multiplicar por 0.4
- Anual: multiplicar por 0.08

Las estimaciones de concentración por hora predeterminado incorporado en el Screen3 se basa en un promedio de 1 hora.

Tasa de flujo de la fuente de emisión: Velocidad a la que el contaminante propuesto se emitirá a la atmósfera, suele darse en g/s, lb/h, etc.

Concentración máxima permitida a nivel del suelo (MAGLL): Se refiere a la concentración máxima permitida de contaminante a la que una población cercana a una fuente industrial puede estar expuesta sin efectos observables para la salud. El MAGLL se puede estimar mediante el siguiente procedimiento:

- Determinar si existe un TLV para el compuesto que se modela.
- Divida el TLV entre 10 para ajustar el estándar de la población activa al público en general (TLV/10).
- Ajuste el estándar para tener en cuenta la duración de la exposición (es decir, las horas de funcionamiento de la fuente). La norma asume un horario de funcionamiento de 8 h/día, 5 días a la semana. Entonces, si su fuente tiene horas más largas o más cortas deberá ajustar los valores por h/día (X) y días a la semana (Y). La expresión se da de la siguiente manera:

$$MAGLL = 4 \left(\frac{TLV}{XY} \right)$$

Si el tiempo de funcionamiento total de la fuente es de 8760 h/año (lo que significa que X=24h/día y Y=7 días a la semana) entonces:

$$MAGLL = \frac{TLV}{42}$$

Si el tiempo de funcionamiento total de una fuente es inferior a 8760 h/año (lo que significa que $X < 24$ h/día y $Y < 7$ días a la semana) la expresión se puede reescribir como:

$$MAGLL = 4 \left(\frac{TLV}{XY} \right)$$

Donde:

X y Y = tiempos de funcionamiento reales

Receptor: Significa un lugar particular en el que se mide o estima la concentración del contaminante.

Diámetro de la fuente: Diámetro interior de la chimenea en el punto de liberación.

Temperatura del gas: Temperatura de los gases a medida que son liberados desde la chimenea.

Altura de la chimenea: Se refiere a la altura del punto de liberación sobre la base de la fuente, medida desde el suelo.

Emisión real: Emisiones que se basan en horas de funcionamiento reales.

Potencial de emisión: Emisiones atmosféricas que podrían liberarse por un programa de funcionamiento teórico máximo que puede llegar a las 8760 h/año.

Apéndice D: Velocidad del viento y las clases de estabilidad durante periodo 2003 – 2018.

Tabla 16. Velocidad del viento y las clases de estabilidad durante 2003 – 2018.

Período de datos		Porcentaje de vientos tranquilos	Velocidad media de viento (m/s)	Clase de Estabilidad
Fecha de inicio	Fecha de finalización			
01/01/2003 - 00:00	31/03/2003 - 23:00	3.01	2.15	B
01/04/2003 - 00:00	30/06/2003 - 23:00	6.09	2.2	B
01/07/2003 - 00:00	30/09/2003 - 23:00	12.41	1.66	A-B
01/10/2003 - 00:00	31/12/2003 - 23:00	9.24	1.65	A-B
01/01/2004 - 00:00	31/03/2004 - 23:00	5.4	2.14	B
01/04/2004 - 00:00	30/06/2004 - 23:00	7.46	1.89	A-B
01/07/2004 - 00:00	30/09/2004 - 23:00	14.95	1.41	A-B
01/10/2004 - 00:00	31/12/2004 - 23:00	6.3	1.56	A-B
01/01/2005 - 00:00	31/03/2005 - 23:00	3.56	1.96	A-B
01/04/2005 - 00:00	30/06/2005 - 23:00	1.6	1.91	A-B
01/07/2005 - 00:00	30/09/2005 - 23:00	2.63	2.02	B
01/10/2005 - 00:00	31/12/2005 - 23:00	9.33	1.59	A-B
01/01/2006 - 00:00	31/03/2006 - 23:00	2.36	1.57	A-B
01/04/2006 - 00:00	30/06/2006 - 23:00	3.21	1.7	A-B
01/07/2006 - 00:00	30/09/2006 - 23:00	10.91	1.27	A-B
01/10/2006 - 00:00	31/12/2006 - 23:00	5.3	1.32	A-B
01/01/2007 - 00:00	31/03/2007 - 23:00	1.94	1.55	A-B
01/04/2007 - 00:00	30/06/2007 - 23:00	4.81	1.69	A-B
01/07/2007 - 00:00	30/09/2007 - 23:00	7.97	1.62	A-B
01/10/2007 - 00:00	31/12/2007 - 23:00	1.77	1.68	A-B
01/01/2008 - 00:00	31/03/2008 - 23:00	14.01	1.27	A-B
01/04/2008 - 00:00	30/06/2008 - 23:00	11.86	1.45	A-B
01/07/2008 - 00:00	30/09/2008 - 23:00	24.05	1.08	A-B
01/10/2008 - 00:00	31/12/2008 - 23:00	24.59	1.02	A-B
01/01/2009 - 00:00	31/03/2009 - 23:00	14.12	1.23	A-B
01/04/2009 - 00:00	30/06/2009 - 22:00	11.18	1.47	A-B
01/07/2009 - 00:00	30/09/2009 - 23:00	17.53	1.18	A-B
01/10/2009 - 00:00	31/12/2009 - 23:00	17.84	1.15	A-B
01/01/2010 - 00:00	31/03/2010 - 23:00	9.07	1.78	A-B
01/04/2010 - 00:00	30/06/2010 - 23:00	8.47	1.54	A-B
01/07/2010 - 00:00	30/09/2010 - 23:00	24.05	1.11	A-B
01/10/2010 - 00:00	31/12/2010 - 23:00	13.68	1.19	A-B
01/01/2011 - 00:00	31/03/2011 - 23:00	8.43	1.26	A-B
01/04/2011 - 00:00	30/06/2011 - 23:00	2.11	4.02	C-D
01/07/2011 - 00:00	30/09/2011 - 23:00	2.76	1.49	A-B
01/10/2011 - 00:00	31/12/2011 - 23:00	3.49	1.33	A-B
01/01/2012 - 00:00	31/03/2012 - 23:00	2.29	1.45	A-B
01/04/2012 - 00:00	30/06/2012 - 23:00	2.06	1.65	A-B
01/07/2012 - 00:00	30/09/2012 - 23:00	3.08	1.46	A-B
01/10/2012 - 00:00	31/12/2012 - 23:00	1.63	1.61	A-B
01/01/2013 - 00:00	31/03/2013 - 23:00	7.27	1.28	A-B
01/04/2013 - 00:00	30/06/2013 - 23:00	31.82	0.64	A-B
01/07/2013 - 00:00	30/09/2013 - 23:00	37.77	0.57	A-B
01/10/2013 - 00:00	31/12/2013 - 23:00	20.43	0.71	A-B
01/01/2014 - 00:00	31/03/2014 - 23:00	13.52	0.8	A-B
01/04/2014 - 00:00	30/06/2014 - 23:00	27.47	0.72	A-B
01/07/2014 - 00:00	30/09/2014 - 23:00	42.44	0.49	A-B
01/10/2014 - 00:00	31/12/2014 - 23:00	44.93	0.46	A-B
01/01/2015 - 00:00	31/03/2015 - 23:00	34.26	0.59	A-B
01/04/2015 - 00:00	30/06/2015 - 23:00	14.56	0.93	A-B
01/07/2015 - 00:00	30/09/2015 - 23:00	8.33	1.07	A-B
01/10/2015 - 00:00	31/12/2015 - 23:00	19.38	0.88	A-B
01/01/2016 - 00:00	31/03/2016 - 23:00	13.42	0.98	A-B
01/04/2016 - 00:00	30/06/2016 - 23:00	18.73	0.97	A-B
01/07/2016 - 00:00	30/09/2016 - 23:00	15.17	1.03	A-B
01/10/2016 - 00:00	31/12/2016 - 23:00	19.02	1.02	A-B
01/01/2017 - 00:00	31/03/2017 - 23:00	14.91	1.07	A-B
01/04/2017 - 00:00	30/06/2017 - 23:00	14.65	1.1	A-B
01/07/2017 - 00:00	30/09/2017 - 23:00	27.45	0.75	A-B
01/10/2017 - 00:00	31/12/2017 - 23:00	38.09	0.63	A-B
01/01/2018 - 00:00	31/03/2018 - 23:00	23.19	5.34	C-D
01/04/2018 - 00:00	30/06/2018 - 23:00	19.14	0.92	A-B
01/07/2018 - 00:00	30/09/2018 - 23:00	18.21	0.89	A-B
01/10/2018 - 00:00	31/12/2018 - 23:00	26.22	0.75	A-B

Apéndice E: Gráficos de control de los datos de velocidad del estudio de vientos

Para determinar si la velocidad del viento fue constante durante cada trimestre del año los datos fueron ingresados al software Minitab y se realizaron gráficos de control. Los puntos graficados en una gráfica Xbar representan los promedios de las mediciones de cada subgrupo (para este estudio los subgrupos constaban de 1000 datos), mientras que los puntos graficados en una gráfica S son las desviaciones estándar de los subgrupos.

