

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



"INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS
EMISIONES DE CARBONO NEGRO Y MATERIAL
PARTICULADO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE
LEÑA EN ESTUFA PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN
RESIDENCIAL."

JORGE IGNACIO OYARZÚN AMPUERO

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO
CIVIL MECANICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.

PROFESOR CORREFERENTE: DR. FABIÁN GUERRERO C.

AGOSTO 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Jorge y Claudia, por el amor, preocupación y enseñanzas entregadas durante todos estos años.

A mi pareja Camila y mi hermana Catalina por todas las conversaciones, risas y ánimo que recibí de ustedes durante toda la etapa universitaria.

Al equipo de investigación del proyecto FONDEF IDeA ID 20I10319 y personal del Laboratorio de Energías Renovables, integrado por el profesor Mario, Fabián, Lorena y compañía, junto con quienes fue posible llevar a cabo este trabajo de título.

Y a mis amigos que siempre han estado como un gran apoyo.

Resumen

La presente investigación forma parte del desarrollo del proyecto FONDEF IDeA ID 20I10319, asociado a la reducción de emisiones provenientes de calefactores residenciales a leña, mediante la incorporación de mejoras tecnológicas, tales como, la adición de medios porosos inertes dentro de la estufa y el pretratamiento de lavado de leña. El principal objetivo en este trabajo es investigar las emisiones de carbono negro y material particulado en el proceso de combustión de leña en una estufa prototipo de calefacción residencial.

Se realizan ensayos experimentales de combustión en un calefactor a leña de doble cámara, marca Bosca modelo Spirit 380, en los cuales son estudiadas las emisiones de material particulado, carbono negro y gases de combustión. Estos ensayos se efectúan en 4 configuraciones distintas, variando las características del equipo, reemplazando parte de la vermiculita en el interior del hogar por medios porosos inertes de carburo de silicio y también variando las características del combustible, sometiendo a la leña a un proceso de lavado con agua desionizada. De este modo se obtienen las categorías de vermiculita con leña certificada (VM+LC), medios porosos con leña lavada (MP+LL), vermiculita con leña lavada (VM+LL) y medios porosos con leña certificada. (MP+LC).

Se utiliza como marco de referencia para las pruebas el método CH-5G, por lo cual se utiliza un túnel de dilución para la toma de muestras tal como indica la norma. Los distintos ensayos se tuvieron que realizar con una misma metodología a fin de minimizar las particularidades y que los resultados obtenidos sean representativos y comparables entre sí.

Son obtenidos resultados de tasas de quemado, temperaturas de operación, factores de emisión de material particulado de distintos diámetros, factores de emisión de black carbon (BC) y material particulado ultravioleta, factores de emisión de gases de combustión y eficiencias térmicas en base a la norma NCh. 3173.

A continuación, en la tabla N° 1 se presenta una tabla resumen con los principales resultados obtenidos en la investigación.

Tabla 1: Resumen con resultados obtenidos de la investigación.

	LC+VM	LC+MP	LL+VM	LL+MP
Masa [kg]	3,64	3,62	3,68	3,64
Humedad ensayo [%]	16,8	16,5	11,5	13,5
Tasa de quemado [kg/h]	4,47	4,21	5,04	4,84
T. paredes exteriores [°C]	291,5	302,5	295,2	277,4
T. gas Interior [°C]	604,2	670,1	688,9	625,4
FE PM2,5 [g/kg]	27,5	10,6	16,3	15,1
FE UVPM [g/kg]	2,1	2,3	3,5	3,3
FE BC [g/kg]	2,1	2,0	3,7	3,1
FE CO [g/kg]	637	738	1126	950
FE CO2IR [g/kg]	6268	6005	5863	5831
Media ppm CO	50769	35653	53967	39077
Media %O2	1,92	2,24	1,93	2,55
Eficiencia térmica [%]	60,9	65,4	60,7	-

La categoría que redujo la mayor cantidad de emisiones es la de medios porosos con leña certificada, en la cual hubo una reducción de un 61,4 % en la emisión de PM_{2,5}, respecto a la línea base, tuvo una menor tasa de quemado, existió una combustión más completa debido a la menor emisión de monóxido de carbono que en otras categorías y también redujo la emisión de carbono negro. En las categorías que se utilizó leña lavada, existieron disminuciones en la emisión de material particulado, sin embargo, la emisión de carbono negro es mayor que en la línea base.

Palabras clave: Material particulado, carbono negro, leña, combustión, medios porosos inertes, lavado de leña.

Abstract

The present research is part of the development of the FONDEF IDeA ID 20110319 project, associated with the reduction of emissions from residential wood stoves by incorporating technological improvements, such as the addition of inert porous media inside the stove and pre-treatment of firewood through washing. The main objective of this work is to investigate the emissions of black carbon and particulate matter in the wood combustion process in a prototype residential heating stove.

Experimental combustion tests are conducted on a dual-chamber wood heater, Bosca brand model Spirit 380, in which emissions of particulate matter, black carbon, and combustion gases are studied. These tests are carried out in four different configurations, varying the equipment characteristics by replacing part of the vermiculite inside the firebox with inert porous silicon carbide media, and varying the fuel characteristics by subjecting the firewood to a process of washing with deionized water. This way, the categories obtained are vermiculite with certified wood (VM+LC), porous media with washed wood (MP+LL), vermiculite with washed wood (VM+LL), and porous media with certified wood (MP+LC).

The CH-5G method is used as a reference framework for the tests, and sample collection is done using a dilution tunnel as specified in the standard. The different tests had to be carried out with the same methodology to minimize peculiarities and ensure that the results obtained are representative and comparable among themselves.

Results are obtained for burning rates, operating temperatures, emission factors of particulate matter of different diameters, emission factors of black carbon (BC) and ultraviolet particulate matter, emission factors of combustion gases, and thermal efficiencies based on NCh. 3173 standards.

Below, Table No. 2 provides a summary of the main results obtained in the research.

Tabla 2: Summary of research results.

	LC+VM	LC+MP	LL+VM	LL+MP
Mass [kg]	3,64	3,62	3,68	3,64
Moisture content [%]	16,8	16,5	11,5	13,5
Burning rate [kg/h]	4,47	4,21	5,04	4,84
Exterior walls t. [°C]	291,5	302,5	295,2	277,4
Interior gas t. [°C]	604,2	670,1	688,9	625,4
EF PM2,5 [g/kg]	27,5	10,6	16,3	15,1
EF UVPM [g/kg]	2,1	2,3	3,5	3,3
EF BC [g/kg]	2,1	2,0	3,7	3,1
EF CO [g/kg]	637	738	1126	950
EF CO2IR [g/kg]	6268	6005	5863	5831
Average ppm CO	50769	35653	53967	39077
Average %O2	1,92	2,24	1,93	2,55
Thermal efficiency [%]	60,9	65,4	60,7	-

The category that reduced the highest amount of emissions is the one with porous media and certified wood, which saw a reduction of 61.4% in PM2.5 emissions compared to the baseline. It also had a lower burning rate, a more complete combustion due to lower carbon monoxide emissions compared to other categories, and a reduction in black carbon emissions. In the categories involving washed wood, there were decreases in particulate matter emissions; however, the emission of black carbon was higher than in the baseline.

Keywords: Particulate matter, black carbon, woodfire, combustion, inert porous media, wood washing.

Índice general

Agradecimientos	1
Resumen.....	2
Abstract.....	4
1. Introducción	14
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo general.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. Marco teórico	17
3.1 Energía de la biomasa en Chile.....	17
3.2 Emisiones contaminantes.....	20
3.2.1 Material particulado	20
3.2.2 Carbono negro y carbono marrón	22
3.2.3 Gases de combustión.....	23
3.2.4 Tecnologías para la medición de emisiones.....	24
3.3 Tecnologías para la combustión de la leña	25
4. Diseño experimental	27
4.1 Leña.....	27
4.1.1 Pretratamiento de lavado de leña	27
4.1.2 Composición elemental y poder calorífico de Eucalyptus Globulus	28
4.2 Estufa Bosca Spirit 380.....	28
4.2.1 Estufa prototipo de calefacción residencial.....	30
4.3 Túnel de dilución	30
4.4 Sistemas de dilución y montaje en banco de pruebas	33
4.5 Métodos y equipos de medición.....	34

4.5.1	Medición de temperaturas	34
4.5.2	Grimm 11-D (Material Particulado).....	35
4.5.3	MetOne BC1060 (Carbono Negro).....	36
4.5.4	Analizador de gases Testo 350 XL	37
4.5.5	Analizador de gases y material particulado Testo 380.....	38
4.5.6	Método CH – 5G (Material particulado gravimétrico)	39
4.6	Cálculos relevantes para el análisis.....	39
4.6.1	Factores de emisión.....	39
4.6.2	Tasa de quemado.....	40
4.6.3	Eficiencia y potencia térmica total.....	40
5.	Procedimiento experimental	43
5.1	Consideraciones iniciales.....	43
5.1.1	Calefactor y ducto primario	43
5.1.2	Leña.....	43
5.1.3	Túnel de dilución y equipos de medición.	44
5.2	Encendido	44
5.3	Pre-ensayo.....	45
5.4	Ensayo.....	45
5.5	Post-ensayo	46
6.	Resultados experimentales.....	47
6.1	Resumen de los ensayos realizados	47
6.2	Temperaturas.....	50
6.3	Material Particulado.....	52
6.4	Black carbon y UVPM.....	55
6.5	Gases de combustión.....	59
6.6	Eficiencia térmica	65

7. Análisis experimental.....	67
8. Conclusiones	69
9. Referencias.....	70

Índice de Figuras

Ilustración 1:Matriz energética primaria en Chile, año 2021 Fuente: Elaboración propia en base a Energía Abierta (2023).....	17
Ilustración 2:Consumos finales de la biomasa, año 2021 Fuente: Elaboración propia en base a Energía Abierta (2023).	18
Ilustración 3:Precio de los principales combustibles utilizados para calefacción, Fuente: RedPE (2020), a partir de Ministerio de Energía (2019)	18
Ilustración 4:Porcentaje de hogares, por región, que utiliza la leña para calefaccionar, cocinar y/o calentar agua. Fuente: (CR)2 (2020) en base a CASEN (2017)	20
Ilustración 5:Emisiones de PM _{2.5} según fuente contaminante en 2018 por región, Fuente RedPe(2022) en base a MMA (2020).	21
Ilustración 6:Distribución sectorial de emisiones de carbono negro en Chile para el año 2016, Fuente: (CR)2 (2020) en base a Gallardo et al (2020).	22
Ilustración 7:Diagrama para el análisis de los gases de combustión Fuente Testo (2023)	23
Ilustración 8:Principio de funcionamiento del espectrómetro láser GRIMM. Fuente: GRIMM AEROSOL TECHNIK (2022)	25
Ilustración 9 Diagrama de combustión catalítica. Fuente: Midwest hearth.	26
Ilustración 10:Esquema del sistema de doble combustión. Fuente: Bosca (2017)	29
Ilustración 11:Incorporación de MPI en la estufa y sujeción “tipo prensa”. Fuente: Elaboración propia	30
Ilustración 12:Diagrama de túnel de dilución. Fuente: Muñoz (2019)	31
Ilustración 13:Diagrama de Montaje de Sondas dentro del Ducto. Fuente: Elaboración propia.	32
Ilustración 14:Diagrama de montaje en el banco de pruebas de los equipos de medición de gases. Fuente: GTS (2023).....	33
Ilustración 15:Ubicación de las termocuplas en la estufa. Fuente: Adaptación en base a Oyarzo (2022).....	35
Ilustración 16:Espectrómetro de láser GRIMM 11-D. Fuente: Durag (2023).	35
Ilustración 17:Etalómetro MetOne BC 1060. Fuente: MetOne(2023).....	36
Ilustración 18:Analizador de gases Testo 350. Fuente: Testo (2023).....	37
Ilustración 19:Analizador de gases y partículas finas testo380. Fuente: Testo (2023).	38

Ilustración 20:Esquema representativo del tren de muestreo, método CH-5G (Fuente: SEC (2012))	39
Ilustración 21:Niveles del regulador de tiro, Fuente: Bosca (2017)	45
Ilustración 22:Promedio de masas por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	49
Ilustración 23:Promedio de humedad de la leña por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	49
Ilustración 24:Promedio de duración del ensayo por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 25:Promedio de tasa de quemado por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	50
Ilustración 26:Temperaturas interiores promedio de cada quema de acuerdo con el sector de la estufa. Fuente: Elaboración propia.....	51
Ilustración 27:Temperaturas promedios por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.	51
Ilustración 28:Variación en el tiempo de la concentración de material particulado TSP. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 29:Factores de emisión de material particulado para distintos diámetros de partícula. Fuente: Elaboración propia.	53
Ilustración 30:Factores de emisión promedios según categoría de ensayo y diámetro. Fuente: Elaboración propia.	54
Ilustración 31:Porcentaje de reducción de factores de emisión respecto a línea base, según categoría. Fuente: Elaboración propia.	55
Ilustración 32:Factores de emisión de UVPM para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.	57
Ilustración 33:Factores de emisión de black carbon para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.	57
Ilustración 34:Valores promedios de factor de emisión de UVPM. Fuente: Elaboración propia.	58
Ilustración 35Valores promedios de factor de emisión de black carbon. Fuente: Elaboración propia.	58
Ilustración 36:Valores promedios de factor de emisión de monóxido de carbono. Fuente: Elaboración propia.	59

Ilustración 37:Valores promedios de factor de emisión de óxidos de nitrógeno. Fuente: Elaboración propia. 60

Ilustración 38:Valores promedios de factor de emisión de dióxido de azufre. Fuente: Elaboración propia. 60

Ilustración 39:Valores promedios de factor de emisión de hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia. 61

Ilustración 40:Valores promedios de factor de emisión de hidrogeno. Fuente: Elaboración propia. 61

Ilustración 41:Valores promedios de factor de emisión de dióxido de carbono. Fuente: Elaboración propia. 62

Ilustración 42:Variación en el tiempo de la concentración de oxígeno en distintas quemas. Fuente: Elaboración propia. 63

Ilustración 43:Valores promedio de concentración de oxígeno para varias quemas en los primeros 1200 [s]. Fuente: Elaboración propia..... 64

Ilustración 44:Variación en el tiempo de la concentración de monóxido de carbono en el tiempo. Fuente: Elaboración propia. 64

Ilustración 45:Valores promedio de concentración de monóxido de carbono para varias quemas en los primeros 1200 [s]. Fuente: Elaboración propia. 65

Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen con resultados obtenidos de la investigación.	3
Tabla 2: Summary of research results.	5
Tabla 3: Consumo total de leña por región en metro cúbico estéreo (m ³ st) Fuente: (CR)2 (2020)	19
Tabla 4: Concentración máxima de material particulado fino (PM _{2.5}) Fuente: RedPE (2022) en base a OMS (2021 y MMA (2011)	21
Tabla 5: Poderes caloríficos superior e inferior de leñas con y sin lavado Fuente: Elaboración Propia en base a Villablanca (2022).	28
Tabla 6: Análisis elemental Eucalyptus Globulus, resultados en base recibida Fuente: Elaboración Propia en base Informe de Análisis N° QUI-055-20.	28
Tabla 7: Características y especificaciones técnicas BOSCA Spirit 380. Fuente: Bosca (2017)	29
Tabla 8: Características del MPI utilizado en estufa prototipo Fuente: Elaboración propia, en base a Oyarzo (2022).:	30
Tabla 9: Códigos y ubicación de los termopares instalados en la estufa y tren de muestreo. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 10: Especificaciones técnicas espectrómetro láser GRIMM 11-D. Fuente: Durag (2023).	35
Tabla 11: Especificaciones técnicas etalómetro MetOne BC 1000. Fuente: MetOne(2023)..	36
Tabla 12: Especificaciones técnicas analizador de gases Testo 350. Fuente: Testo (2023). ...	37
Tabla 13: Especificaciones técnicas analizador de gases y partículas finas Testo 380. Fuente: Testo (2023).	38
Tabla 14: Detalle de ensayos realizados en la categoría leña certificada con vermiculita (LC+VM). Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 15: Detalle de ensayos realizados en la categoría leña certificada con medios porosos (LC+MP). Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 16: Detalle de ensayos realizados en la categoría leña lavada con medios porosos (LL+MP). Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 17: Detalle de ensayos realizados en la categoría leña lavada con vermiculita (LL+VM). Fuente: Elaboración propia.	48

Tabla 18:Resumen de valores promedios de los ensayos realizados según cada categoría.
Fuente: Elaboración propia. 48

Tabla 19:Valores de factores de emisión promedio según categoría y diámetro. Fuente:
Elaboración propia. 54

Tabla 20:Valores del coeficiente de variación para los valores promedios de factores de
emisión. Fuente: Elaboración propia. 54

Tabla 21:Tabla resumen con factores de emisión, cantidad de datos y cantidad de datos
perdidos. Fuente: Elaboración propia. 55

Tabla 22: Resumen de factores de emisión y perdida de datos. Fuente: Elaboración propia. 58

Tabla 23:Valores promedios de factores de emisión de gases de combustión para distintas
quemadas. Fuente: Elaboración propia. 62

Tabla 24:Valores promedios de coeficiente de variación para distintas quemadas. Fuente:
Elaboración propia. 62

Tabla 25:Aplicación de la NCh.3173 para cálculos de eficiencia, potencia térmica total y caudal
másico de los humos. Fuente: Elaboración propia. 65

1. Introducción

La biomasa es una fuente de energía renovable, en la cual se aprovecha la energía química de los productos orgánicos (animales o vegetales), para la transformación y aprovechamiento de esta energía es necesario utilizar procesos químicos, donde el proceso más utilizado y común es el de la combustión.

La combustión corresponde a una reacción química exotérmica en la cual un combustible y un comburente reaccionan entre sí liberando luz, calor, dióxido de carbono, y vapor de agua, junto con otros gases en menor proporción.¹

La biomasa fue la principal fuente de energía utilizada por los seres humanos desde la prehistoria hasta la revolución industrial y hasta la fecha posee una gran relevancia en la calefacción y preparación de alimentos para más de 2000 millones de personas en el mundo. Su uso presenta diversas ventajas ya que es una fuente inagotable de recursos energéticos, disminuye la cantidad de desechos producidos por la industria, favorece a las economías locales y supone una emisión neutra de dióxido de carbono. Sin embargo, la falta de regulación en su producción y uso, la pobre calidad de los combustibles y escasez de mejoras tecnológicas de los calefactores acarrear desventajas, así como, la deforestación, contaminación atmosférica y problemas en la salud de las personas.

En Chile el uso de la biomasa como leña es utilizada por alrededor de 2 millones de hogares en país para calefacción, también trae consigo problemas ambientales y de salud pública durante los meses más fríos del año en la zona centro-sur, llegando al nivel de estar en los rankings con las ciudades que poseen la peor calidad del aire en el mundo, tales como Temuco, Osorno y Coyhaique.

Este trabajo en el marco del proyecto FONDEF IDeA ID20I10319 denominado “Innovador prototipo de calefacción residencial integrado al pretratamiento de lavado de leña para la mitigación de contaminantes atmosféricos: carbono negro, material particulado y gases de combustión” busca ser un aporte para la solución de los problemas antes mencionados, esto mediante la investigación experimental de las emisiones de material particulado, carbono negro y gases de combustión en una estufa prototipo de calefacción residencial, la cual fue modificada incorporando medios porosos inertes en un su hogar (mejora tecnológica del reactor), y además, utilizar un pretratamiento de lavado a la leña utilizada, que busca extraer compuestos precursores de contaminantes atmosféricos (mejora en la calidad del combustible).

¹ https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Combustión_de_hidrocarburos

La investigación será llevada a cabo a través de la realización de ensayos de combustión de leña, utilizando como referencia el Método CH-5G del ISP en 4 configuraciones distintas, donde serán monitoreados los contaminantes emitidos y temperaturas del equipo, posteriormente los datos serán analizados y comparados entre sí para generar conclusiones de los resultados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

En el marco del proyecto de FONDEF-IDEA código ID20I10319 denominado “Innovador prototipo de calefacción residencial integrado al pretratamiento de lavado de leña para la mitigación de contaminantes atmosféricos: carbono negro, material particulado y gases de combustión”, el objetivo principal de este trabajo es investigar las emisiones de carbono negro y material particulado del proceso de combustión de leña en estufa prototipo de calefacción residencial.

2.2 Objetivos específicos

- Reconocer sistemas de medición y muestreo de carbono negro y material particulado.
- Implementar un sistema de medición y muestreo de carbono negro y material particulado, acoplado a una estufa prototipo de calefacción residencial.
- Desarrollar pruebas experimentales utilizando leña certificada y lavada, y estufa prototipo con vermiculita y con medio poroso inerte.
- Analizar y comparar los resultados experimentales obtenidos para emitir conclusiones

3. Marco teórico

3.1 Energía de la biomasa en Chile

La oferta total de la matriz energética primaria en Chile, el año 2021 fue de 308.092 [Tcal], está principalmente conformada por combustibles fósiles; petróleo, carbón y gas natural, los cuales en su suma corresponden al 70% de la matriz energética. Por su parte la biomasa (19%) durante el 2021 fue la cuarta principal fuente de energía primaria más importante de país.

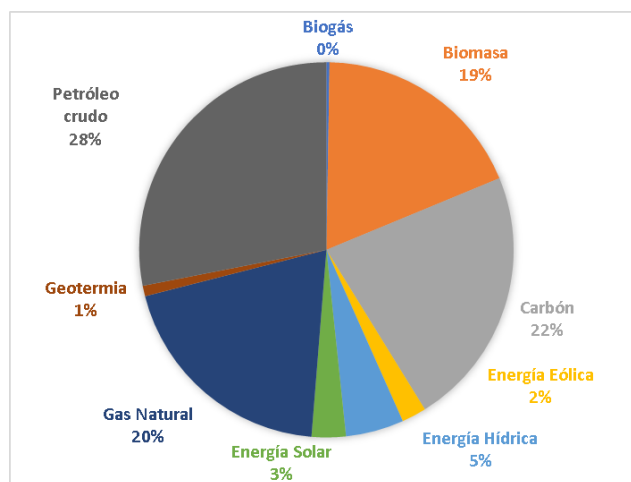


Ilustración 1: Matriz energética primaria en Chile, año 2021 Fuente: Elaboración propia en base a Energía Abierta (2023)

La oferta total de energía aportada por la biomasa el año 2021 fue de 56.979 [Tcal], siendo su principal uso la autoproducción de energía para faenas forestales (35 %), la generación de energía eléctrica para la red (10 %), donde destaca la central de biomasa Laja en Cabrero con una capacidad instalada de 13 [MW]. El restante es utilizado por el sector industrial (23 %), donde la mayor parte va para la fabricación de papel y celulosa. El sector residencial (32%) utiliza una parte importante de la oferta total, utilizándola principalmente para calefacción, donde predomina el uso de la leña y en menor medida los pellets y briquetas, representando un total de 18.157 [Tcal].

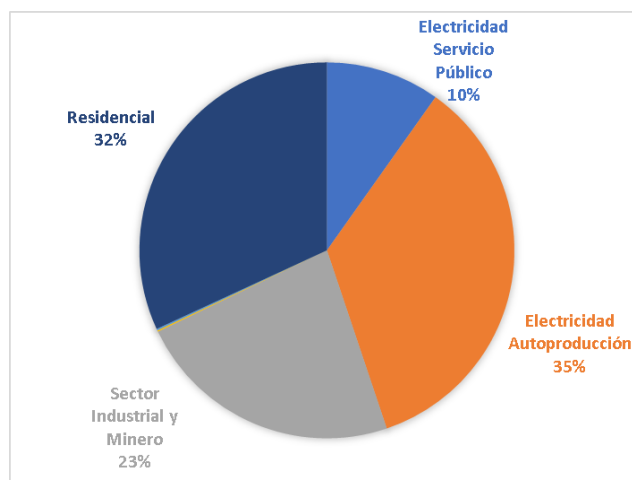


Ilustración 2: Consumos finales de la biomasa, año 2021 Fuente: Elaboración propia en base a Energía Abierta (2023).

Según datos de la CONAF al año 2017, en nuestro país el mercado de la leña moviliza aproximadamente 200 millones de dólares emplea a más de 100.000 trabajadores anualmente. Lo cual trae consigo una serie de externalidades positivas. En el ámbito socio económico, ofrece una alternativa al acceso a la energía más asequible, favorece la generación de empleos y fortalece los mercados locales. En el ámbito ambiental, se considera que el uso de leña es neutro en cuanto a las emisiones de carbono (IPCC,2006), por lo que se puede entender que su uso evita emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el consumo de este combustible también trae consigo externalidades negativas como lo son que el uso de leña está asociado con la degradación de bosques y la contaminación atmosférica. A su vez, aunque se generen empleos, generalmente son precarios, discontinuos y una gran informalidad en las etapas de producción y comercialización.

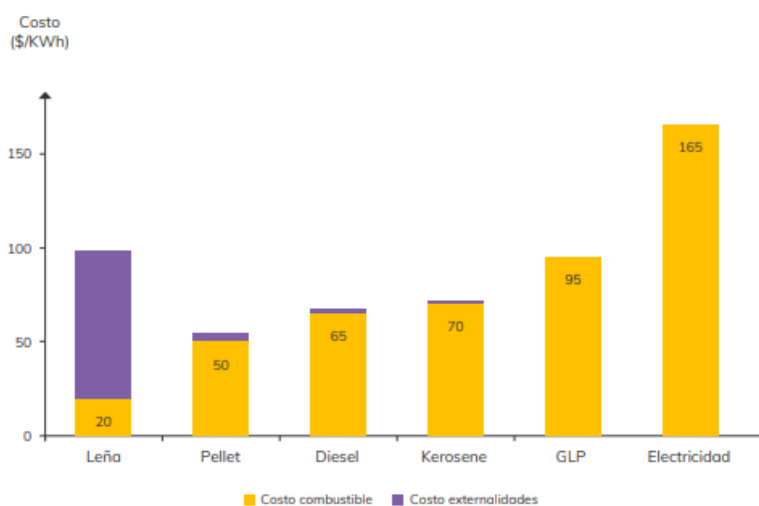


Ilustración 3: Precio de los principales combustibles utilizados para calefacción, Fuente: RedPE (2020), a partir de Ministerio de Energía (2019)

De acuerdo con la ilustración N° 3 se observa que la leña es la fuente energética para calefacción más económica, respecto a otras opciones a nivel nacional. Sin embargo, es importante destacar que el análisis no muestra el costo que presentan las externalidades negativas asociadas al consumo de leña, los cuales corresponden a la contaminación atmosférica, problemas en salud pública asociado a enfermedades respiratorias, degradación de bosques y una merma en la recaudación de impuestos dada la gran informalidad del mercado. A pesar el significativo aumento de precios que ha tenido la leña en los últimos años, este combustible continúa siendo una opción competitiva y de preferencia para los consumidores frente al resto de las alternativas.

Entre la región de O'Higgins y la de Magallanes, al año 2017, un 70% de los hogares hacen uso de la leña como combustible para la calefacción de los hogares, lo cual representa a casi 5 millones de viviendas, mientras que, entre las regiones de la Araucanía y Aysén, la leña presenta una penetración mayor al 87 %. Presentando una penetración de casi un 100% en los rectores rurales del país.

Tabla 3: Consumo total de leña por región en metro cúbico estéreo (m³ st) Fuente: (CR)2 (2020)

Región	Porcentaje de hogares que usan leña	Número de viviendas	Consumo Inferior (m3 st)	Consumo Superior (m3 st)	Fuente
RM	5 %	2.378.490	281.940	326.446	UACH(2013)
O'Higgins	48 %	354.324	591.112	1.048.724	Reyes et al. (2020)
Maule	61 %	411.211	879.875	1.806.887	Reyes et al. (2018)
Biobio	67 %	768.162	2.813.436	4.495.239	INFOR (2019)
Araucania	86 %	381.170	2.517.281	4.714.219	INFOR (2019)
Los Rios	90 %	153.990	1.945.422	1.961.807	Reyes (2017)
Los Lagos	92 %	332.935	4.235.207	5.647.570	UACH (2013)
Aysén	95 %	44.726	741.196	1.364.923	UACH(2013)
Magallanes	2 %	65.641	19.071	29.964	UACH(2013)
Total*	70%**	4.890.649	14.024.541	21.030.204	

*El total se refiere a las regiones presentadas en la tabla, no corresponde al total nacional. **Para el Porcentaje de hogares que usan leña, el total corresponde al número total de viviendas en las regiones de la tabla (sin la RM) que usan leña y no al promedio de los porcentajes.

Como se puede observar en la ilustración 4 el uso de la leña como combustible, no se restringe a tan solo la calefacción en las viviendas, sino que también existe un importante número de familias entre la región de la Araucanía y Aysén que utiliza la energía que provee la leña para la cocción diaria de sus alimentos y además la obtención de agua caliente sanitaria.

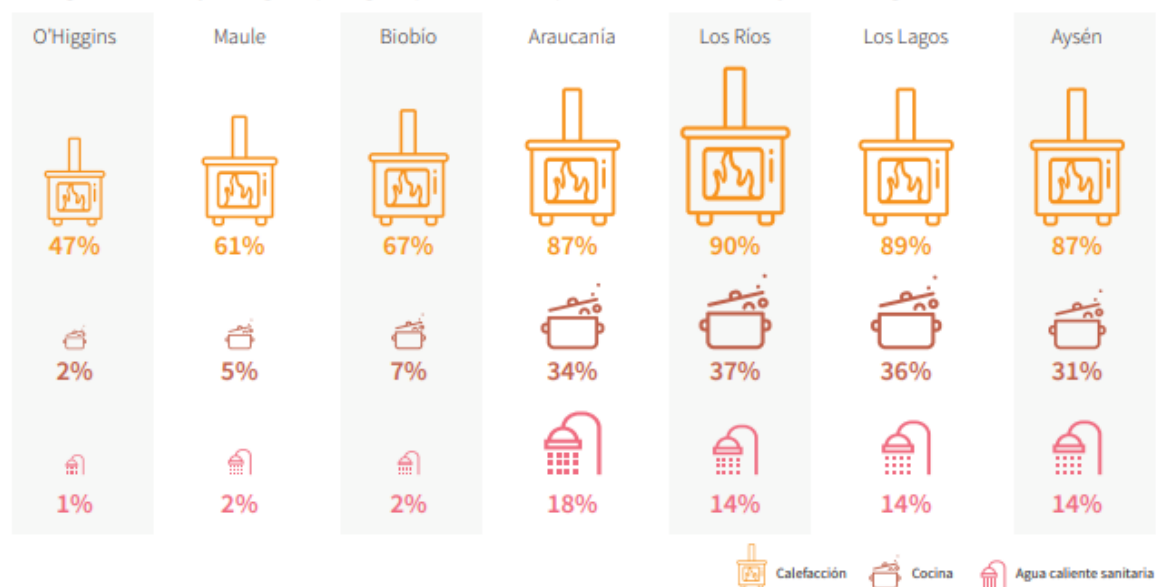


Ilustración 4: Porcentaje de hogares, por región, que utiliza la leña para calefaccionar, cocinar y/o calentar agua.
Fuente: (CR)2 (2020) en base a CASEN (2017)

3.2 Emisiones contaminantes

Las emisiones contaminantes en Chile se comenzaron a monitorear en el año 1988, comenzando por Santiago y luego en otras regiones. Las fuentes responsables de la contaminación atmosférica van variando, de acuerdo con el lugar del país. Mientras que en el norte de Chile los responsables parecieren ser las industrias y la actividad minera. En el sur de Chile la principal fuente causante de contaminación ambiental es el uso de leña como combustible para calefacción, lo cual se trata de un fenómeno estacional el cual ocurre solo durante la época más fría.

A continuación, se darán a conocer los principales tipos de contaminantes producto de la combustión de leña.

3.2.1 Material particulado

El material particulado, también conocido como aerosoles, corresponde a pequeñas partículas sólidas o líquidas que se encuentran dispersas en el aire. El tamaño de estas partículas es variable desde partículas con un diámetro inferior a 0,1 micrómetros, hasta partículas que son visibles a simple vista. El material particulado puede tener un origen natural, como las emisiones volcánicas, o antropogénico, es decir, todo lo ligado con la actividad humana.