Si las mediciones registradas son constantes, los puntos varían de manera aleatoria alrededor de la línea central y la velocidad solo exhibe variaciones por causas comunes. La línea central de la gráfica Xbar representa el promedio de los puntos graficados (también conocida como el promedio de la velocidad en ese trimestre). La línea central en la gráfica S es el promedio de todas las desviaciones estándar de los subgrupos.

En los gráficos se observan los Límites de Control las cuales son las líneas horizontales que se encuentran por encima y por debajo de la línea central, estos se basan en la variación observada dentro de los subgrupos y en la variación esperada en los puntos graficados en función de los datos de nuestra muestra.

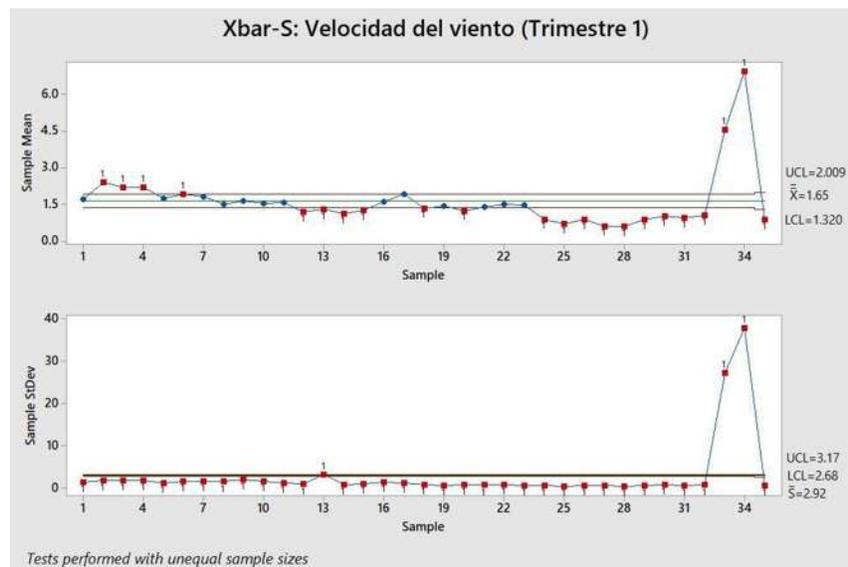


Ilustración 53. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 1.

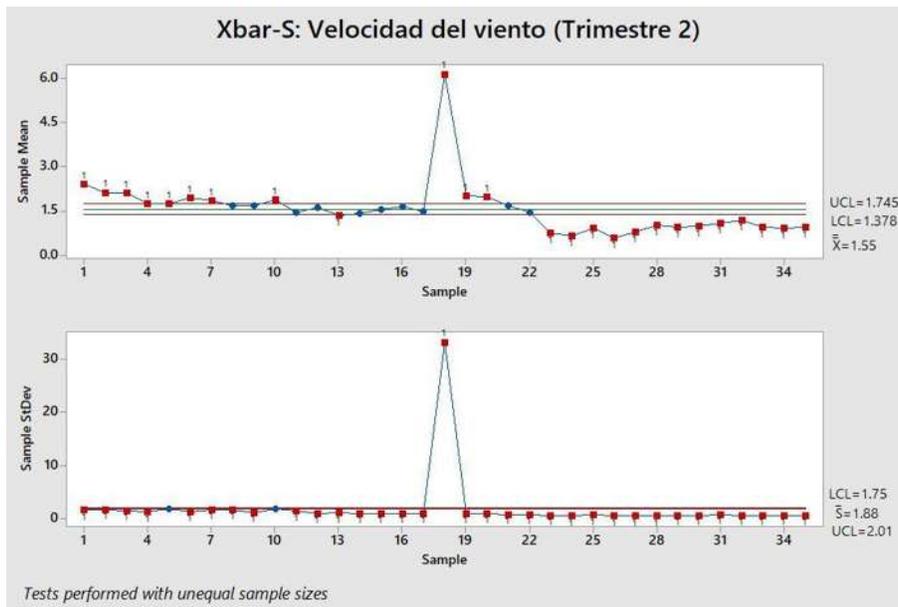


Ilustración 54. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 2.

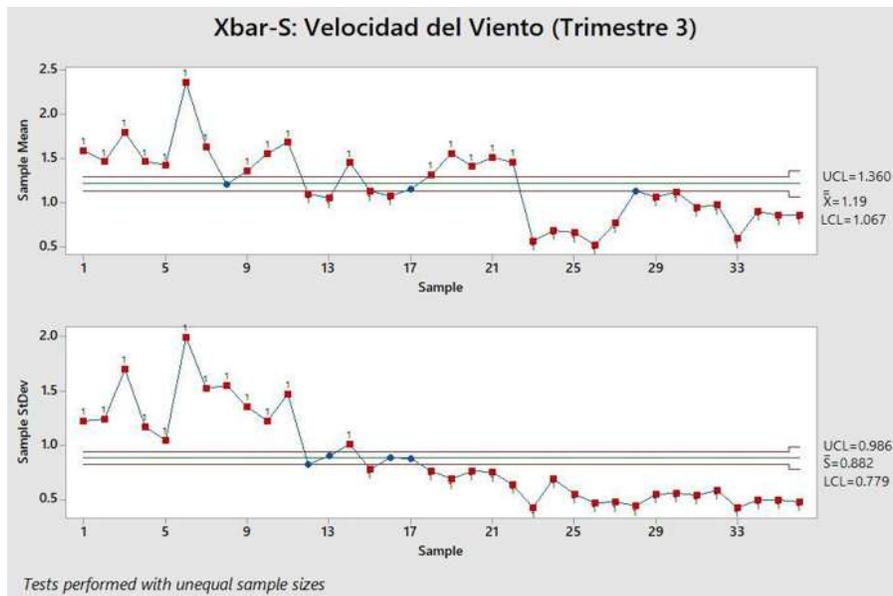


Ilustración 55. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 3.

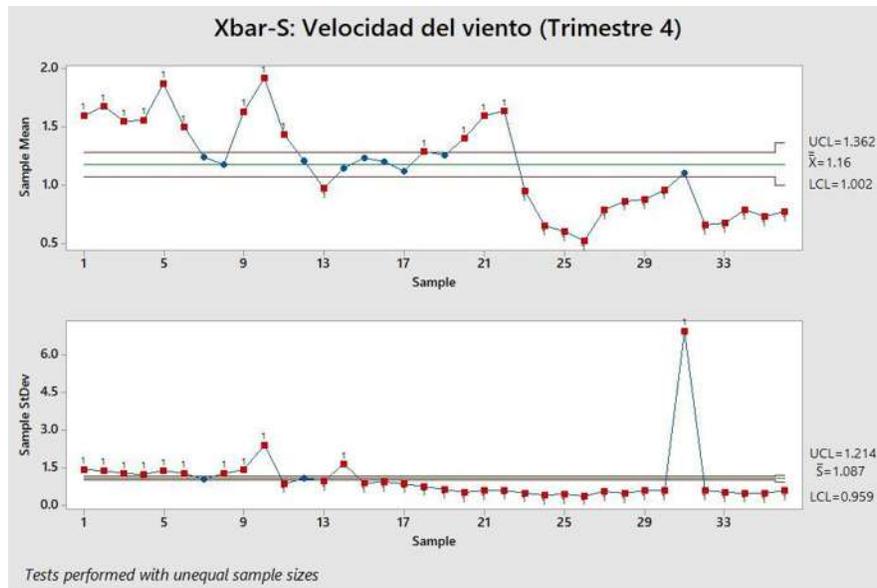


Ilustración 56. Xbar-S Velocidad del viento Trimestre 4.

De acuerdo a los gráficos de control y a los datos reportados por la Estación Meteorológica de Morelia se observa que la velocidad del viento está siempre fluctuando, de qué magnitud sea exactamente esa fluctuación depende tanto de las condiciones climatológicas, así como de las condiciones de superficie locales y de los obstáculos. En la mayoría de las localizaciones del planeta el viento tiende a soplar más fuerte en el día que durante la noche, esta variación se debe sobre todo a que las diferencias de temperatura son mayores durante el día que durante la noche. De igual manera el viento tiende a presentar mayor turbulencia y tiende a cambiar su velocidad más rápidamente durante el día que durante la noche. Durante los trimestres 1 y 2 (Ilustraciones 53 y 54 respectivamente) la velocidad del viento varía en menor proporción a comparación de los trimestres 3 y 4 (Ilustraciones 55 y 56 respectivamente). La velocidad promedio durante el trimestre 1 fue de 1.65 m/s y considerando como límites de control velocidades máximas de 2 m/s y velocidades mínimas de 1.32 m/s, se observa que en la muestra hubo mediciones de velocidad por encima de los 6 m/s (ver rosas de vientos). La velocidad promedio durante el trimestre 2 fue de 1.55 m/s y considerando como límites de control velocidades máximas de 1.75 m/s y velocidades mínimas de 1.38 m/s, se observa mayor fluctuación en el subgrupo 18 (ver la figura D.2). La velocidad promedio durante el trimestre 3 fue de 1.19 m/s y considerando como límites de control velocidades máximas de 1.36 m/s y velocidades mínimas de 1.07 m/s, por último, durante el 4

trimestre del año la velocidad promedio fue de 1.16 m/s y considerando como límites de control velocidades máximas de 1.36 m/s y velocidades mínimas de 1 m/s.