Estas partículas si bien poseen distintas propiedades químicas y físicas se suelen clasificar de acuerdo con el diámetro aerodinámico de la partícula es decir PM_{10} corresponde a todas las partículas con un diámetro inferior a 10 micrómetros y $PM_{2,5}$ son todas las partículas con un diámetro inferior a 2,5

micrómetros. En el país se encuentran reguladas las emisiones $PM_{2.5}$ y PM_{10} estableciendo valores máximos a las concentraciones en 24 horas y anuales. En la tabla N° 4 se pueden observar las concentraciones máximas de material particulado fino ($PM_{2.5}$) según la normativa chilena y la recomendación de la OMS.

Tabla 4: Concentración máxima de material particulado fino ($PM_{2.5}$) Fuente: RedPE (2022) en base a OMS (2021 y MMA (2011)

	Concentración de $MP_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	
	Recomendación OMS	Norma Chilena
Anual	5	20
24 horas	15	50

Mientras el material particulado sea más fino es cada vez más peligroso dado que al ser inhalado por el ser humano puede entrar más fácilmente al cuerpo a través de las vías respiratorias y al torrente sanguíneo, provocando enfermedades cardiopulmonares y estando asociada a cerca de 4500 muertes anuales en Chile.

En el siguiente gráfico se puede observar las emisiones de $PM_{2.5}$ según distintas fuentes de emisión por región, se observa que la combustión de leña es la fuente de emisión más importante desde la región de Valparaíso hasta la región de Aysén.

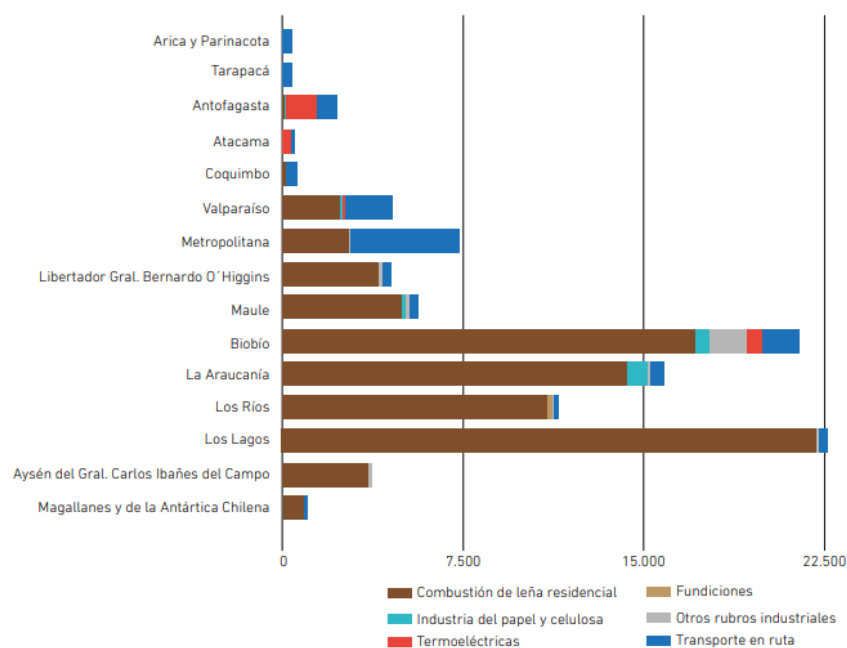


Ilustración 5: Emisiones de $PM_{2.5}$ según fuente contaminante en 2018 por región, Fuente RedPe(2022) en base a MMA (2020).

3.2.2 Carbono negro y carbono marrón

El carbono negro y el carbono marrón corresponden a una fracción del material particulado, el cual, proviene principalmente a partir de la quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y otros, en presencia de llamas. Dentro de las características que presenta el carbono negro, podemos encontrar que posee una estructura amorfa, su tamaño va desde los 10 a los 50 [nm], es refractario, es insoluble en agua, y absorbe eficazmente la radiación solar en el espectro visible e infrarrojo.

El carbono negro es una especie muy relevante en el ámbito del calentamiento global, ya que la radiación solar que absorbe da a lugar al aumento de temperaturas, sin embargo, el tiempo de residencia atmosférico que posee es de unos pocos días, su mitigación tiene un efecto a corto plazo sobre su abundancia en el sistema climático y la merma del efecto invernadero. Estudios recientes muestran que su reducción puede ser la clave para limitar el aumento de temperatura de 2°C a 1,5°C a final de siglo

El carbono marrón tiene un origen similar al carbono negro, sin embargo, este no absorbe todo el espectro visible y absorbe longitudes de onda ultravioletas. El brown carbon es de menor tamaño que el black carbon.

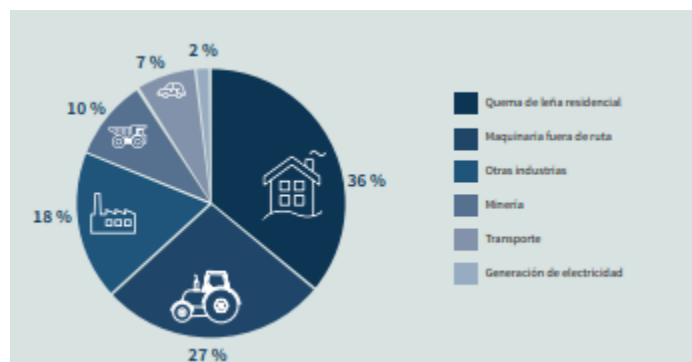


Ilustración 6: Distribución sectorial de emisiones de carbono negro en Chile para el año 2016, Fuente: (CR)2 (2020) en base a Gallardo et al (2020).

En la ilustración N° 6 se puede observar la gran relevancia que posee la quema de leña residencial (36%) en las emisiones de carbono negro en Chile.

En este trabajo se medirá black carbon y material particulado que absorbe radiación UV (UVPM), si bien, el carbono marrón absorbe radiación UV este no es el único tipo de compuesto en los aerosoles que es capaz de absorber radiación UV. Por lo cual, el BrC si está directamente relacionado con el UVPM, pero no son exactamente lo mismo.

3.2.3 Gases de combustión

A partir del proceso químico de la combustión, en el que un combustible se quema en presencia de oxígeno se libera energía térmica y gases de combustión. La composición y proporción de estos gases de combustión es variable ya que depende del combustible utilizado y las condiciones en las que ocurre el proceso de combustión. La gran mayoría de estos gases son considerados como contaminantes ya que pueden generar efectos nocivos en el medioambiente y la salud de las personas.

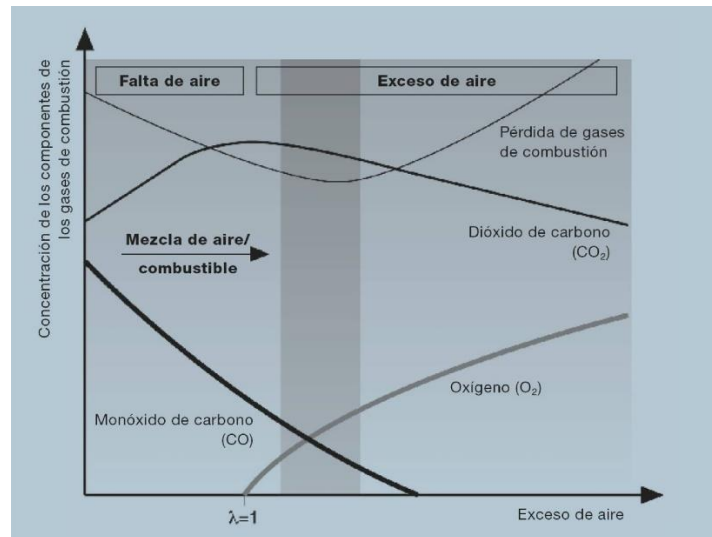


Ilustración 7: Diagrama para el análisis de los gases de combustión Fuente Testo (2023)

A continuación, se presentarán algunos de estos gases producto de la combustión, los cuales serán monitoreados en los experimentos de este trabajo.

- **Dióxido de carbono (CO₂):** Es un gas incoloro e insípido, el cual se genera en todos los procesos de combustión, significa un gran aporte al efecto invernadero y cambio climático.
- **Monóxido de carbono (CO):** Se trata de un gas tóxico incoloro e inodoro. Se produce en situaciones de combustión incompleta. Puede ser mortal para las personas en altas concentraciones.
- **Óxidos de nitrógeno (NO_x):** Aquí se trata de dos moléculas NO y NO₂, los cuales se producen cuando el nitrógeno del combustible o el del ambiente en altas temperaturas reaccionan con el oxígeno formando estos compuestos. Ambos son tóxicos y el NO₂ junto con la luz solar contribuyen a la formación de ozono.
- **Dióxido de azufre (SO₂):** Es un gas incoloro, tóxico y con olor picante, se produce por la oxidación del azufre presente en el combustible.

- Hidrocarburos (C_xH_y): Se trata de una gran variedad de compuestos químicos, formado solo por carbono e hidrógenos, el más pequeño de ellos es el gas metano (CH_4). Forman parte del material particulado y son precursores del efecto invernadero.
- Hidrogeno (H_2): El hidrogeno es un gas, el cual también es posible de combustionar. Dependiendo del combustible y las condiciones en la que ocurre la combustión este puede ser un producto de la combustión. No es un gas de efecto invernadero propiamente tal, sin embargo, su presencia en la atmosfera puede colaborar en reacciones de compuestos químicos que si son contaminantes.

3.2.4 Tecnologías para la medición de emisiones

Los sistemas de medición y muestreo son de demasiada importancia para llevar a cabo un monitoreo de la calidad del aire o emisiones en distintas fuentes. En Chile existe el “Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire” (SINCA), perteneciente al Ministerio del Medioambiente, en el cual se encuentra información de la red de estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos normados en Chile y dispuestas a lo largo de todo el país.

Las tecnologías autorizadas por el MMA para la medición de material particulado en las estaciones de monitoreo se basan en la recolección de PM del aire mediante un filtro de microfibra de cuarzo, posteriormente, los cálculos se basan en la cantidad de PM presente en el filtro y el volumen de aire que pasó a través del filtro durante el periodo de recolección. Existen dos tecnologías utilizadas, las cuales son las siguientes:

- Absorción de radiación Beta: Consiste en medir la radiación beta antes y después de que el aire pase por el filtro y el PM sea recolectado. Primero mide en una zona limpia del filtro para tener una línea base, luego el filtro realizar el muestreo de PM y finalmente el detector de radiación realiza la lectura final. La diferencia de recuento beta se puede relacionar directamente con la masa de partículas impactadas.
- Variación de frecuencia de oscilación con la masa: Se basa en la propiedad de que al aumentar la masa de una barra varía su frecuencia de resonancia. Las partículas son impactadas en un filtro, por lo que varía la masa, un sensor piezoeléctrico a través de señales eléctricas es capaz de detectar las variaciones en la frecuencia de resonancia del filtro, lo que indica una variación de su masa. Conociendo la cantidad que aire que ha pasado por el filtro es posible conocer la concentración de material particulado.

El método utilizado para determinar las emisiones de material particulado en calefactores a leña es el método CH-5G, el cual consiste en que los gases producto de la combustión se hacen pasar por un

túnel de dilución y parte de ellos se hacen pasar por un filtro de masa conocida el cual atraparé el PM, durante toda la fase de ensayo. Finalmente se masa el filtro con una balanza analítica y es posible calcular un factor de emisión de material particulado.

En este trabajo para la medición de material particulado se utilizó un espectrómetro láser, este equipo funciona gracias a un láser que posee una forma definida, cuando una partícula perteneciente a la muestra de gases atraviesa el volumen de luz del láser, esta luz es dispersada y cada señal de dispersión es contada por un fotodiodo, variando la intensidad de la señal de acuerdo al diámetro de la partícula, a partir de la combinación entre pulsos e intensidades el dispositivo es capaz de medir el número de partículas y su distribución por tamaño que atravesaron el láser.

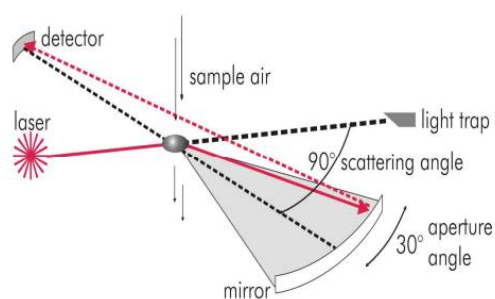


Ilustración 8: Principio de funcionamiento del espectrómetro láser GRIMM. Fuente: GRIMM AEROSOL TECHNIK (2022)

En cuanto para la medición y monitoreo de carbono negro y marrón se utiliza un equipo llamado Etalómetro el cual es un dispositivo utilizado para medir la concentración de las partículas visibles (brown carbon, black carbon) en aire contaminado o desde gases de combustión. Su principio de funcionamiento de este equipo se basa en que el flujo de gas estudiado se hacer pasar a través de un papel filtro, quedando las partículas atrapadas en el papel, por lo cual va oscureciéndose el color del papel en el tiempo, posteriormente el sector donde son impactadas las partículas son iluminadas con una luz cercana al infrarrojo de 880 [nm] para el carbono elemental y otra luz ultravioleta de 370 [nm] para el carbono elemental y el orgánico. Esto quiere decir que dependiendo la naturaleza de la partícula esta absorberá o reflejará las distintas frecuencias de onda de la luz. Midiendo el cambio de intensidad de luz reflejada en intervalos regulares de tiempo es posible calcular la concentración black carbon y de UVPM. Una vez que se satura el sector donde son impactadas las partículas se corre la cinta para comenzar a trabajar en un nuevo “spot”.

3.3 Tecnologías para la combustión de la leña

- Chimenea: Este es un tipo de calefactor el cual va incorporado a la estructura de la construcción, comúnmente está fabricado con ladrillos refractarios, el hogar es de tipo abierto

y no posee regulación de tiro. Posee una baja eficiencia térmica, la cual ronda entre 10 % a 20 %, por lo que su uso no se recomienda para la calefacción, sino más bien, como algo estético.

- Salamandra: La salamandra fue el primer tipo de calefactor en no estar incorporado en la construcción, se encuentran fabricadas a partir de hierro fundido, tienen una limitada capacidad de regulación de tiro y su eficiencia térmica es de alrededor de 30 % a 50 %.
- Cocina a leña: Existen cocinas a leña fabricadas de hierro fundido y también de planchas de acero. Es posible realizar la cocción de alimentos en este dispositivo, dado que, cuentan con una plancha y un horno. Su eficiencia térmica oscila entre 30% a 50%
- Combustión lenta de una cámara: Este aparato está fabricado de planchas de acero soldadas, posee una puerta con vidrio y no posee filtraciones de aire en su interior, lo cual permite tener un control total del ingreso del aire, su eficiencia térmica es de 40% a 55%.
- Combustión lenta de doble cámara: De construcción similar a la combustión lenta de una cámara, con la diferencia que esta posee una entrada de aire secundario, lo cual permite quemar gases que no pudieron ser combustionados en primera instancia, creando una segunda cámara de combustión. Su eficiencia térmica ronda entre un 50% a un 70%, y produce una merma en las emisiones de contaminantes
- Combustión catalítica: Esta tecnología fue creada en Norteamérica durante la década de los 80. A la estufa se le incorpora un elemento catalítico fabricado generalmente de óxido de aluminio, recubierto con paladio, lo cual permite lograr eficiencias térmicas de hasta un 80% y aumentar la duración de la leña en un 30% más. Sin embargo, poseen un elevado costo de adquisición.

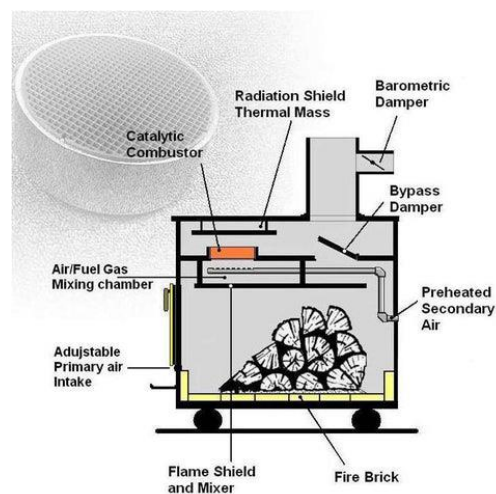


Ilustración 9 Diagrama de combustión catalítica. Fuente: Midwest hearth.

4. Diseño experimental

Los ensayos realizados en el marco de este trabajo de título fueron desarrollados en el Laboratorio de Energías Renovables de la USM, ubicado en la Sede José Miguel Carrera, Avenida Federico Santa María 6090, Viña del Mar. Para lo que se dispuso un espacio para el montaje de la estufa, túnel de dilución, tren de muestreo y demás equipos necesarios para el desarrollo de los experimentos.

Se realizarán ensayos de quema de leña de *Eucalyptus Globulus* considerando 4 categorías distintas, los cuales posteriormente serán comparados entre ellos. Se buscará realizar una cantidad de repeticiones de los ensayos superior o igual a 3 ($n = 3$) de cada categoría para tener una mayor representatividad de los casos.

Las categorías son las siguientes:

- Leña certificada con vermiculita (LC +VM): Estufa sin modificaciones y leña certificada, categoría correspondiente a línea base.
- Leña certificada con medios porosos (LC+MP): Estufa con medios porosos en el interior y leña certificada
- Leña lavada con vermiculita (LL + VM): Estufa sin modificaciones y leña sometida a proceso de lavado.
- Leña lavada con medios porosos (LL + MP): Estufa con medios porosos en el interior y leña sometida a proceso de lavado.

4.1 Leña

La madera utilizada para la realización de los experimentos es de la especie *Eucalyptus Globulus*, una de las más representativas de la zona centro-sur de Chile, esta debe encontrarse certificada, es decir, poseer un porcentaje de humedad en base seca inferior a 25 %, dado que en esta condición la leña calentará más y contaminará menos.

4.1.1 Pretratamiento de lavado de leña

Parte de la leña utilizada para los ensayos fue sometida a un proceso de lavado de leña con la finalidad de extraer compuestos químicos orgánicos e inorgánicos precursores de aerosoles atmosféricos formadores de material particulado.

El proceso de lavado tuvo de una duración de 4 semanas (28 días). Para esto se utilizó agua desionizada como disolvente en la cual fueron sumergidos los leños con una relación sólido: líquido de 1:4, el agua fue reemplazada todas las semanas (ensayo por ciclos) y cada 24 horas se somete a agitación manual, Oyarzo (2022).

Posterior al lavado, viene el proceso de secado de la leña el cual se puede realizar de manera natural o forzada, siendo un criterio para considerar la leña seca que la masa del leño sea un 10% menor a la masa del leño antes de ser lavado.

4.1.2 Composición elemental y poder calorífico de *Eucalyptus Globulus*

De acuerdo con Villablanca (2022), quien estudio las propiedades termo físicas de *Eucalyptus Globulus*, los poderes caloríficos superior e inferior de la leña lavada con la leña sin lavar son distintos, cuyos valores pueden ser observados en la tabla N° 5.

Tabla 5: Poderes caloríficos superior e inferior de leñas con y sin lavado Fuente: Elaboración Propia en base a Villablanca (2022).

Propiedad	Leña sin lavar	Leña lavada	Cambio
Poder calorífico inferior [kJ/kg]	17473,1 ± 2,5	16975,9 ± 297,1	-2,85 %
Poder calorífico superior [kJ/kg]	18984,8 ± 75,3	19066,4 ± 180,2	0,43 %

Además, conforme al Informe de Análisis N° QUI-055-20 del Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental la composición elemental de la madera de *Eucalyptus Globulus* utilizada en los ensayos es que se encuentra en la tabla N°6.

Tabla 6: Análisis elemental *Eucalyptus Globulus*, resultados en base recibida Fuente: Elaboración Propia en base Informe de Análisis N° QUI-055-20.

Análisis	Unidad de medición	CI 090
Carbono	[g C/100 g de muestra]	44,7±0,2
Hidrógeno	[g H/100 g de muestra]	6,0±0,1
Nitrógeno	[g N/100 g de muestra]	0,715±0,007
Oxígeno	[g O/100 g de muestra]	33,5±0,1
Azufre	[g S/100 g de muestra]	<0,44

4.2 Estufa Bosca Spirit 380

El aparato calefactor con el cual se realizarán los ensayos de línea base corresponde a la Estufa Bosca Spirit 380, esta es una combustión lenta de doble cámara, es decir, que posee dos zonas donde se produce combustión, la primera es donde se encuentra el combustible sólido, y la segunda es en la zona bajo el templador en la cual se queman los gases de combustión (monóxido de carbono y cadenas de hidrocarburos volátiles), lo cual permite aumentar la eficiencia térmica y una reducción de emisiones.



Ilustración 10: Esquema del sistema de doble combustión. Fuente: Bosca (2017)

Esta estufa posee tres entradas de aire principales a la cámara de combustión, del cenicero, aire primario y aire secundario. El aire del cenicero entra desde la parte inferior de la cámara de combustión y se utiliza principalmente para avivar el fuego y el encendido de la estufa. El aire primario entra desde la parte superior de la estufa y se dirige hacia el vidrio protector presente en la puerta de la estufa, para precalentar el aire y que se pueda limpiar el hollín del vidrio, una vez precalentado este aire baja por diferencias de densidad y provee de aire a la primera cámara de combustión, donde se encuentra la leña, es posible controlar la admisión de aire primario a través del regulador de tiro. El aire secundario entra a la cámara de combustión por el templador y a través los orificios de las paredes laterales, no posee regulación, la función del aire secundario es proveer de oxígeno a la segunda cámara de la estufa, donde son quemados los gases no quemados en la primera cámara.

A continuación, en la tabla N°7 se presentan las características y especificaciones técnicas de la estufa informadas por el fabricante en su ficha técnica y manual de uso.

Tabla 7: Características y especificaciones técnicas BOSCA Spirit 380. Fuente: Bosca (2017)

Potencia	10,8 [kW] – 9.888 [kcal/h]
Eficiencia	67,5%
Rango de Calefacción	Hasta 180 [m ²]
Dimensiones (alto x ancho x prof.)	84,2 x 54,6 x 56,5 [cm]
Peso	87,2 [kg]
Diámetro cañón	6”
Tiraje Calentador	12 [Pa]
Caudal de Humos	176,5 [g/s]
Temperatura humos	337 [°C]

4.2.1 Estufa prototipo de calefacción residencial

La estufa prototipo de calefacción residencial corresponde a la misma estufa Bosca Spirit 380 a la cual, en la zona superior de las paredes laterales interiores, fue reemplazada la vermiculita de esa área por bloques de medios porosos inertes de carburo de silicio. Los bloques de MPI quedan instalados sobre los orificios laterales de ingreso del aire secundario, con la finalidad de que los bloques queden fijos en esa posición y que no se corra el riesgo de que se caigan sobre las brasas se dispuso de una pletina de acero por cada lado las cuales van apernadas a las paredes laterales de la estufa y generan una sujeción “tipo prensa”



Ilustración 11: Incorporación de MPI en la estufa y sujeción “tipo prensa”. Fuente: Elaboración propia

Las características del medio poroso inerte utilizado en la estufa prototipo, fueron detalladas por Oyarzo (2022) las cuales se presentan en la tabla N°8

Tabla 8: Características del MPI utilizado en estufa prototipo Fuente: Elaboración propia, en base a Oyarzo (2022).:

Material	Porosidad	Densidad del poro	Espesor
Carburo de silicio (SiC)	80%	10 – 15 ppi	20 mm

La vermiculita y el carburo de silicio tienen en común poseer un bajo coeficiente de dilatación térmica y una excelente resistencia al calor, lo que los hace excelentes materiales para ser sometidos a condiciones extremas de temperatura. Sin embargo, una gran diferencia entre estos dos materiales es su conductividad térmica, donde la vermiculita actúa como un gran aislante y el carburo de silicio es un buen conductor de calor.

4.3 Túnel de dilución

El túnel de dilución es un equipo cuya principal función es mezclar los humos de la estufa con aire ambiente, reduciendo la concentración de los gases y material particulado, permitiendo así que la concentración de gases y material particulado se encuentren dentro del rango de medición de los equipos y no se saturen o tapen los filtros y sondas.

Otra importante función del túnel de dilución es permitir que el flujo muestreado sea isocinético, es decir que la velocidad aspirada por la sonda de muestreo sea igual a la velocidad en el interior de túnel, esto para que no exista separación mecánica de partículas, la cual podría incurrir en errores de muestreo.

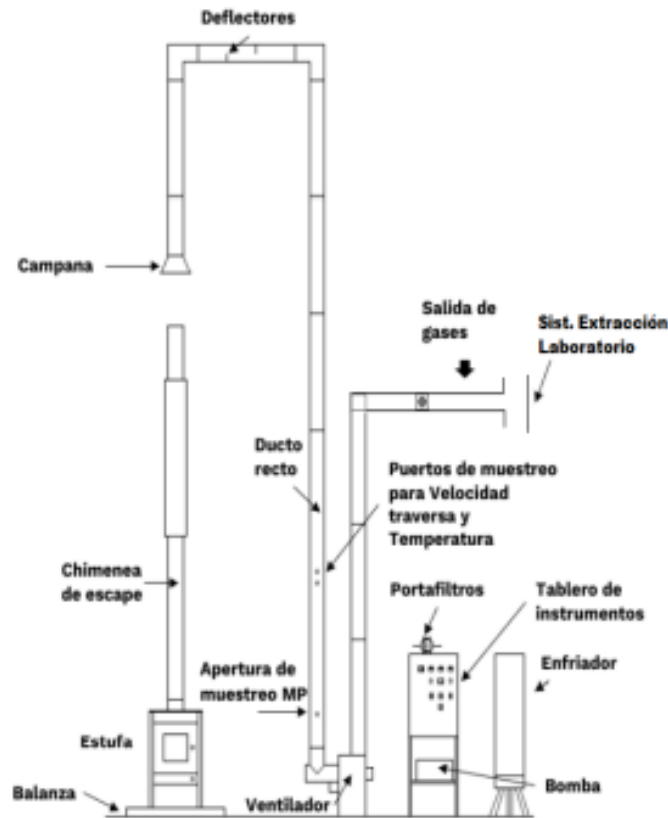


Ilustración 12: Diagrama de túnel de dilución. Fuente: Muñoz (2019)

Las partes del túnel de dilución son las siguientes

Chimenea de gases de escape: Corresponde al ducto primario de la estufa, es de acero inoxidable, este compuesto por tubos de 6" de diámetro, en la parte superior posee material aislante llegando a tener un diámetro exterior de 9", en esta zona la chimenea va a anclada a un sistema para sujetar y mantener en equilibrio a esta misma, el cual se trata de un anillo que está conectado a un cable al cual se le puede regular la tensión. Durante los ensayos se busca que la tensión del cable sea la menor posible con el fin de que todo el peso recaiga sobre la balanza. En la porción inferior de la chimenea esta posee 3 agujeros ubicados a la misma altura, uno para conectar la sonda del Testo 380 y medir gases directo de la salida de la estufa, otro para medir la presión estática en el ducto primario y otro donde va ubicada un termopar con la finalidad de medir la temperatura de salida de los gases. Conectado a la estufa, de acero inoxidable, con dos secciones una de 0,15 m de diámetro, aislada con relleno solidó hasta alcanzar los 0,23 m de diámetro, cubriendo gran parte del ducto. En una de las secciones de menor diámetro posee un

orificio, el cual cumple como función ser puerto de muestreo para la sonda de presión estática en el ducto primario

Campana: Recibe los gases provenientes de la chimenea y los mezcla con el aire ambiente, está fabricada de acero inoxidable posee un diámetro máximo 0,30 [m] y luego este se reduce a 6”.

Codos y deflectores: El túnel utiliza un total de 4 codos de acero inoxidable de 90° y 6”, los deflectores se encuentran en el interior del tubo superior horizontal, y tiene como finalidad mezclar correctamente el aire con los humos.

Ducto Recto: Tubo de acero inoxidable de 6” de diámetro y 2,74 [m] de largo, en este tubo se realiza el muestreo de los gases, temperaturas y velocidades del túnel de dilución. El ducto debe estar instalado a más de 1,2 [m] del segundo codo, en su parte superior posee dos orificios, el primero va un tubo de Pitot tipo S para medir la velocidad del flujo y el siguiente es para colocar una termocupla. 1,2 [m] aguas abajo se encuentran 4 agujeros ubicados a la misma altura cuya finalidad es permitir el ingreso de las sondas de muestreo al túnel, desde aquí se realizan las mediciones de black carbon, material particulado en línea, material particulado gravimétrico y análisis de gases.

Las sondas van dispuestas de manera tal que la succión de cada una no afecte a las adyacentes, todas tengan el espacio suficiente para realizar la medición de manera correcta y no interferir entre ellas, es por esto que los agujeros están dispuestos cada 90° y el orificio de la sonda debe quedar en el punto medio ente el centro de la circunferencia y su perímetro, tal como se muestra en la siguiente figura.

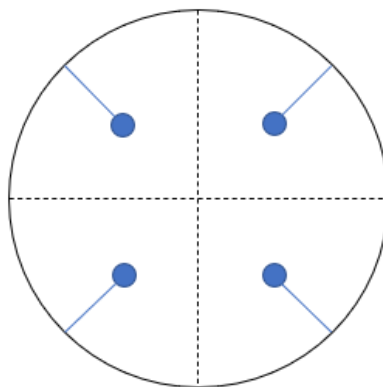


Ilustración 13: Diagrama de Montaje de Sondas dentro del Ducto. Fuente: Elaboración propia.

Ventilador: El ventilador debe poseer la potencia suficiente para ser capaz de hacer circular los gases de combustión por el túnel de dilución y llevarlos hasta la atmósfera. La velocidad del ventilador es regulada por una perilla en el tablero eléctrico.

Tablero eléctrico: Este equipo permite controlar y conocer los parámetros de operación dentro del túnel de dilución. Controla la velocidad del ventilador, mide la presión estática del ducto primario, las presiones en el tubo de Pitot, y mide además el flujo de gases de la bomba de vacío utilizada para medir el material particulado gravimétrico.

4.4 Sistemas de dilución y montaje en banco de pruebas

Dado que gran parte de los equipos utilizados para la medición de material particulado, black carbon y gases de combustión, han sido diseñados para ser utilizados en la medición de condiciones de carácter ambiental, y no para mediciones directas desde los ductos de escape de gases de combustión, ya que las concentraciones y temperaturas existentes en el ducto de escape son muy altas y sobrepasan el límite especificado por el fabricante, lo cual puede causar daño en los sensores y demasiada suciedad en el interior de los equipos.

Dado esto es que es necesario hacer uso de sistemas y equipos para la dilución de los humos. Solo Testo 380 es sometido a la exposición directa de los humos de escape, sin embargo, en su interior posee una dilución interna para sus sensores, los demás equipos poseen las siguientes diluciones.

- **Analizador de gases Testo 350XL:** Túnel de dilución (FD =6) x Dilución interna
- **Etalómetro Met One BC 1060:** Túnel de dilución (FD = 6) x Sistema de dilución doble ESS (FD = 72,25)
- **Espectrómetro láser de aerosoles GRIMM 11-D:** Túnel de dilución (FD = 6) x Sistema de dilución doble ESS (FD = 72,25) x Dilutor Capilar 1:100 (FD = 100) *

*: En algunos ensayos no se utilizó el dilutor capilar

A continuación, se presenta un esquema en el cual se muestra el Montaje en el banco de pruebas para los equipos y sus sistemas de dilución.