Apéndice F: Gráficos de concentración de PM_{2.5} y CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma

En este apéndice se muestran los gráficos de concentración de material particulado de 2.5 μm de diámetro a la distancia horizontal del eje central de la pluma para la Estufa Patsari, el promedio de 4 estufas tipo plancha, el fogón U, el fogón tres piedras y la estufa de gas LP durante el primer trimestre del año.

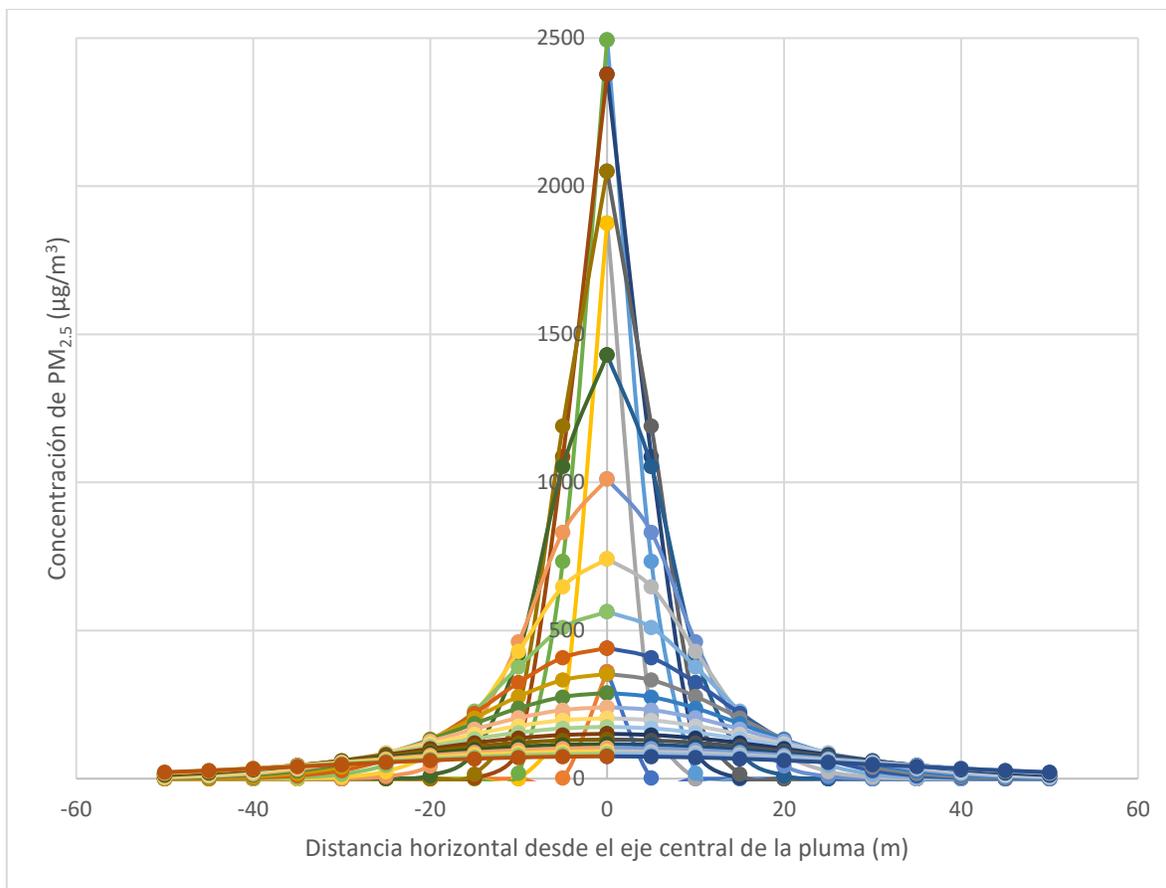


Ilustración 57. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufa Patsari - Trimestre 1).

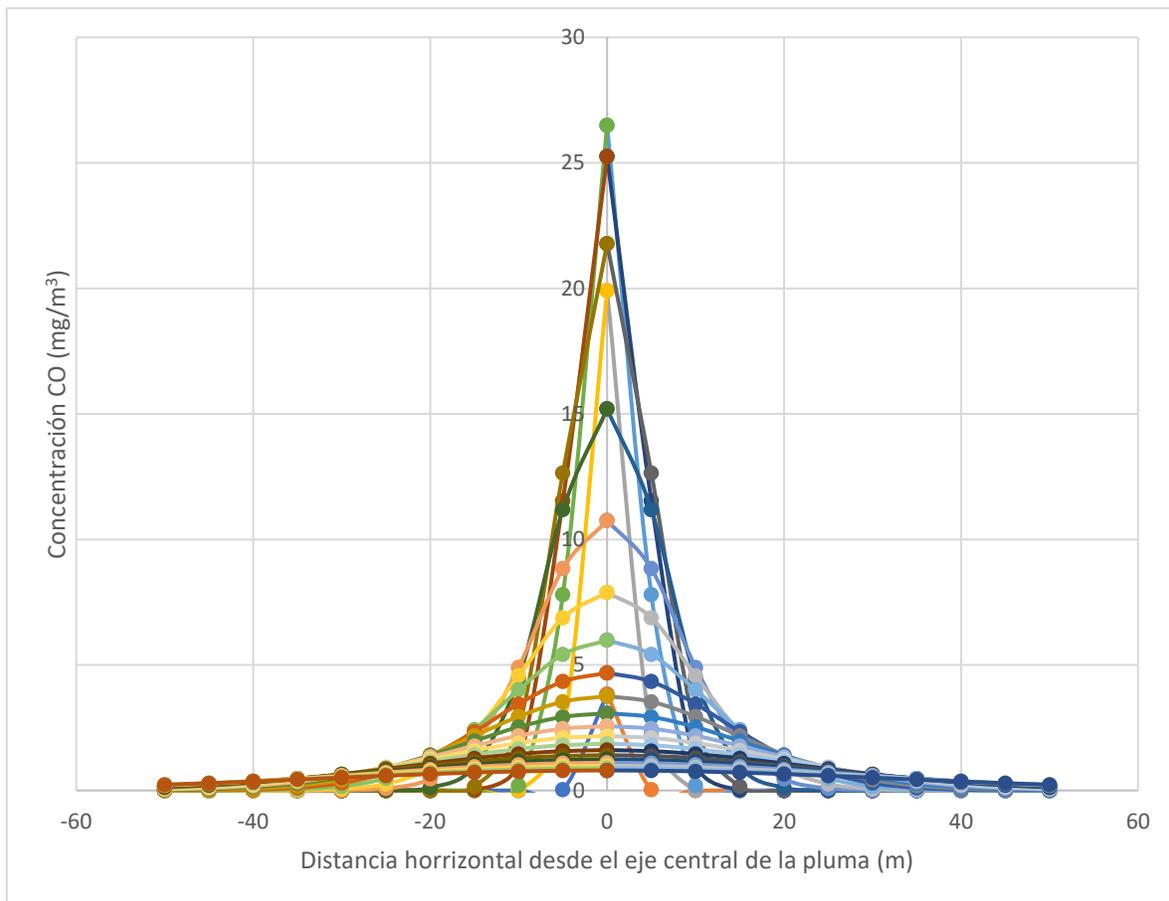


Ilustración 58. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufa Patsari - Trimestre 1).