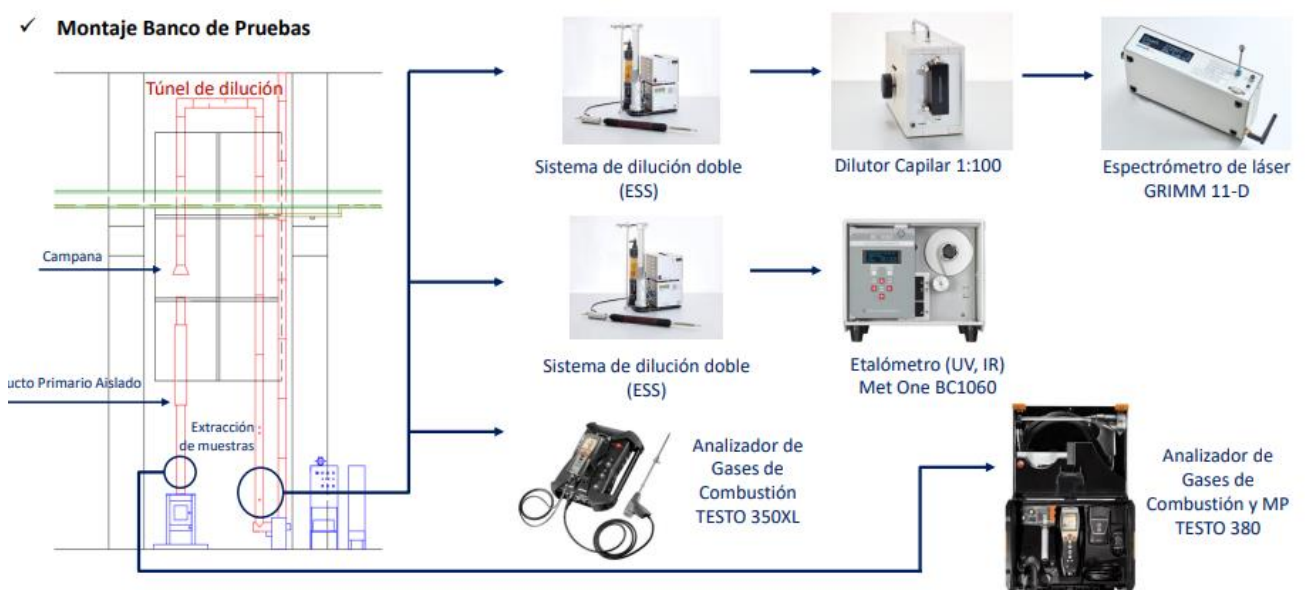


Ilustración 14: Diagrama de montaje en el banco de pruebas de los equipos de medición de gases. Fuente: GTS (2023).

4.5 Métodos y equipos de medición

4.5.1 Medición de temperaturas

Durante el desarrollo de las quemas se monitorean las temperaturas mediante 18 termopares tipo K ubicados en distintas zonas de la estufa y tren de muestreo. Los termopares están conectados a un módulo adquisidor de datos y un módulo de expansión de adquisidor de datos, ambos marca OMEGA. Debido a las altas temperaturas de la cámara de combustión y lo delicado del filamento de los termopares en el transcurso de las quemas no fue posible obtener la totalidad de los datos de temperatura.

A continuación, en la tabla N°9 están dadas las ubicaciones de los 18 termopares utilizados.

Tabla 9: Códigos y ubicación de los termopares instalados en la estufa y tren de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

PD1_A01	Espalda derecha
PD1_A02	Espalda izquierda
PD1_A03	Lateral superior derecho fondo
PD1_A04	Lateral superior derecho frente
PD1_A05	Lateral superior izquierdo fondo
PD1_A06	Lateral superior izquierdo frente
PD1_A07	Gas Interior hogar de combustión derecho
PD1_A08	Gas Interior hogar de combustión izquierdo
PD1_A09	Gas en el túnel de dilución
PD1_A10	Ambiente
PD1_A11	Aire primario Izquierdo
PD1_A12	Aire primario derecho
PD1_A13	Pared Exterior espalda
PD1_A14	Pared Exterior izquierda
PD1_A15	Pared Exterior derecha
PD1_A16	Tren de muestreo, Interior panel de control
PD1_A17	Interior Porta filtro
PD1_A18	Ducto Primario

En la ilustración N° 15 se muestra la ubicación de los termopares utilizados en la estufa.

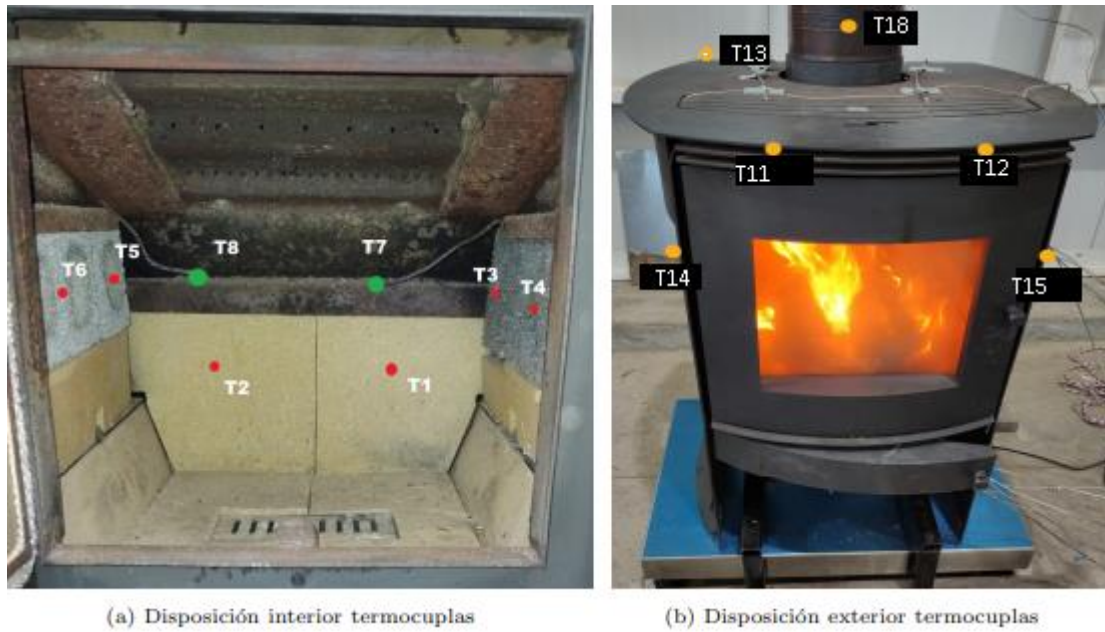


Ilustración 15: Ubicación de las termocuplas en la estufa. Fuente: Adaptación en base a Oyarzo (2022).

4.5.2 Espectrómetro láser de aerosoles GRIMM 11-D

Es un equipo, el cuál sirve para medir material particulado en tiempo real y gravimétrico dado que posee un filtro incorporado. Es capaz de medir concentraciones y contar partículas de los aerosoles estudiados.



Ilustración 16: Espectrómetro de láser GRIMM 11-D. Fuente: Durag (2023).

Sus especificaciones técnicas aparecen en la tabla N° 10.

Tabla 10: Especificaciones técnicas espectrómetro láser GRIMM 11-D. Fuente: Durag (2023).

<p>Parámetros Medidos</p>	<p>Fraciones de polvo de acuerdo con EN481 (inhalable, thoracic, respirable) TSP, PM10, PM4, PM2.5, PM1 Y PMCoarse</p>
----------------------------------	--

	Concentración por número y Distribución por tamaño
Masa de Polvo	0 – 100000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Rango de Tamaño de partículas	0.253 – 35.15 [μm]
Canales de Tamaño	31, equidistantes
Número de partículas	0 – 3000000 [p/L]
Resolución de Tiempo	6 [s] con 31 Canales 1 [s] con 16 Canales (0.253 - 2.982 [μm] o 2.982 - 35.15 [μm])
Flujo Volumétrico	1.2 [L/min], \pm 3% constante debido a su autorregulación, de acuerdo con ISO 21501-1; Corrección automática por altitud

4.5.3 Etalómetro MetOne BC1060

Este dispositivo sirve para medir concentraciones de carbono negro y UVPM en tiempo real. Para la medición utiliza dos LEDs con distinta frecuencia de onda una cercana al infrarrojo y otra ultravioleta, así poder distinguir entre las dos especies. La mínima frecuencia de muestreo es de 1 minuto y, cada cierto tiempo, cuando se satura y cambia el spot de la cinta esta aumenta a 2 minutos.



Ilustración 17: Etalómetro MetOne BC 1060. Fuente: MetOne(2023).

Sus especificaciones técnicas aparecen en la tabla N° 11.

Tabla 11: Especificaciones técnicas etalómetro MetOne BC 1000. Fuente: MetOne(2023).

Principio de Medición	Absorción Óptica de doble longitud de onda Cercano al Infrarrojo (880 nm LED) para carbono elemental
------------------------------	--

	Ultravioleta (370 nm LED para carbono elemental y carbono orgánico)
Rango de Medición	< 1/m3 a 100000 ng/m3 (efectivo)
Resolución	0,1 ng/m3
LDL (2σ)	<8ng/m3 con 1 minuto de tiempo de muestra <1ng/m3 con 1 hora de tiempo de muestra
Intervalo de muestreo	1, 5, 10, 15, 30 o 60 minutos
Flujo volumétrico	2 LPM
Cinta Filtro	Fibra de vidrio Reforzada
Temperatura Ambiente de Operación	-50 °C a +70 °C
Rango de humedad ambiente	HR de 0 a 90%, sin condensar
Peso	16 kg
Dimensiones	Alto:30,5 cm Ancho:35,6 cm Profundidad:36,8 cm

4.5.4 Analizador de gases Testo 350 XL

Este analizador de gases es capaz de medir concentraciones de O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, H₂S y C_xH_y en tiempo real a través de sus sensores. Cuenta con dilución incorporada lo que le permite medir gases en condiciones que superan sus parámetros, protegiendo los sensores.



Ilustración 18:Analizador de gases Testo 350. Fuente: Testo (2023).

Sus especificaciones técnicas aparecen en la tabla N° 12.

Tabla 12:Especificaciones técnicas analizador de gases Testo 350. Fuente: Testo (2023).

Temperatura de funcionamiento	5 a 45 [°C]
Presión máx.	PdC: 50 [mbar]
Depresión máx.	PdC: -300 [mbar]
Presión absoluta	Rango: 600 a 1150 [hPa]

	Exactitud: ± 10 [hPa] Resolución: 1 [hPa]
Medición de O₂	Rango: 0 hasta 25 % Vol. Exactitud: $\pm 0,8\%$ del f.e (0 hasta 25%) Resolución: 0,01% Vol. (0 hasta 25% Vol.)
Medición de CO (con compensación de H₂)	Rango: 0 hasta 10000 [ppm]. Exactitud: $\pm 5\%$ del v.m. (200 hasta 2000 [ppm]); $\pm 10\%$ del v.m. (2001 hasta 10000 [ppm]); ± 10 [ppm] (0 hasta 199 [ppm]) Resolución: 1 [ppm]

4.5.5 Analizador de gases y material particulado Testo 380

Este equipo de diseño más robusto que el Testo 350, es capaz de medir gases de combustión y también material particulado.



Ilustración 19: Analizador de gases y partículas finas testo380. Fuente: Testo (2023).

Sus especificaciones técnicas aparecen en la tabla N° 13.

Tabla 13: Especificaciones técnicas analizador de gases y partículas finas Testo 380. Fuente: Testo (2023).

Temperatura del gas de combustión	Max. +500°C
Calentamiento tubo de la sonda	Hasta 120 °C
Rango de medición	De 0 a 300 mg/m ³
Exactitud	Según VDI 4206-2
Resolución	0,1 mg/m ³
Peso	7,9 kg

4.5.6 Método CH – 5G (Material particulado gravimétrico)

Otra manera de medir material particulado es a través del método CH-5G, normativa nacional vigente utilizada para la certificación de artefactos a leña.

Este método se basa en que parte de los humos que pasan a través del túnel de dilución se aspiran de manera isocinética y se hacen pasar por dos filtros de cuarzo de masa conocida, durante el ensayo, el material particulado queda atrapado en los filtros, lo cual provoca que su masa aumente. Una vez finalizado el ensayo estos filtros son masados nuevamente y este cambio en la masa de los filtros, hace posible calcular la concentración de las emisiones de material particulado procedentes de la estufa.

A continuación en la ilustración N° 20 , se presenta un esquema del tren de muestreo, presentado en el método CH-5G.

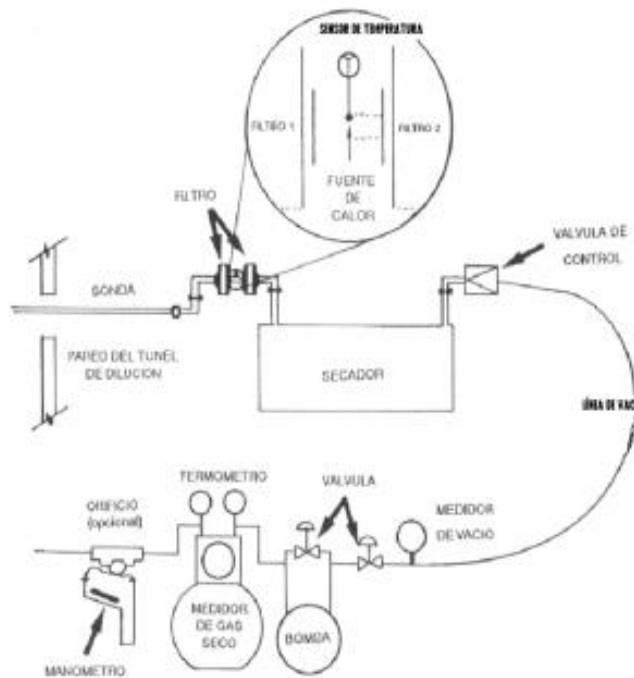


Ilustración 20: Esquema representativo del tren de muestreo, método CH-5G (Fuente: SEC (2012))

4.6 Cálculos relevantes para el análisis

4.6.1 Factores de emisión

Un factor de emisión corresponde a un valor representativo que busca relacionar la cantidad de contaminante emitido con una actividad asociada a la emisión del contaminante, lo cual se expresa generalmente en la masa del contaminante dividido una unidad de peso, volumen, tiempo, energía.

Para efectos del presente trabajo los factores de emisión de las especies estudiadas serán representados con la unidad [g/kg], es decir gramos de contaminante emitido/kilogramos de

combustible quemado. Utilizando la siguiente ecuación es posible calcular los factores de emisión.

$$FE_i = \frac{m_i}{m_f} = \frac{\dot{V}_a \int_{t_i}^{t_f} y_i dt}{m_f} \quad (1)$$

Donde:

- FE_i = Factor de emisión de la especie a estudiar.
- m_i = Masa emitida de la especie a estudiar.
- m_f = Masa del combustible utilizado en el ensayo.
- \dot{V}_a = Flujo de aire en el interior del túnel de dilución.
- t_i = Tiempo de inicio del ensayo.
- t_f = Tiempo de finalización del ensayo.
- y_i = Concentración (masa en volumen) de la especie a estudiar.

4.6.2 Tasa de quemado

El Método CH-28: “Determinación de material particulado y certificación y auditoria de calefactores a leña”, ISP (2013). Presenta en la ecuación 28-3 la manera en que se debe calcular la velocidad de quemado para la leña seca, esta es la siguiente:

$$BR = \frac{60 W_{wd}}{\theta} * \frac{100 - \%M_w}{100} \quad (2)$$

Donde:

- BR = Velocidad de quemado de leña seca (kg/h).
- W_{wd} = Masa total de madera quemada durante la corrida de mediciones (kg).
- θ = Tiempo total de la corrida de medición (min).
- $\%M_w$ = Humedad promedio de la carga de combustible de ensayo, base húmeda (%).

Además, el mismo método en la ecuación 28-1 define la manera para calcular el contenido de humedad del combustible, en base húmeda. Hay que recordar que el Xilohigrómetro entrega en valor de humedad de la leña en base seca.

La ecuación es la siguiente:

$$\%M_w = \frac{100(\%M_d)}{100 + \%M_d} \quad (3)$$

Donde:

- $\%M_w$ = Humedad promedio en la carga combustible de ensayo, base húmeda (%).
- $\%M_d$ = Contenido de humedad del combustible, base seca (%).

4.6.3 Eficiencia y potencia térmica total

Para el cálculo de la eficiencia y potencia térmica nominal se hará referencia a la norma NCh. 3173.Of2009 “Estufas que utilizan combustibles sólidos – Requisitos y métodos de ensayo” es la

normativa utilizada para la certificación de las estufas a leña con una potencia térmica nominal menor o igual a 25 kW.