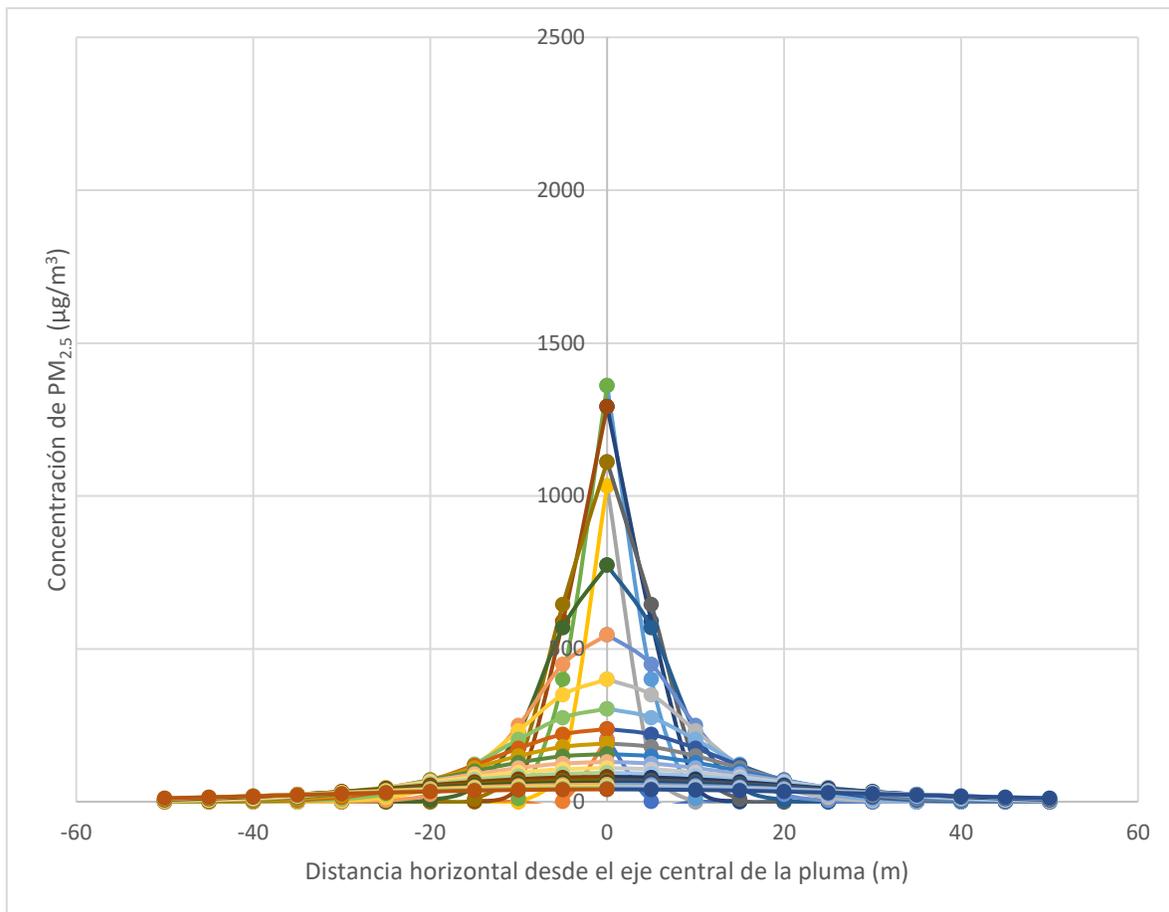


Ilustración 59. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Promedio 4 Estufas eficientes de leña: Patsari, Ecostufa, Mera-Mera y Onil- Trimestre 1).

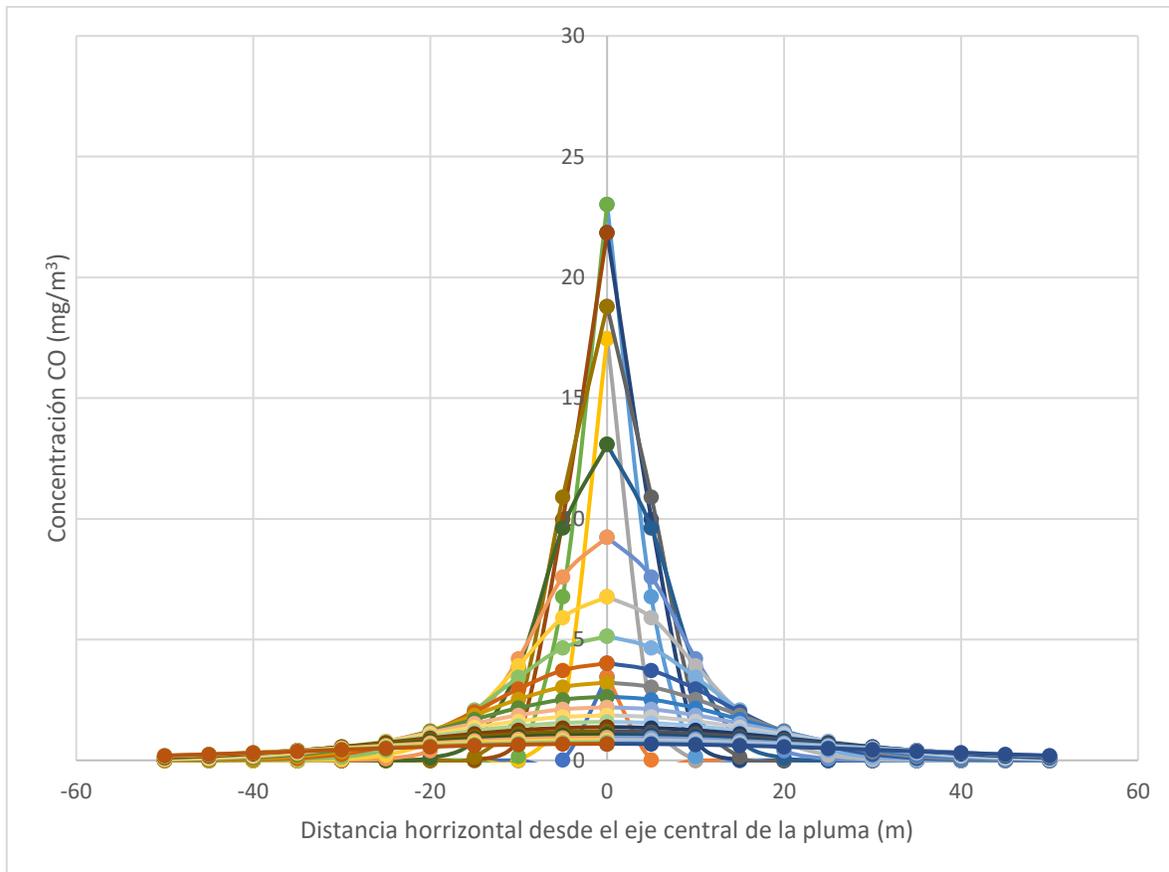


Ilustración 60. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Promedio 4 Estufas eficientes de leña: Patsari, Ecostufa, Mera-Mera y Onil- Trimestre 1).

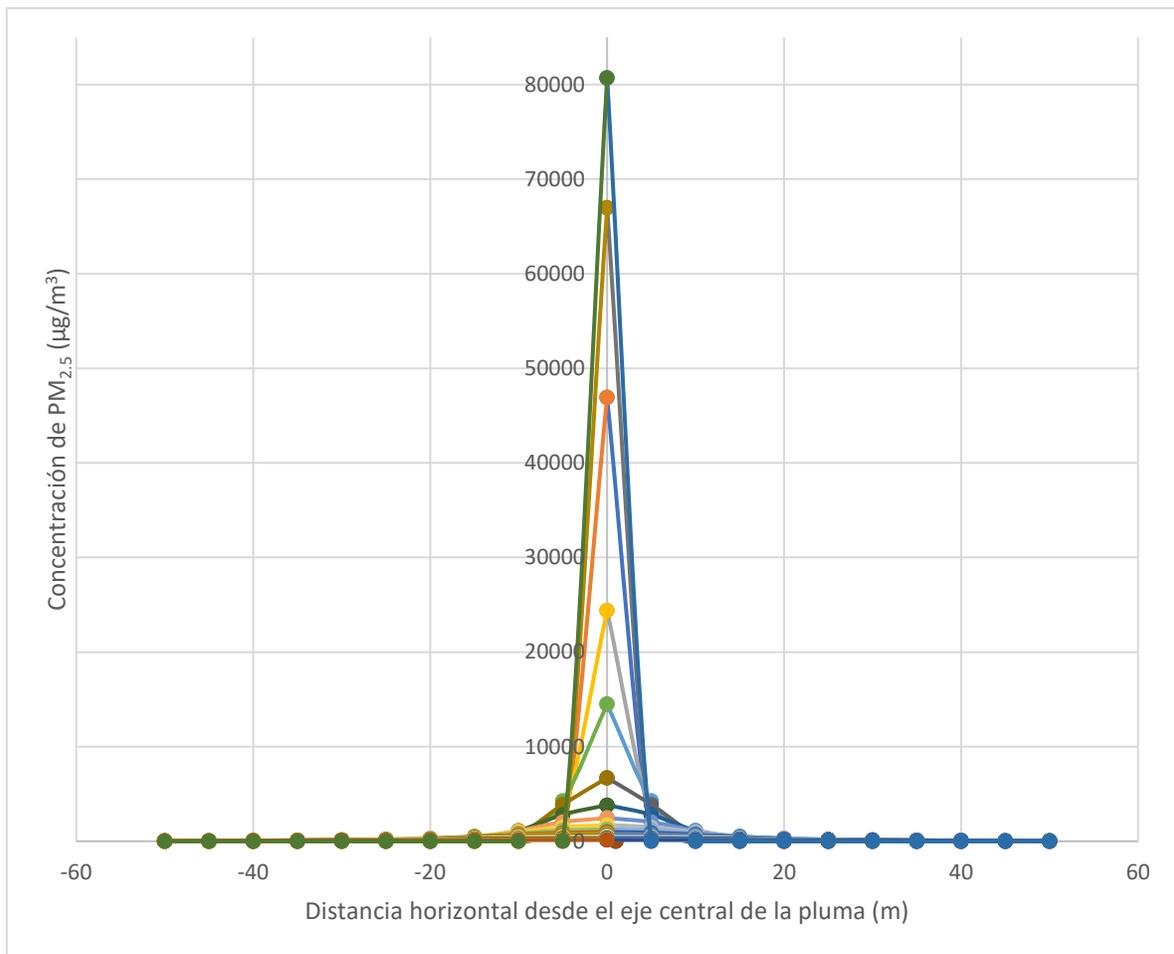


Ilustración 61. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón tipo U- Trimestre 1).