En este documento viene una manera para poder calcular la eficiencia térmica de la estufa, la potencia térmica total y el caudal másico de los humos. Para el cálculo de estos valores es necesario conocer previamente; la composición elemental de la leña, la temperatura promedio en el ensayo de salida de los gases en el ducto primario, la concentración promedio del ensayo de CO y la concentración promedio del ensayo de CO₂ o de O₂ a la salida de la estufa. Para efectos de este trabajo se utilizarán las concentraciones de CO y CO₂.

La eficiencia térmica es el valor que relaciona cuanto calor útil fue aprovechado para calefaccionar respecto a la energía requerida por la estufa. La ecuación D.3 de la norma, muestra como esta se calcula:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (4)$$

Donde:

- η = Eficiencia térmica (%).
- q_a = Pérdida de calor sensible en los humos (%).
- q_b = Pérdida de calor latente en los humos (%).
- q_r = Pérdida de calor debidas a los sólidos no quemados en los residuos (%).

La Potencia térmica total corresponde a la potencia que posee la estufa en las condiciones de admisión de aire utilizadas en el ensayo. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{(\eta * B * H_u)}{(100 * 3600)} \quad (5)$$

Donde:

- P = Potencia térmica total (kW).
- B = Masa de combustible de ensayo quemada cada hora (kg/h).
- H_u = Poder calorífico inferior del combustible del ensayo (kJ/kg).

El caudal másico de los humos el cual corresponde a al flujo másico que salen de los gases, se determina con la siguiente formula:

$$m = \left[\frac{B * (1,3) * (C - C_r)}{(0,536) * (CO_2 + CO)} + \frac{(9 H + W)}{100} \right] * 3,6 \quad (6)$$

Donde:

- m = Caudal másico de los humos (g/s).
- B = Masa de combustible de ensayo quemada cada hora (kg/h).
- C = Contenido en carbono del combustible de ensayo (% en masa).

- C_r = Contenido de carbono en los residuos respecto a la cantidad de combustible de ensayo quemada (% en masa).
- CO_2 = Contenido de dióxido de carbono en los humos secos (% en volumen).
- CO = Contenido de monóxido de carbono en los humos secos (% en volumen).
- H = Contenido de hidrogeno del combustible de ensayo (% en masa).
- W = Contenido de humedad del combustible de ensayo (% en masa).

5. Procedimiento experimental

Para asegurar que las pruebas realizadas sean comparables entre sí es necesario cumplir con ciertas consideraciones y criterios que permitan que esto se pueda realizar. Motivo por lo cual se definen protocolos que se deben cumplir a fin de que una prueba sea realizada de manera exitosa. Unas de las maneras que se utiliza para estandarizar los experimentos fue el uso de la “Ficha para ensayos de combustión”, en esta ficha se registraron las variables más importantes de cada ensayo (horas de inicio y termino, masa de las cargas, configuración), además de tener un checklist de actividades para antes, durante y después del ensayo.

5.1 Consideraciones iniciales

5.1.1 Calefactor y ducto primario

Antes de cada ensayo se limpia el interior de la estufa para que se encuentre libre de cenizas, también se limpia el templador, cenicero y el vidrio frontal de la estufa. Se aspiran los medios porosos y la vermiculita. Además, es importante verificar que el ducto primario se encuentre centrado respecto al túnel de dilución, el agujero por donde ingresa la sonda del Testo 380 debe estar sellada.

5.1.2 Leña

La leña utilizada durante los ensayos debe ser seca, es decir su porcentaje de humedad fue siempre menor a 25%. Para realizar cada prueba son utilizadas tres cargas de leña, de encendido, de pre-ensayo y de ensayo. Las cuales deben estar correctamente caracterizadas, es decir, conocer la masa y humedad en base seca de cada leño, cada carga tiene características distintas y cumplen distintas funciones, que serán explicadas a continuación

- Carga de encendido: La función de esta carga es generar una cama de brasas para que una vez ingresados los leños se enciendan de forma homogénea. La masa de esta carga debe ser entre un 50% y 80% de la masa de la carga de ensayo. Para los ensayos se utilizó aproximadamente un 65% de la carga de ensayo. Se compone de 60 [gr] de cartón y lo restante corresponde a astillas delgadas y gruesas.
- Carga de pre-ensayo: La función de esta carga es lograr que el calefactor se estabilice, alcance las temperaturas de operación normales de la estufa y ajustar la velocidad del extractor en el túnel de dilución. La masa de esta carga debe ser similar a la de la carga de encendido.
- Carga de ensayo: Cuando esta carga ingresa a la estufa comienza el ensayo hasta que la masa de la balanza llega a 0 [Kg]. La masa de esta carga depende del volumen del hogar del calefactor y está definido su cálculo en el Método CH-5G. Para el caso de la Bosca

Spirit 380 esta masa debe estar entre 3,350 [kg] y 4,100 [kg], durante los ensayos realizados en laboratorio esta masa fue siempre lo más cercana a 3,600 [kg].

5.1.3 Túnel de dilución y equipos de medición.

Para asegurar la calidad de los ensayos es necesario que todos los equipos de medición se encuentren funcionando y sean limpiados previo al ensayo. Para realizar las limpiezas de los equipos se utiliza un compresor para el soplado de componentes y un baño supersónico para la limpieza del pre-filtro del Testo 350.

Es necesario soplar el tubo de Pitot del túnel de dilución y sus mangueras, sondas del ESS, sonda Testo 350, sonda Testo 380. Además, según el estado de los filtros es necesario revisar, y según en el caso reemplazar en los equipos Testo 350, Testo 380 y Grimm-11D.

También es necesario verificar el estado de los termopares, para lo cual hay que conectar el adquisidor de datos al computador, iniciar el programa y verificar que los termopares indiquen correctamente la temperatura ambiente y respondan a los cambios de temperatura.

Posteriormente, una vez cerciorado que lo anterior se encuentre en orden y listo para operar es necesario encender la balanza, verificar que este conectada al computador y proceder a posar la estufa sobre esta, luego, liberar la tensión de los tensores que sujetan el ducto primario para que el máximo peso del calefactor quede depositado sobre la balanza. Finalmente tarar la balanza.

5.2 Encendido

Cuando la balanza se encuentra marcando 0 [kg] y se encuentra registrando datos al igual que las termocuplas, ya es posible ingresar la carga de encendido en la estufa, de la manera en que se muestra en la imagen.

Posteriormente, hay que configurar el panel de control en el modo L1, encender el extractor a su máxima velocidad, posicionar el regulador de tiro en la posición E (encendido), la puerta del cenicero abierta y con la ayuda de un soplete proceder a encender el fuego. El fuego se deja durante 5 minutos en la configuración establecida anteriormente, transcurrido este tiempo el regulador de tiro se coloca en la posición – (mínima admisión de aire), y la puerta del cenicero abierta, después de tres minutos la puerta del cenicero se cierra. Cuando la balanza registra entre un 25 a 20 % de la masa de ensayo, llega el momento del pre-ensayo.

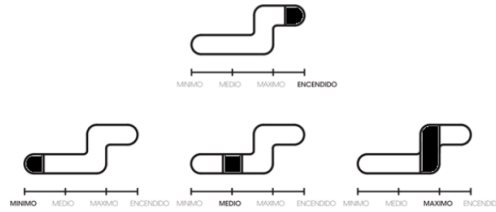


Ilustración 21: Niveles del regulador de tiro, Fuente: Bosca (2017)

5.3 Pre-ensayo

El procedimiento para cargar el combustible del pre- ensayo es el siguiente: primero hay que atizar el combustible que queda en la cámara de combustión y tarar la balanza, luego el regulador de tiro en posición + (máxima admisión de aire) se colocan los leños en la cámara de combustión, se cierra la puerta y transcurrido 5 min. El regulador de tiro vuelve a la posición menos – y se cierra la cámara de combustión.

Esperar unos minutos a que se establezca la llama y la presión estática del ducto primario, luego, cada cierto minuto hay que disminuir la velocidad del extractor para que la velocidad de los humos dentro del túnel de dilución sea estable y similar a la de otros ensayos.

Minutos antes de que termine el pre- ensayo hay que preparar los equipos de medición para su uso, colocar las sondas en el ducto primario y túnel de dilución, y comenzar el registro de los equipos, y cuando la masa registrada en la balanza es entre 20% y 25% de la masa del ensayo, finaliza en pre-ensayo.

5.4 Ensayo

Para ingresar la carga de ensayo a la cámara de combustión primero hay que configurar el panel de control en modo L2, posicionar el regulador de tiro en la posición +, la puerta del cenicero abierta, atizar, tarar la balanza, incorporar los leños y cerrar la puerta. Transcurridos 5 min. Del ensayo hay que cerrar la puerta del cenicero y posicionar el regulador de tiro en – (mínima admisión de aire). Durante esta etapa hay que estar continuamente verificando que los equipos no presenten errores y que la velocidad de flujo dentro del túnel de dilución sea estable, en caso de sufrir variaciones se debe corregir variando la velocidad del extractor.

El registro de las mediciones del ensayo finalizara en el momento en que se haya consumido toda la masa del ensayo es decir cuando la balanza alcanza 0 [kg]. Luego hay que desconectar los equipos y esperar a que el combustible se consuma. Después hay izar la estufa y tensar los cables del ducto primario. Finalmente nos queda guardar registro de datos, de los equipos de medición continua: GRIMM, MetOne, Testo 350 y Testo 380. Así mismo también hay que guardar registro de las temperaturas y masas, completar fichas de registro de ensayo (bitácoras) y realizar el registro de condiciones ambientales finales.

5.5 Post-ensayo

Al finalizar el ensayo se deberían obtener los siguientes archivos resultantes del experimento; planilla de cálculo método CH-5G, registros panel de control pre-ensayo (M.P. gravimétrico), registro de temperaturas (T1 a T18), registro de masa en balanza, registro datos GRIMM 11-D, registro datos MetOne BC-1060, registro datos Testo 380, registro datos Testo 350 y la ficha de ensayo (bitácora). Además, cuando ya se encuentren frías las cenizas, al momento de limpiar la estufa, es importante medir la masa de cenizas que quedaron en la estufa del ensayo. En base a esta información se obtendrán resultados, como los factores de emisión y eficiencias, para su posterior análisis.

6. Resultados experimentales

6.1 Resumen de los ensayos realizados

Durante la etapa de ensayos experimentales fueron realizados un total de 23 ensayos, de los cuales 17 resultaron ser operacionalmente consistentes y se logró obtener resultados, el resto de los ensayos fueron descartados, debido que, algunos fueron para realizar ajustes dentro de la metodología, existieron errores procedimentales o no se logró realizar la toma de datos con ninguno de los equipos.

De los 17 ensayos consistentes, 5 corresponden a la categoría leña certificada con vermiculita (LC+VM), 6 a leña certificada con medios porosos inertes (LC+MP), 3 a leño limpio con medios porosos inertes (LL+MP) y los 3 restantes a leño limpio con vermiculita (LL+VM).

En las tablas N° 14 – 15 – 16 y 17 se detallan la masa, humedad, duración del ensayo y tasa de quemado, clasificadas en cada una de las cuatro categorías. Además, fue calculada la media, desviación estándar y coeficiente de variación entre las configuraciones estudiadas, lo cual es útil para verificar que los ensayos sean comparables entre ellos.

Tabla 14:Detalle de ensayos realizados en la categoría leña certificada con vermiculita (LC+VM). Fuente: Elaboración propia.

	Masa [kg]	Humedad Ensayo [%]	Duración [s]	Tasa de quemado (CH-28) [kg/h]
QEU4	3,658	18,6	3780	2,94
QEU5	3,682	16,5	2520	4,52
QEU6	3,658	17,6	3000	3,73
QEU7	3,534	18,6	3240	3,31
QEU20	3,688	12,8	2520	4,67
Media	3,644	16,8	3012	3,83
DS	0,1	2,2	474,6	0,7
CV	1,5%	12,8%	15,8%	17,5%

Tabla 15:Detalle de ensayos realizados en la categoría leña certificada con medios porosos (LC+MP). Fuente: Elaboración propia.

	Masa [kg]	Humedad Ensayo [%]	Duración [s]	Tasa de quemado (CH-28) [kg/h]
QEU10	3,608	15,2	2820	4,00
QEU11	3,629	16,8	3540	3,16
QEU13	3,681	19,7	3480	3,18

QEU14	3,637	16,8	2640	4,25
QEU15	3,559	16,0	2700	4,09
QEU16	3,590	14,2	3720	3,04
Media	3,617	16,5	3150	3,62
DS	0,0	1,7	439,2	0,5
CV	1,1%	10,4%	13,9%	13,8%

Tabla 16:Detalle de ensayos realizados en la categoría leña lavada con medios porosos (LL+MP). Fuente: Elaboración propia.

	Masa [kg]	Humedad Ensayo [%]	Duración [s]	Tasa de quemado (CH-28) [kg/h]
QEU17	3,596	15,0	3000	3,75
QEU18	3,656	13,9	2580	4,48
QEU19	3,657	11,7	2580	4,57
Media	3,636	13,5	2720	4,27
DS	0,0	1,4	198,0	0,4
CV	0,8%	10,1%	7,3%	8,6%

Tabla 17:Detalle de ensayos realizados en la categoría leña lavada con vermiculita (LL+VM). Fuente: Elaboración propia.

	Masa [kg]	Humedad Ensayo [%]	Duración [s]	Tasa de quemado (CH-28) [kg/h]
QEU21	3,696	11,3	2280	5,24
QEU22	3,685	11,1	2700	4,42
QEU23	3,652	12,0	3000	3,91
Media	3,678	11,5	2660	4,53
DS	0,0	0,4	295,3	0,5
CV	0,5%	3,4%	11,1%	12,1%

A modo de resumen los valores promedios para cada categoría son los presentados en la tabla N° 18.

Tabla 18:Resumen de valores promedios de los ensayos realizados según cada categoría. Fuente: Elaboración propia.

	Masa [kg]	Humedad Ensayo [%]	Duración [s]	Tasa de quemado (CH-28) [kg/h]
LC+VM	3,644	16,8	3012	3,83

LC+MP	3,617	16,5	3150	3,62
LL+VM	3,678	11,5	2660	4,53
LL+MP	3,636	13,5	2720	4,27

Se logra observar que existió una baja variabilidad entre las masas de las distintas cargas de los ensayos ($CV = 1,2 \%$), en cuanto al porcentaje de humedad de los leños utilizados, se encontró entre $11,1\% - 18,6\%$ ($CV = 17,5 \%$), si bien, este coeficiente de variación resultó ser más alto, toda la leña utilizada en los ensayos posee una humedad inferior a 25% , requisito necesario en Chile para decir que se trata de una leña seca y certificada, según la norma NCh. 2907.

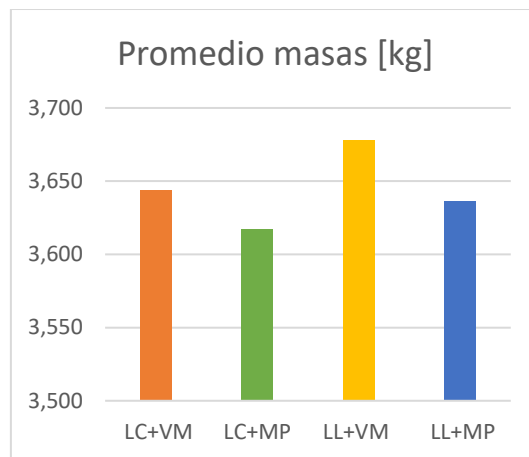


Ilustración 22: Promedio de masas por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

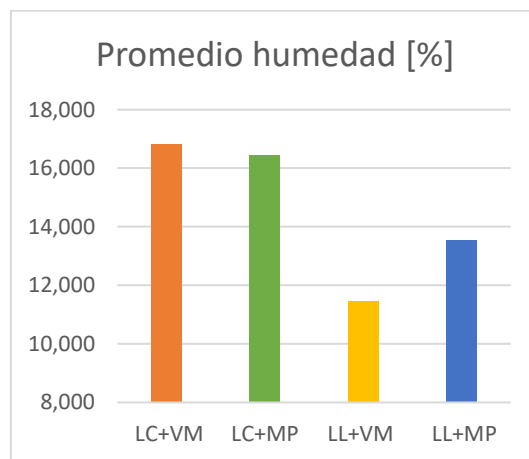


Ilustración 23: Promedio de humedad de la leña por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la duración de los ensayos el tiempo promedio resultó ser mayor en la categoría LC + MP (3150 [s]) y el menor tiempo promedio se obtuvo en la categoría de LL + VM (2660 [s]), estos resultados resultan ser inversos a la tasa de quemado [kg/h], en la cual una tasa de quemado mayor representa que se quema una mayor cantidad de combustible el mismo lapso de tiempo. Las tasas de quemado de menor a mayor, según su categoría son las siguientes; LC+MP (3,62 [kg/h]), LC+VM (3,83 [kg/h]), LL+MP (4,27 [kg/h]) y LL+VM (4,53 [kg/h]).