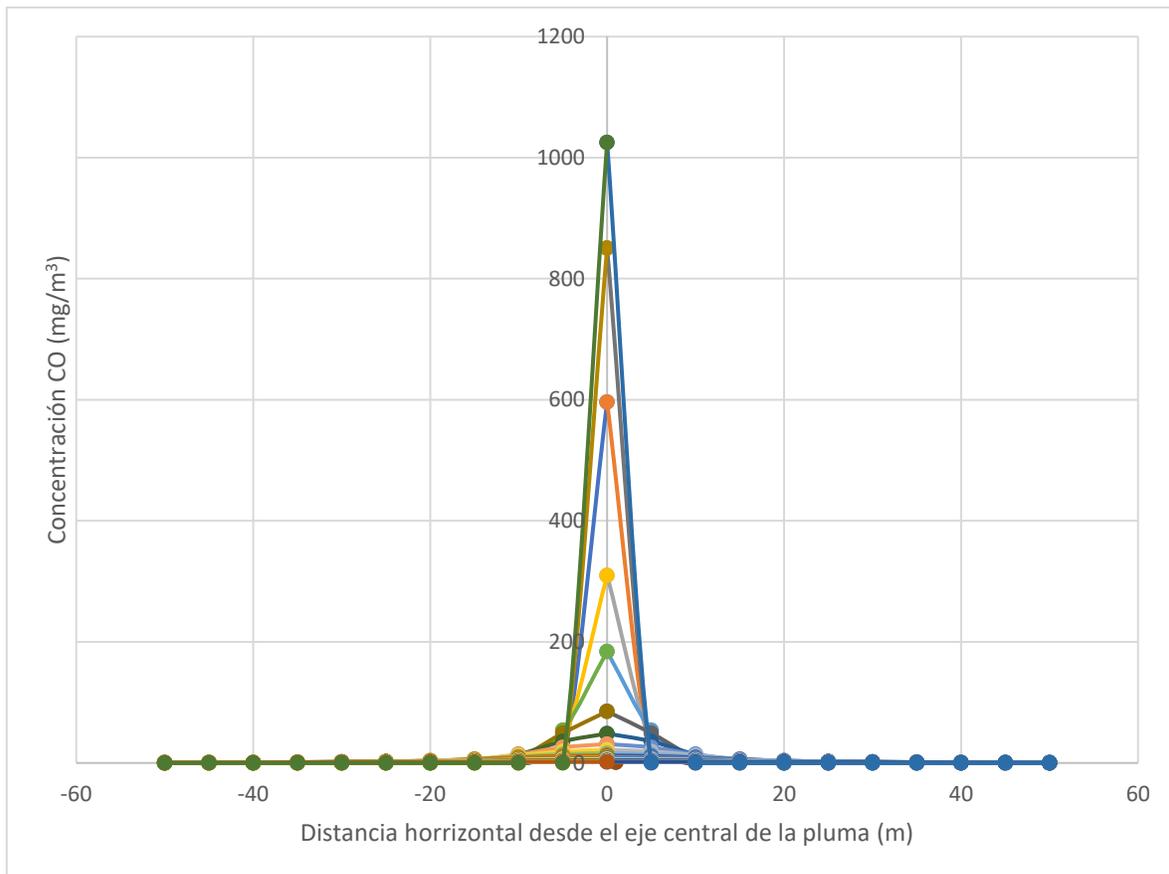


Ilustración 62. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón tipo U- Trimestre 1).

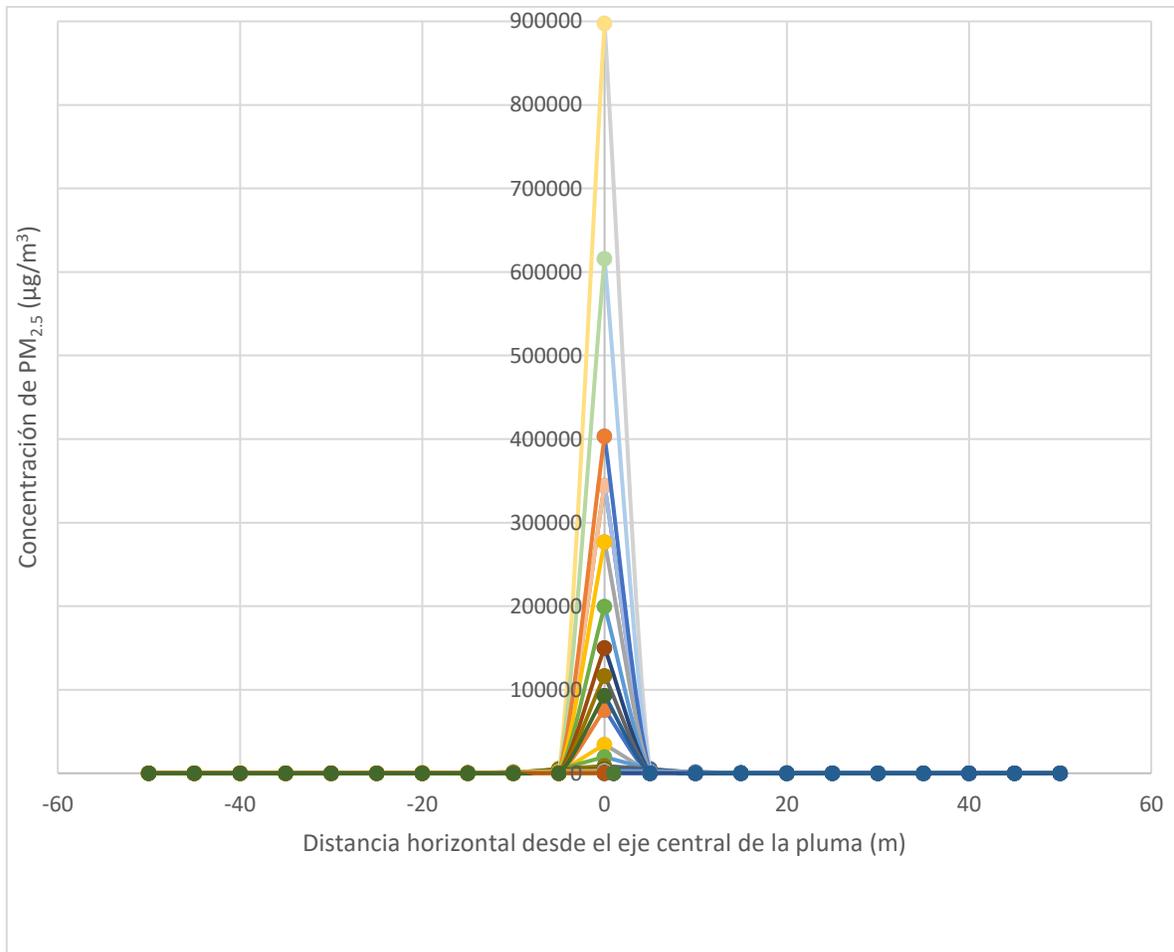


Ilustración 63. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón 3 piedras - Trimestre 1).

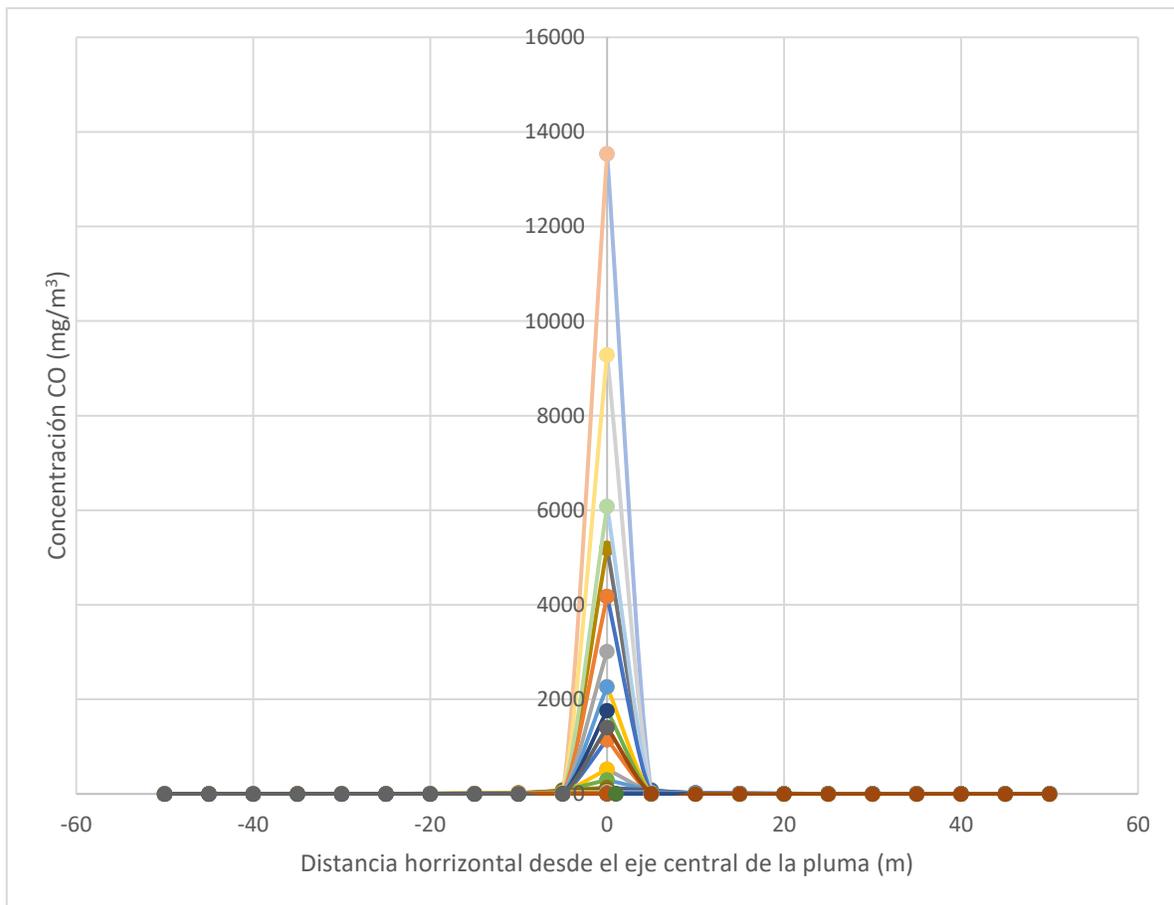


Ilustración 64. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Fogón 3 piedras - Trimestre 1).

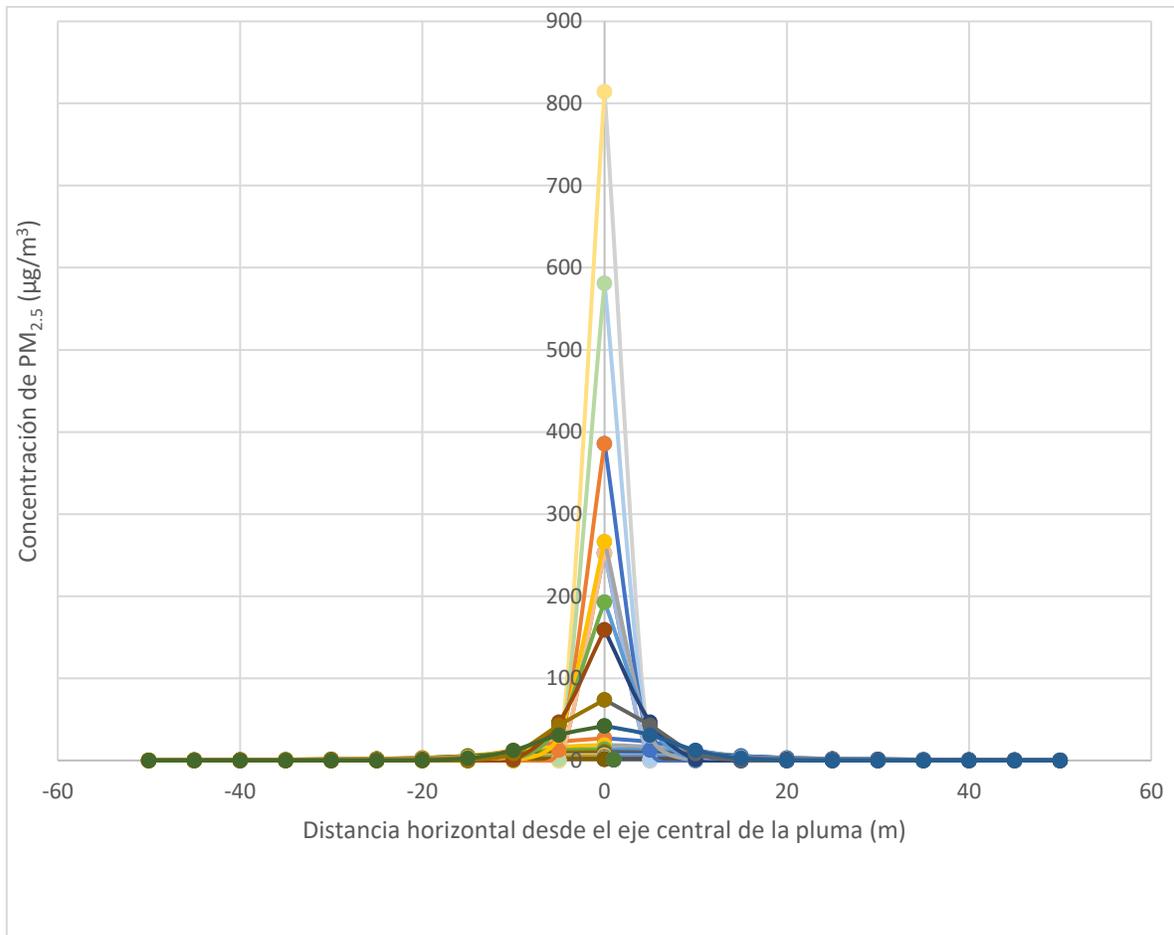


Ilustración 65. Concentración de PM_{2.5} a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufas de gas LP - Trimestre 1).

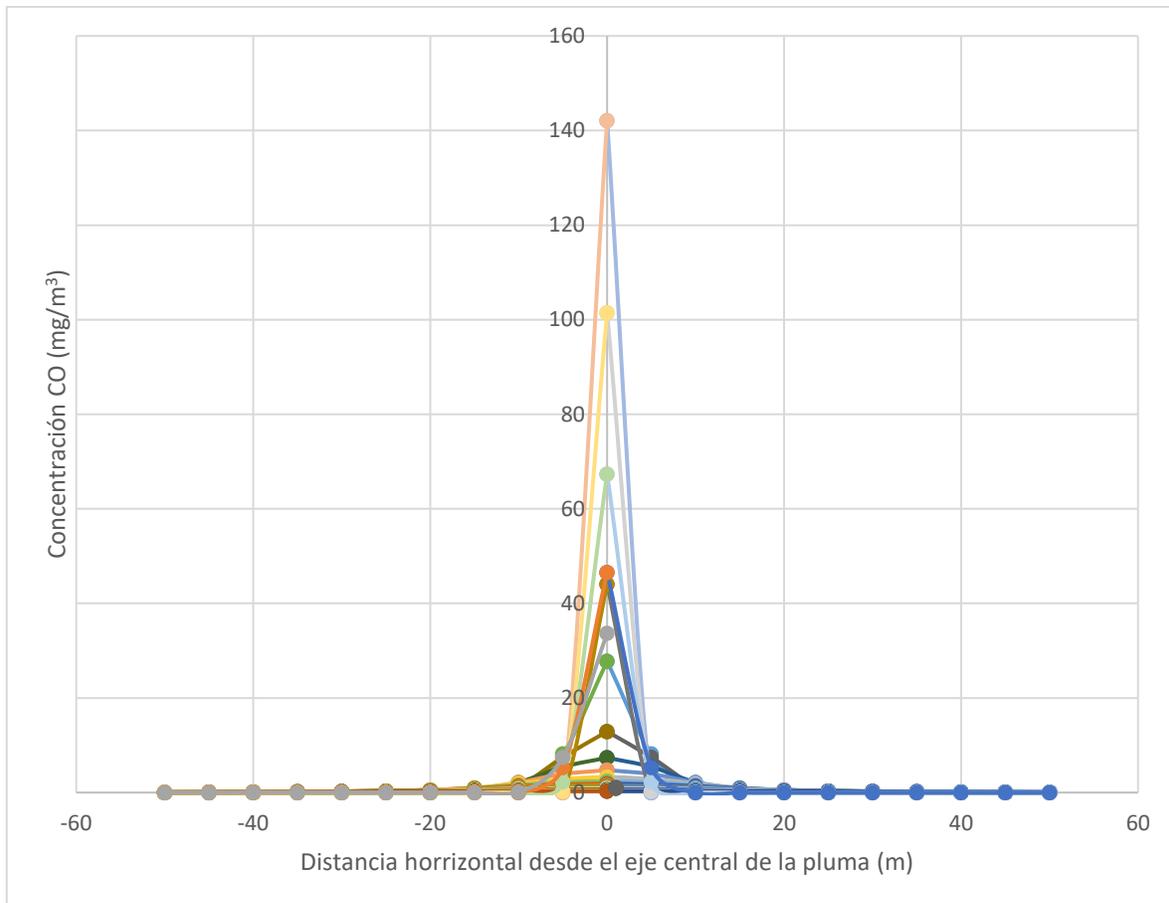


Ilustración 66. Concentración de CO a la distancia horizontal del eje central de la pluma (Estufas de gas LP - Trimestre 1).

Apéndice G: Gráficos de concentración de CO

En este apéndice se presentan los gráficos de concentración de CO. Las Ilustraciones 67, 69 y 71 muestran la concentración de CO producidas por el Fogón U y el Fogón 3 piedras durante el cuarto trimestre del año empleando una clase de estabilidad atmosférica B y una velocidad del viento de 1.16 m/s, mientras que las ilustraciones 68, 70 y 72 muestran la concentración de CO producidas por las estufas tipo plancha: Onil, Patsari, Mera-Mera, Ecostufa el promedio de las cuatro y la concentración de CO de la estufa de gas LP durante el cuarto trimestre del año empleando una clase de estabilidad atmosférica B y una velocidad del viento de 1.16 m/s. La Tabla 17 muestra la distancia en metros al foco emisor en la cual se alcanza la concentración máxima de Monóxido de Carbono.