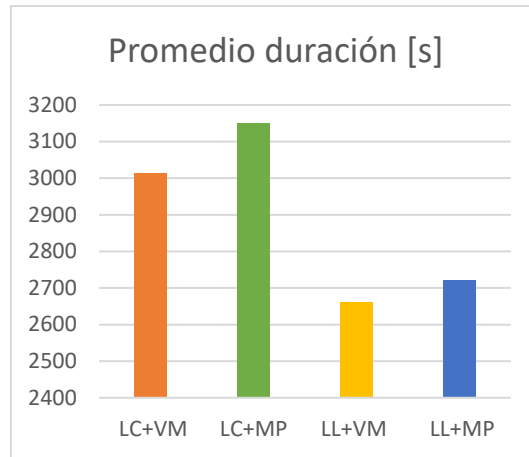


Ilustración 24: Promedio de duración del ensayo por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

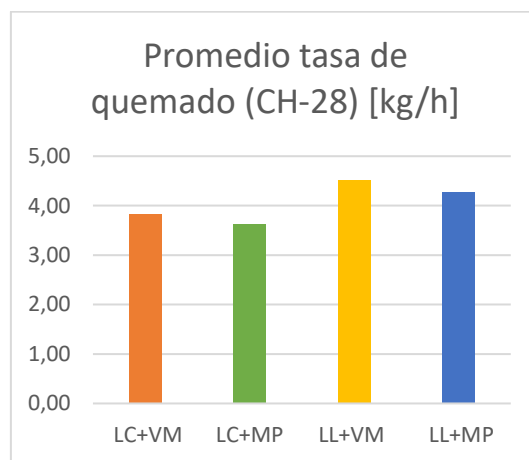


Ilustración 25: Promedio de tasa de quemado por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Temperaturas

Las temperaturas registradas durante las fases de ensayo, de los 18 termopares, fueron analizadas de manera que estas puedan ser comparables entre sí, por lo cual estos datos fueron estudiados hasta los 2150 [s] de ensayo, ya que es un tiempo que todas las quemas lograba durar y en este es posible observar las distintas etapas de la combustión.

En la ilustración N° 26 se observa el promedio de las temperaturas interiores de la estufa hasta los 2150 [s], clasificadas por la ubicación dentro de la estufa, de todas las quemas en las que fue posible medir temperatura.

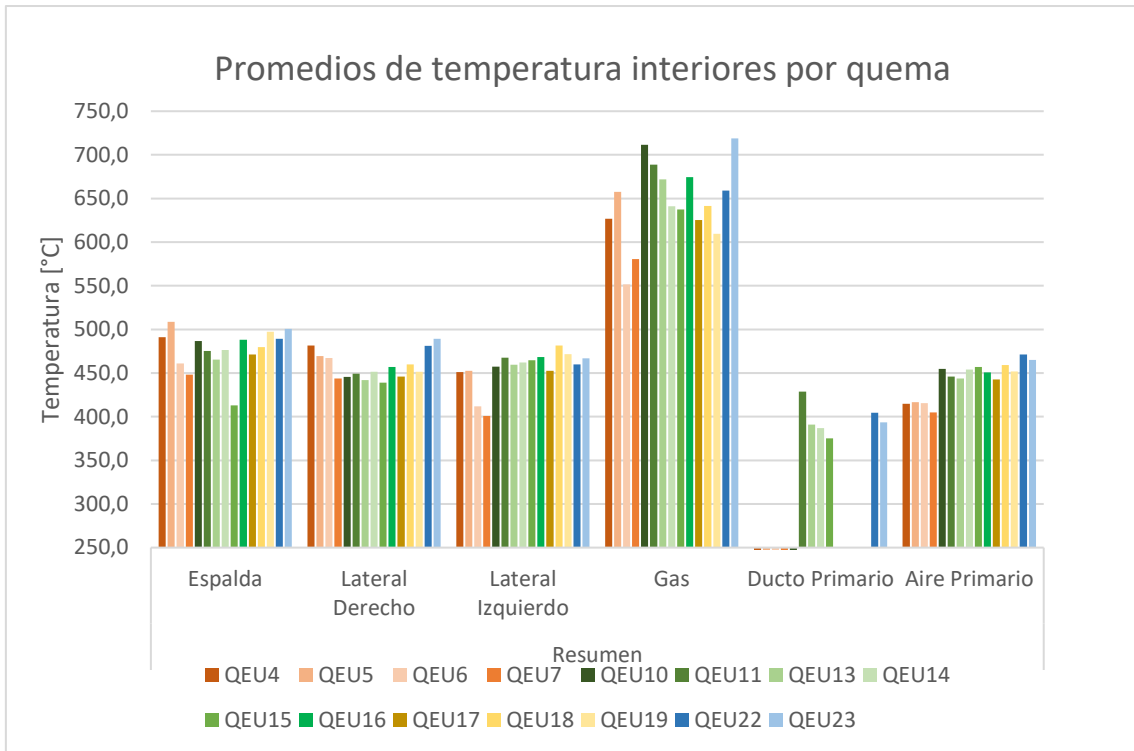


Ilustración 26: Temperaturas interiores promedio de cada quema de acuerdo con el sector de la estufa. Fuente: Elaboración propia.

La ilustración N° 27 muestra los promedios de temperatura agrupados por cada categoría:

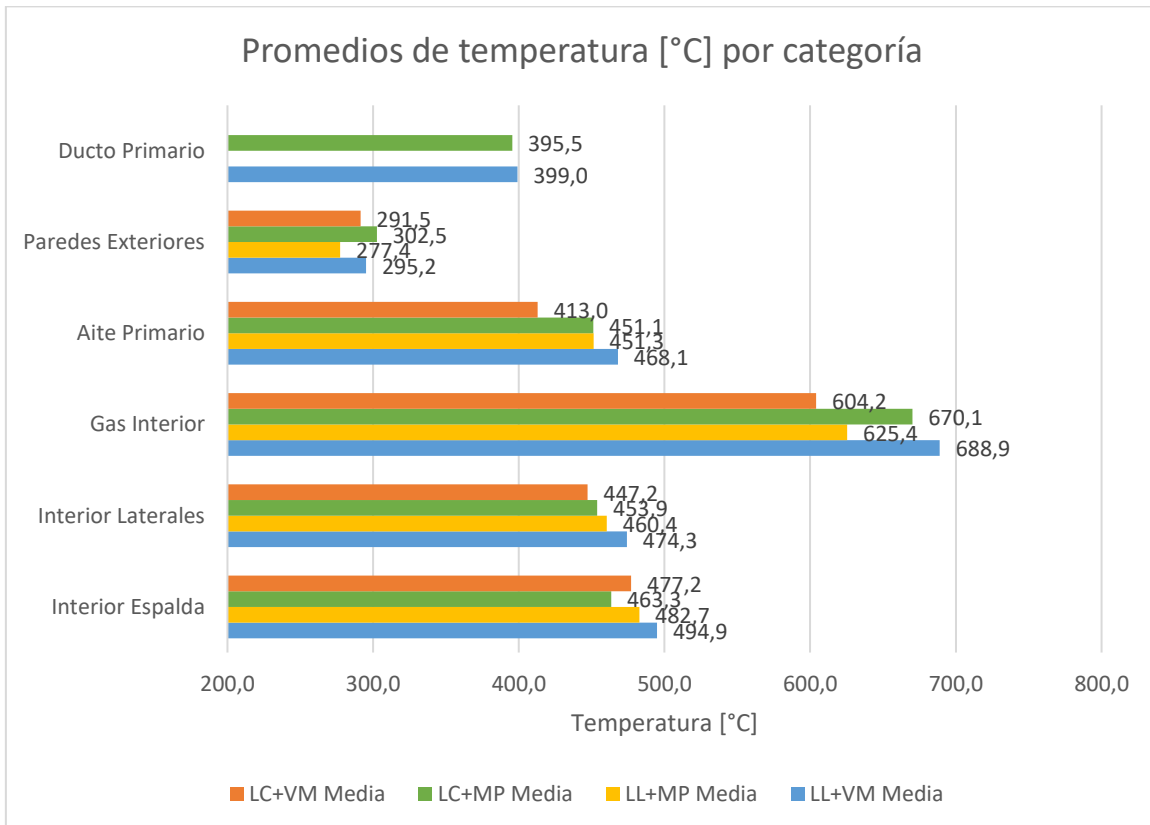


Ilustración 27: Temperaturas promedios por categoría de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados presentados en las gráficas, no es posible observar tendencias significativas, positivas o negativas, entre las distintas categorías, ni una tendencia clara en que si la adición de medio poroso o el cambio de combustible por leña lavada modifique las temperaturas del calefactor. Lo cual puede estar dado por el desgaste térmico sufrido por las termocuplas, descalibración de estas mismas y las variaciones producidas por las distintas temperaturas ambientales de los ensayos.

6.3 Material Particulado

Se calcularon factores de emisión de material particulado de todas las quemas en que se logró registrar datos, posteriormente, fueron descartadas las mediciones anómalas, quedando con 3 quemas de cada categoría a excepción de LL+VM en la que solo fue posible obtener 2 mediciones. Otro aspecto en el que hay que prestar atención es que desde la QEU4 a la QEU11 se utilizó un factor de dilución de 43350 [-] y desde la QEU13 en adelante se utilizó un FD de 433,5 [-].

En la ilustración N°28 se observa la variación en el tiempo de concentración las partículas sólidas totales para 4 quemas distintas, cada una representante de cada categoría.

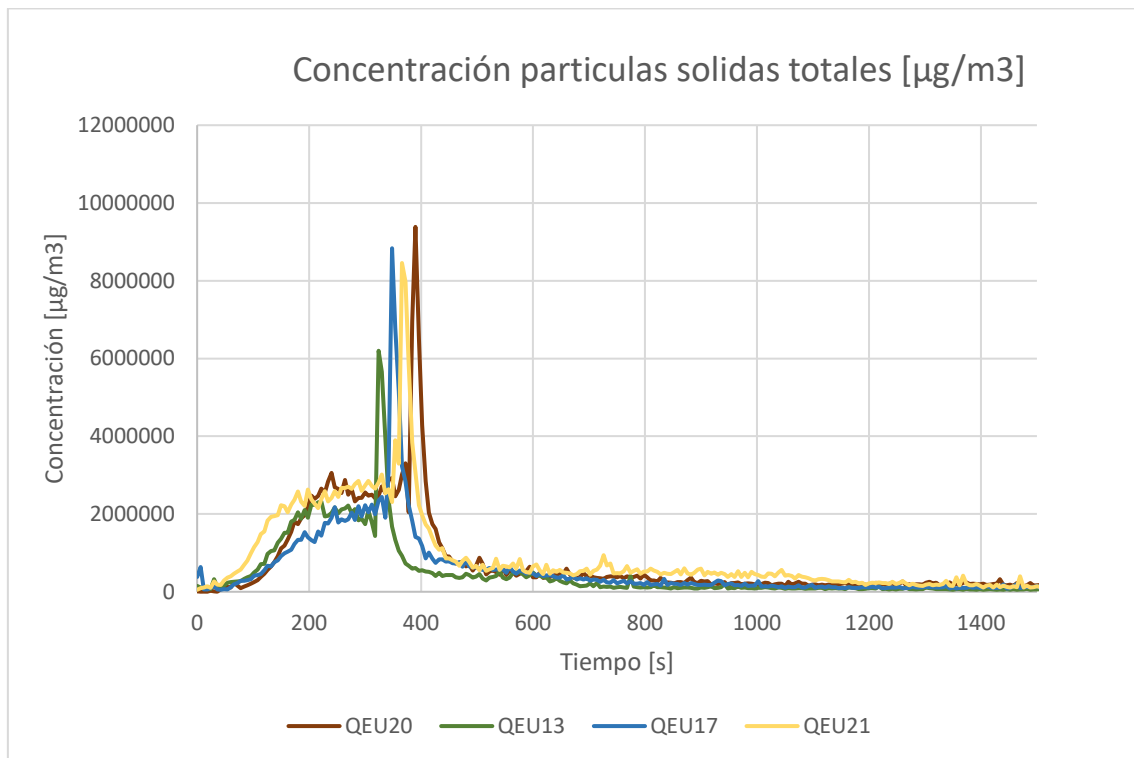


Ilustración 28: Variación en el tiempo de la concentración de material particulado TSP. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar que entre los 0 [s] y 300 [s] se encuentra en la fase de encendido del combustible, posteriormente se registra un peak de la concentración, en este momento es cuando se cierran las entradas de aire primario y del cenicero, posteriormente las concentraciones comienzan a descender y se estabilizan durante todo el tiempo restante de ensayo. Lo anterior

ocurre debido que en un principio se encuentra un gran volumen de aire ingresando a la estufa, dando lugar a una mayor cantidad de reacciones de combustión. Posteriormente al obstruir el ingreso del aire, se empobrece la mezcla y el gas presente dentro de la cámara de combustión no se oxida por completo, dando lugar a un peak. Posteriormente las emisiones se estabilizan dado que la cantidad de gases producidos por la leña están relacionados con la cantidad de aire que entra a la estufa.

Los factores de emisión calculados para cada tamaño de partícula son los que se observan en la ilustración N° 29.

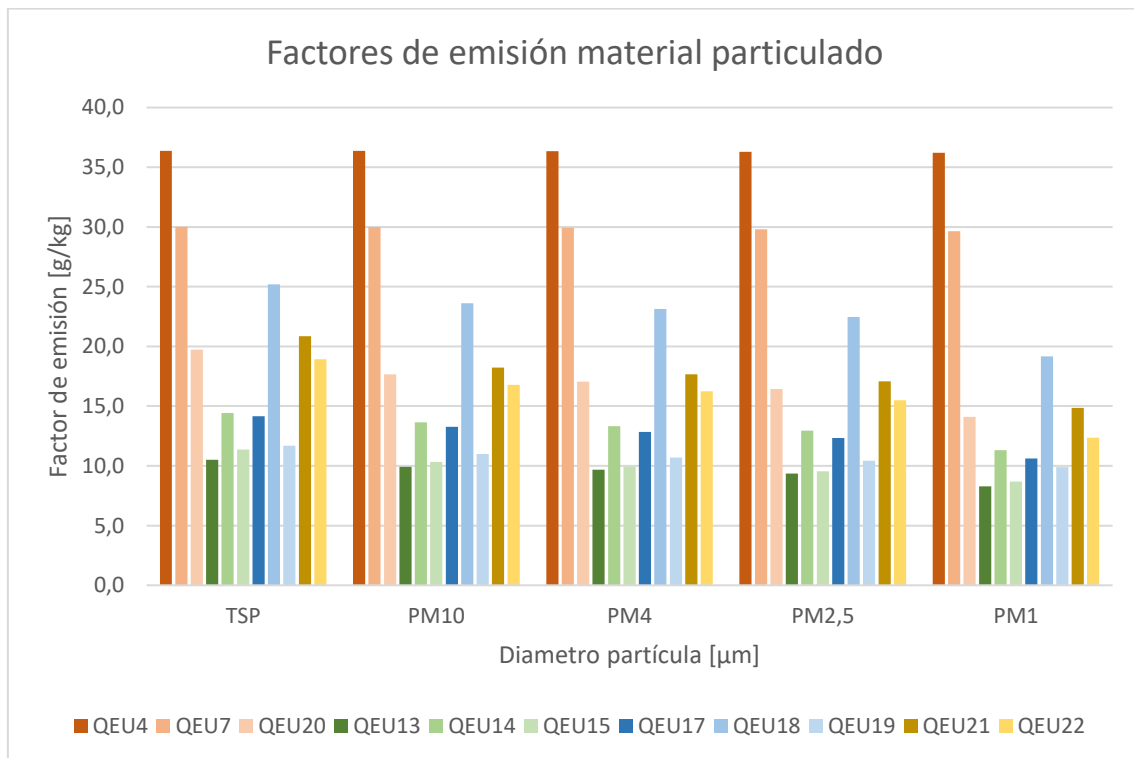


Ilustración 29: Factores de emisión de material particulado para distintos diámetros de partícula. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente desde estos factores de emisión se les calculó la media, desviación estándar y coeficiente de variación, para obtener valores generales respecto a la emisión de material particulado, cuyo gráfico se puede observar en la ilustración N°30.