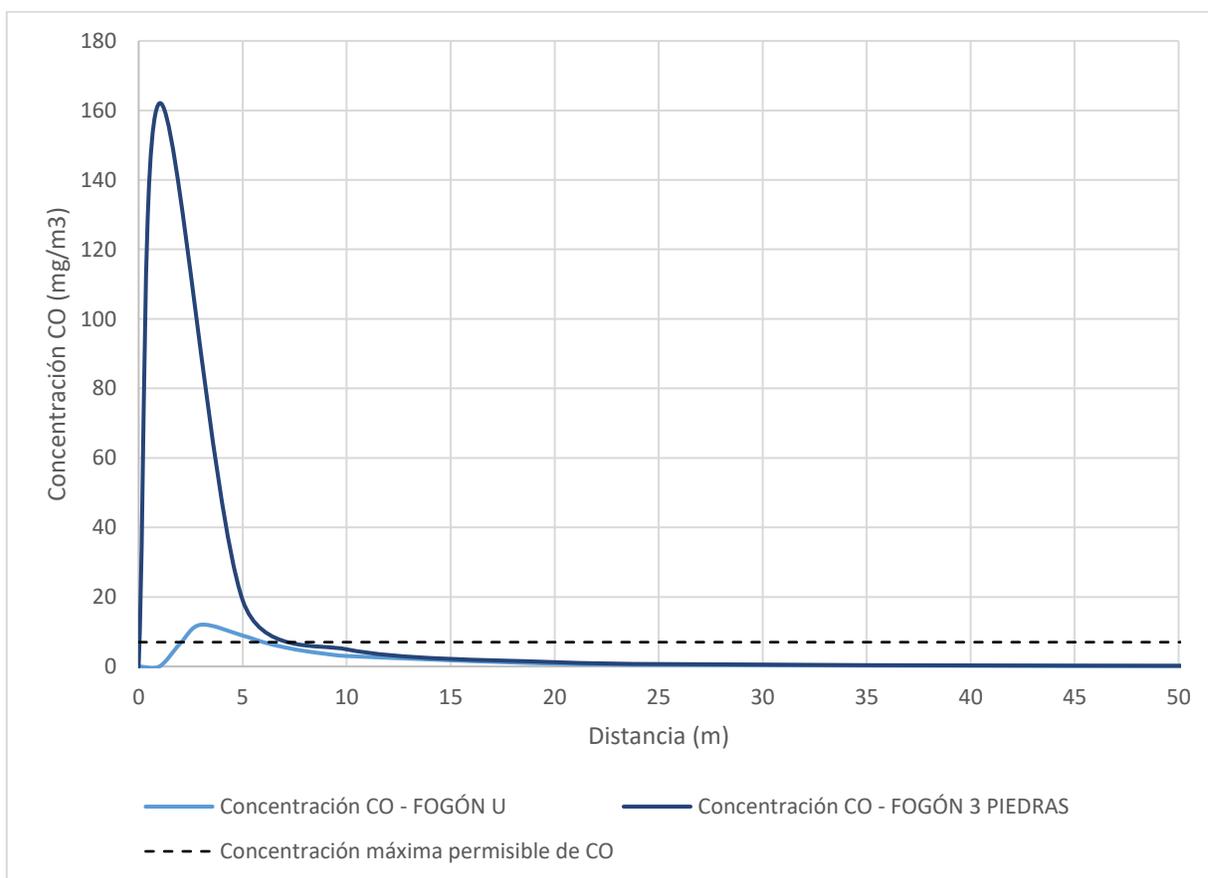


Ilustración 67. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica A Estufas: Fogón U y Fogón 3 Piedras.

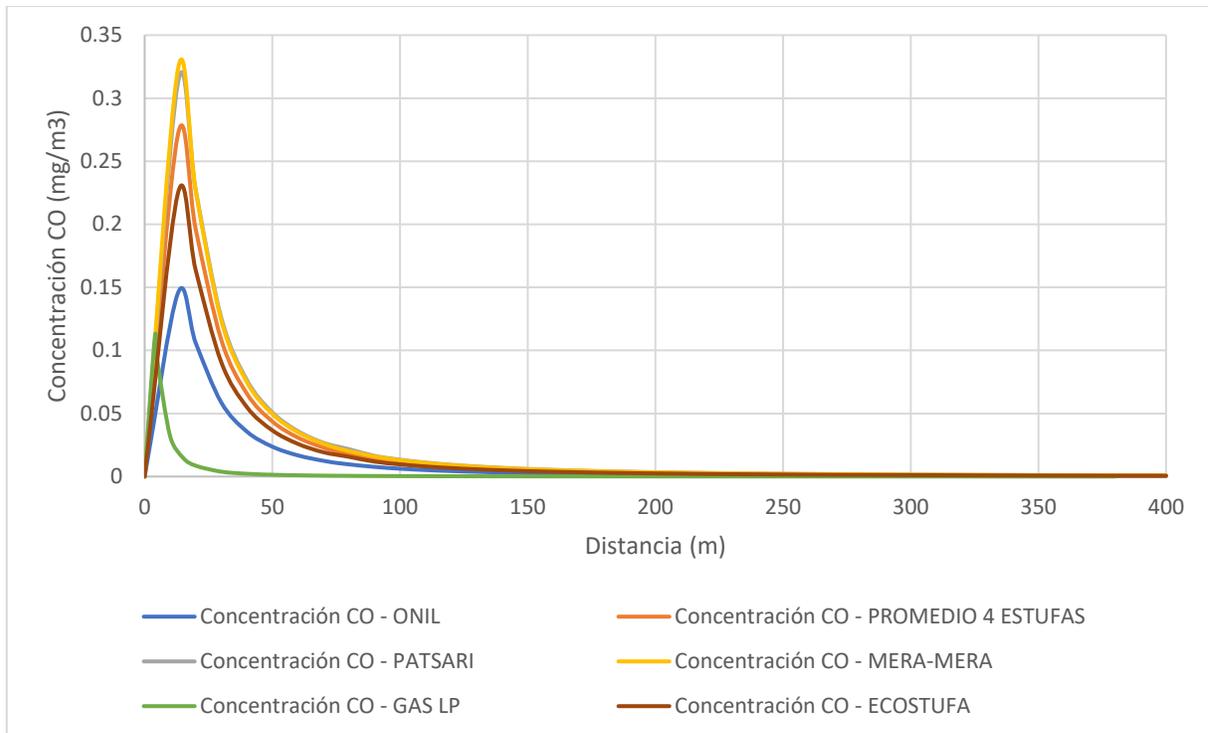


Ilustración 68. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica A Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.

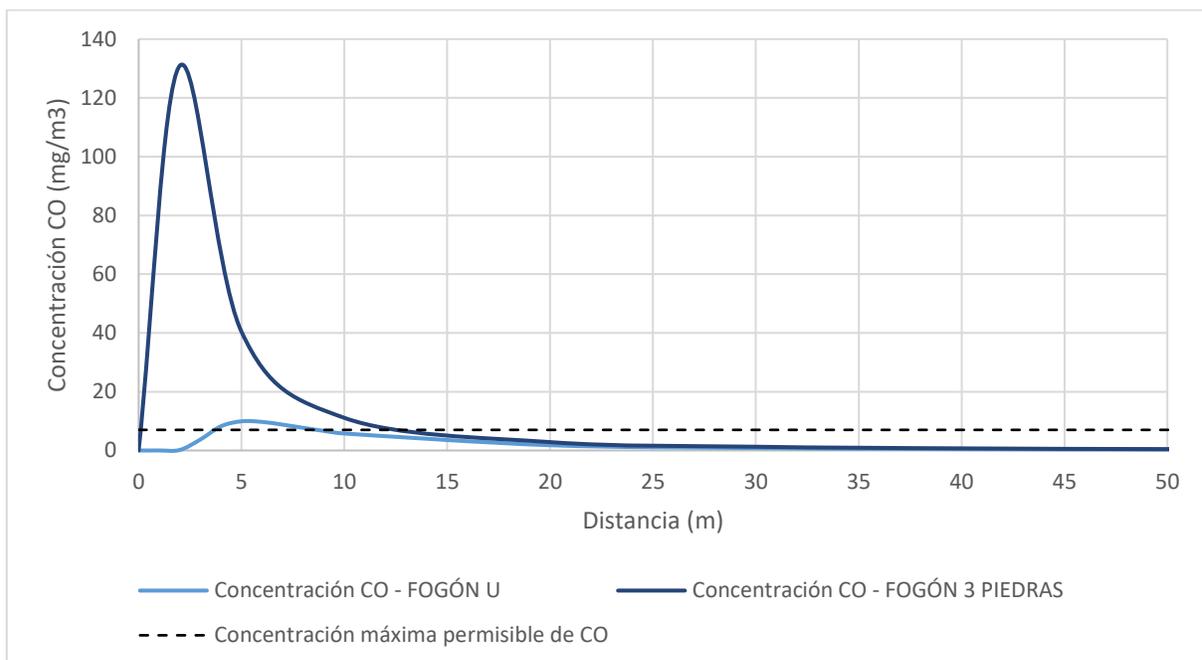


Ilustración 69. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica B Estufas: Fogón U y Fogón 3 piedras.

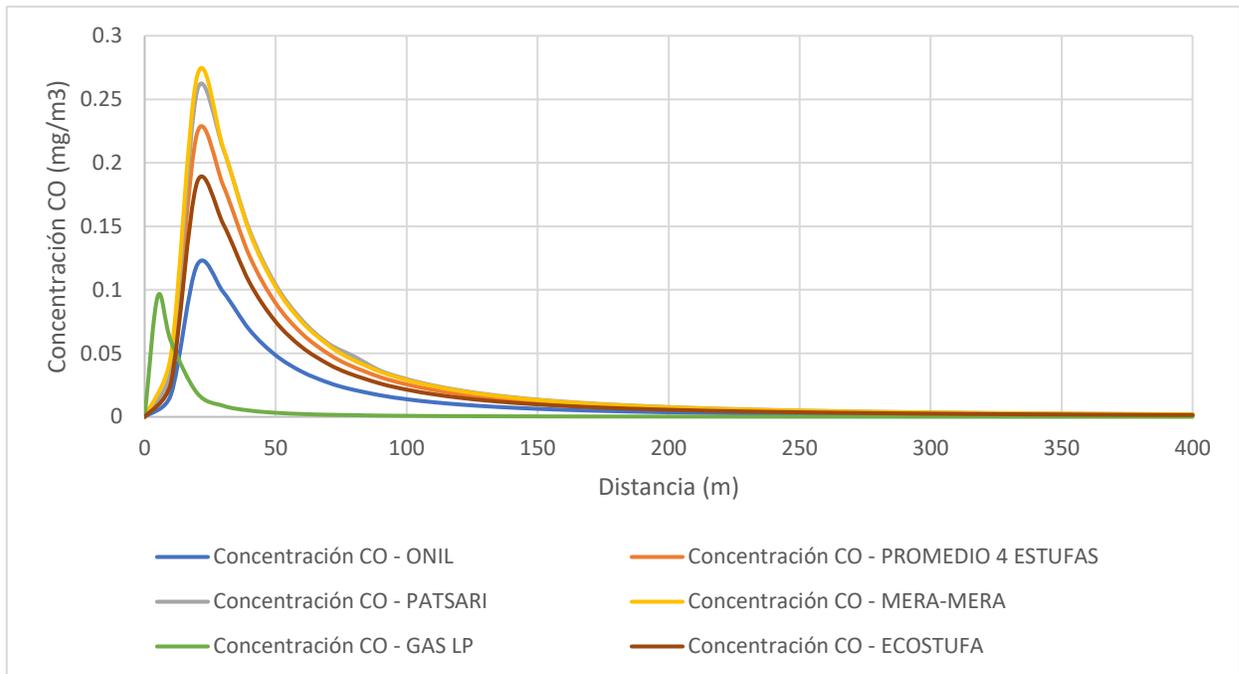


Ilustración 70. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica B Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.

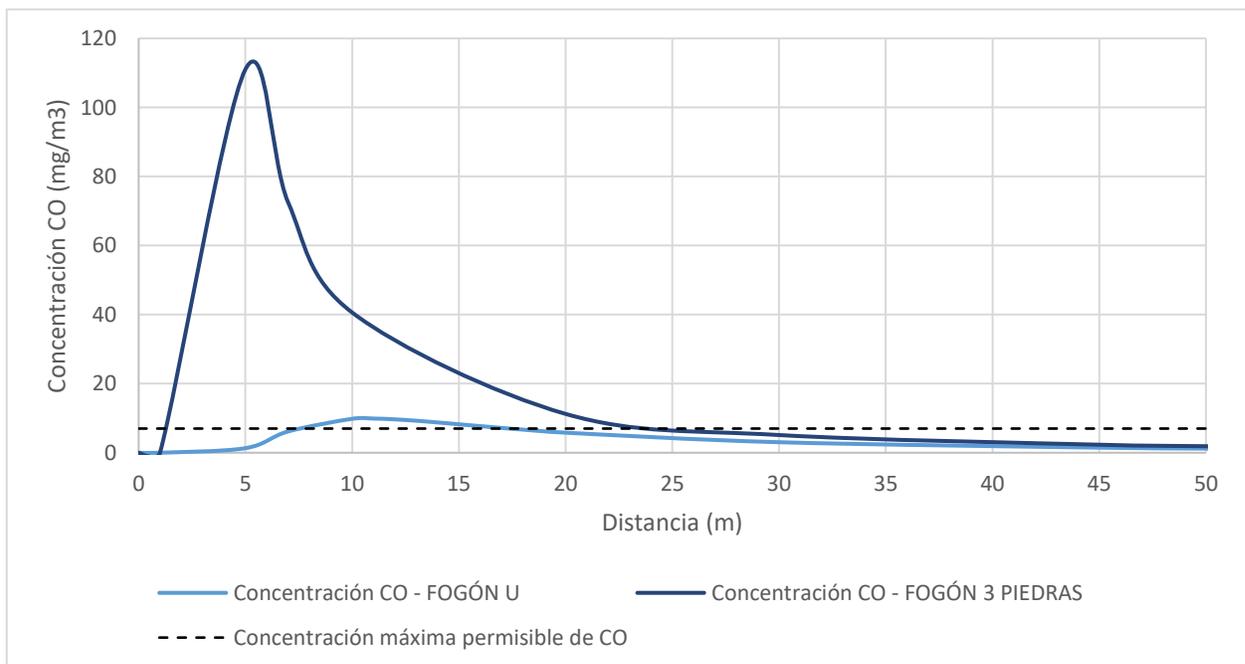


Ilustración 71. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica D Estufas: Fogón U y Fogón 3 piedras.

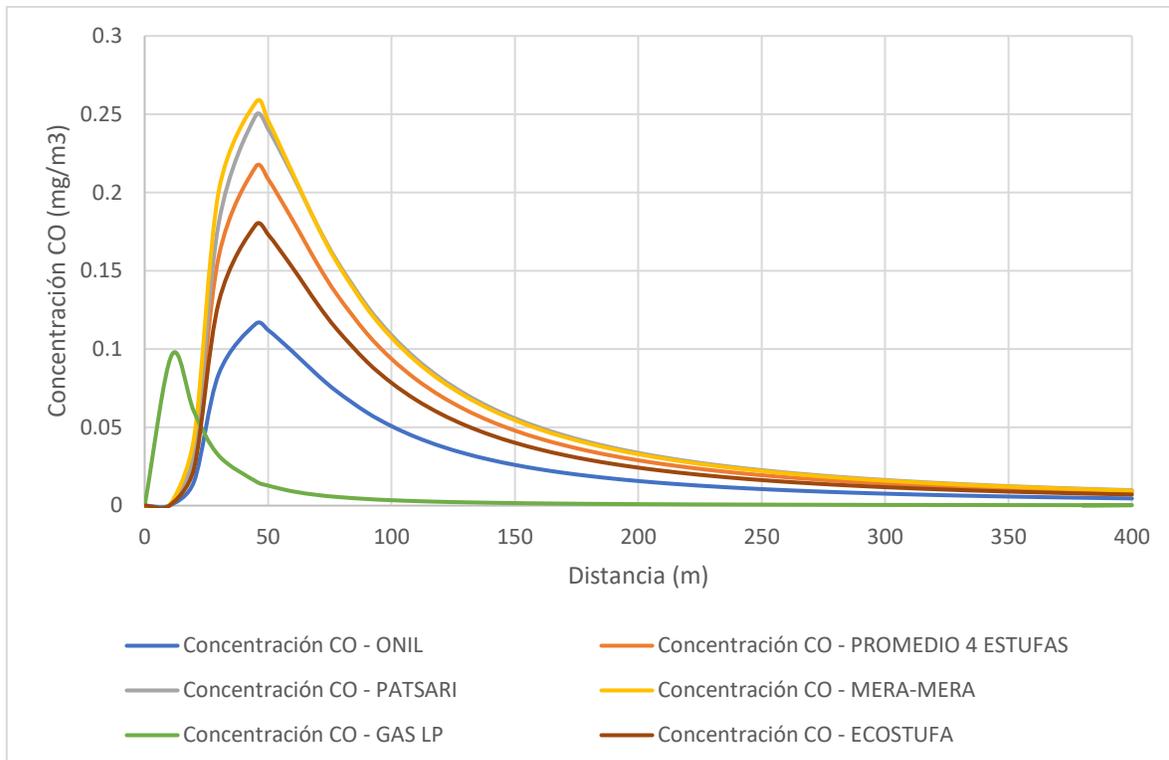


Ilustración 72. Concentración máxima de CO en el 4 trimestre del año para una clase de estabilidad atmosférica D Estufas: Patsari, Onil, Mera-Mera, Ecostufa, Promedio 4 Estufas con chimenea y Gas LP.

Tabla 17. Concentraciones de CO de los dispositivos de cocción mediante el modelo de pluma Gaussiano en el cuarto trimestre del año.

Estufa eficiente	Clase de estabilidad atmosférica	Modelo de pluma Gaussiano	
		Distancia (m)	Concentración máxima de CO (mg/m ³)
Ecostufa	A	13	0.22
	B	20	0.18
	D	45	0.18
Patsari	A	13	0.31
	B	20	0.26
	D	45	0.25
Mera-Mera	A	13	0.32
	B	20	0.27
	D	45	0.26
Onil	A	13	0.15
	B	20	0.12
	D	50	0.11
Promedio 4 estufas con chimenea	A	13	0.27
	B	20	0.22
	D	45	0.22
Estufa de gas LP	A	4	0.11
	B	5	0.09
	D	20	0.06
Fogón tipo U	A	3	12.02
	B	4	8.23
	D	10	9.83
Fogón tres piedras	A	1	162.05
	B	2	130.93
	D	5	111.03