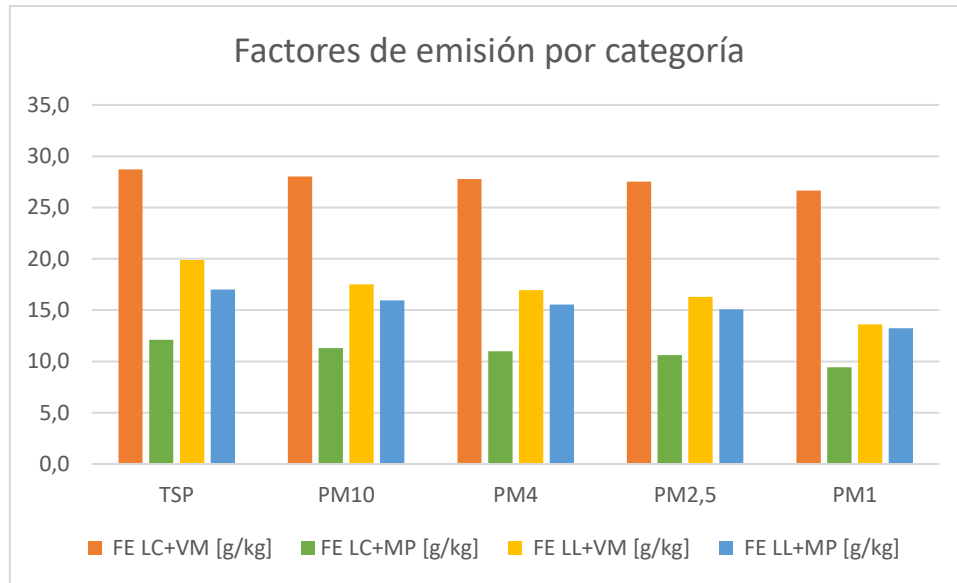


Ilustración 30: Factores de emisión promedios según categoría de ensayo y diámetro. Fuente: Elaboración propia.

Las tablas de los valores promedio y su coeficiente de variación que dan origen a la gráfica, se encuentran a continuación en las tablas N° 19 y 20.

Tabla 19: Valores de factores de emisión promedio según categoría y diámetro. Fuente: Elaboración propia.

	FE LC+VM [g/Kg]	FE LC+MP [g/Kg]	FE LL+VM [g/Kg]	FE LL+MP [g/Kg]
TSP	28,7	12,1	19,9	17,0
PM10	28,0	11,3	17,5	16,0
PM4	27,8	11,0	17,0	15,6
PM2,5	27,5	10,6	16,3	15,1
PM1	26,7	9,4	13,6	13,2

Tabla 20: Valores del coeficiente de variación para los valores promedios de factores de emisión. Fuente: Elaboración propia.

	CV LC+VM	CV LC+MP	CV LL+MP	CV LL+VM
TSP	23,9%	13,8%	34,6%	4,8%
PM10	27,7%	14,8%	34,4%	4,1%
PM4	28,9%	15,2%	34,9%	4,2%
PM2,5	30,0%	15,5%	35,0%	4,8%
PM1	34,8%	14,3%	31,9%	9,2%

En la ilustración N° 31 se puede observar la reducción de emisión de material particulado, respecto a la categoría de LC+VM, la cual representa a la línea base.

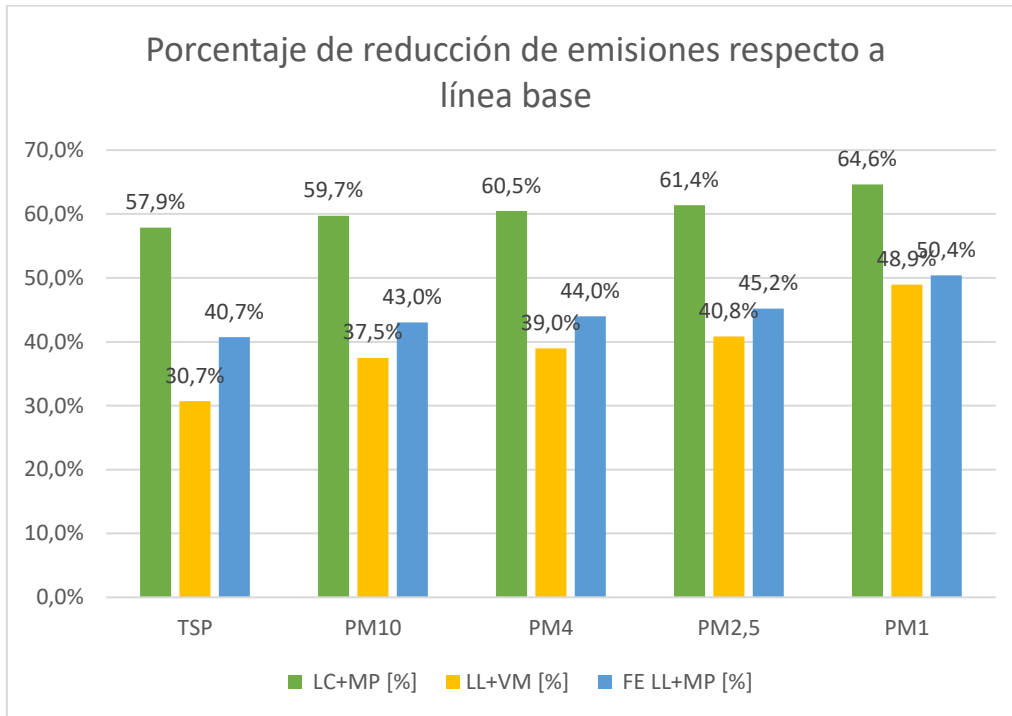


Ilustración 31: Porcentaje de reducción de factores de emisión respecto a línea base, según categoría. Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico todas las categorías provocan una reducción en las emisiones de material particulado, siendo la configuración más efectiva la leña certificada con medios porosos inertes, la cual provoca una reducción del 57,9 % de TSP emitido, respecto a la línea base.

6.4 Black carbon y UVPM

Con respecto a las mediciones de black carbon (BC) y material particulado que absorbe radiación UV (UVPM), fue posible realizar registros en todos los ensayos a excepción de la QEU20 de la categoría leña certificada con vermiculita. La dificultad presente en el registro de estas especies es que el Etalómetro utilizado realizaba mediciones cada un minuto, de vez en cuando el “spot” se llenaba de partículas, motivo por el cual el equipo pausaba el registro durante 3 minutos para cambiar de “spot” y limpiar la cámara óptica. Dado lo anterior cada vez que pasaba esto se perdía el registro de dos muestras.

En la tabla N° 21 es posible revisar los factores de emisión de cada ensayo y la cantidad de datos perdidos por ensayo.

Tabla 21: Tabla resumen con factores de emisión, cantidad de datos y cantidad de datos perdidos. Fuente: Elaboración propia.

		UVPM [g/kg]	BC [g/kg]	Total datos	Datos perdidos	Perdida de datos
LC + VM	QEU4	1,9	2,3	64	6	9,4%
	QEU5	2,6	3,0	43	8	18,6%
	QEU6	2,1	1,8	51	6	11,8%
	QEU7	1,7	1,4	55	4	7,3%
LC + MP	QEU10	2,9	2,6	48	6	12,5%
	QEU11	2,1	1,5	60	6	10,0%
	QEU13	1,9	1,7	59	6	10,2%
	QEU14	2,5	2,1	45	7	15,6%
	QEU15	1,8	1,6	46	4	8,7%
	QEU16	2,5	2,6	63	4	6,3%
LL + MP	QEU17	2,2	2,2	51	6	11,8%
	QEU18	4,4	4,1	44	8	18,2%
	QEU19	3,3	3,0	44	8	18,2%
LL + VM	QEU21	3,2	3,8	39	10	25,6%
	QEU22	2,7	3,0	46	6	13,0%
	QEU23	4,5	4,4	51	6	11,8%

En la ilustración N° 32 es posible observar los factores de emisión para UVPM, mientras que en la ilustración N° 33 es posible revisar los del BC.

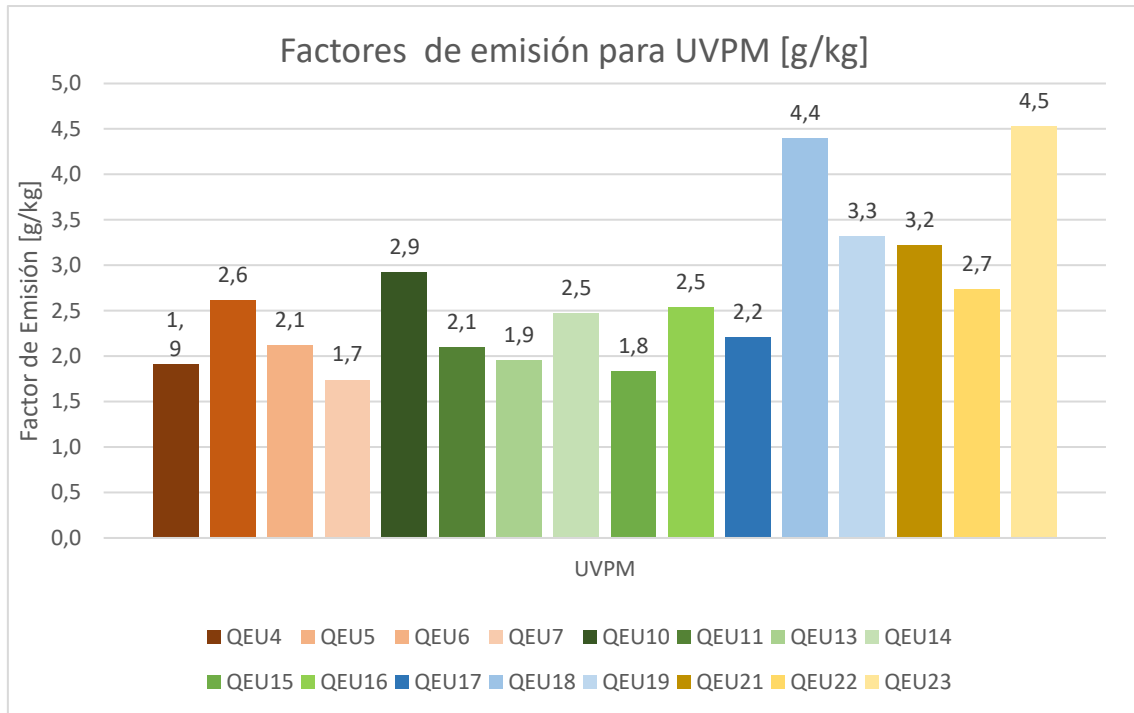


Ilustración 32: Factores de emisión de UVPM para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.

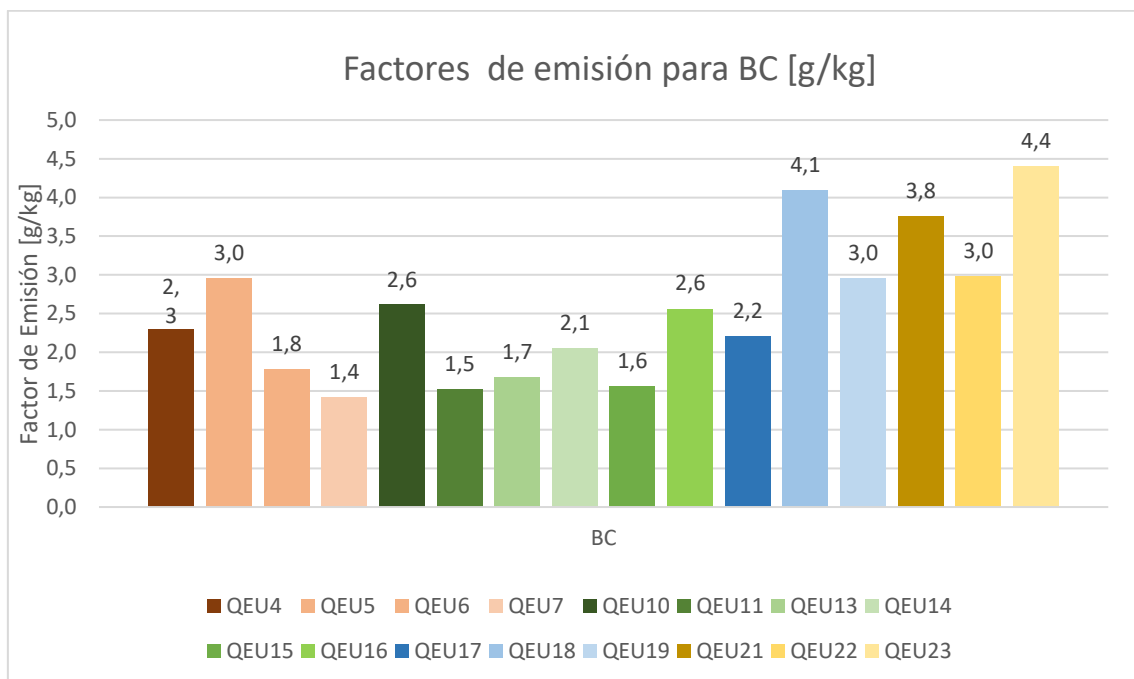


Ilustración 33: Factores de emisión de black carbon para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los factores de emisión de UVPM y BC en una misma quema alcanzan valores similares, no se logra observar una tendencia clara entre cual factor de emisión es mayor.

A partir de estos factores de emisión se les calculó la media, desviación estándar y coeficiente de variación, lo que nos deja los resultados que aparecen en la ilustración N°34 y 35 y la tabla N°22.

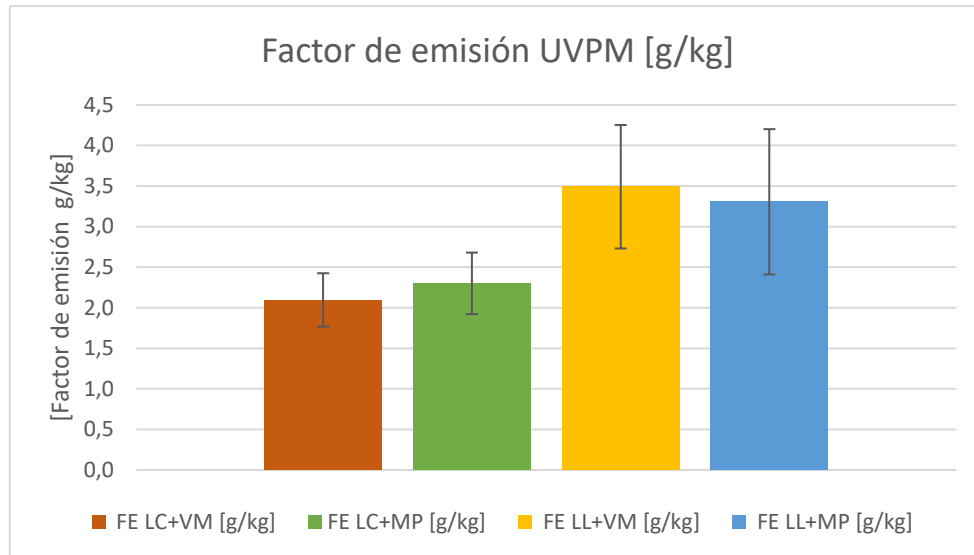


Ilustración 34: Valores promedios de factor de emisión de UVPM. Fuente: Elaboración propia.

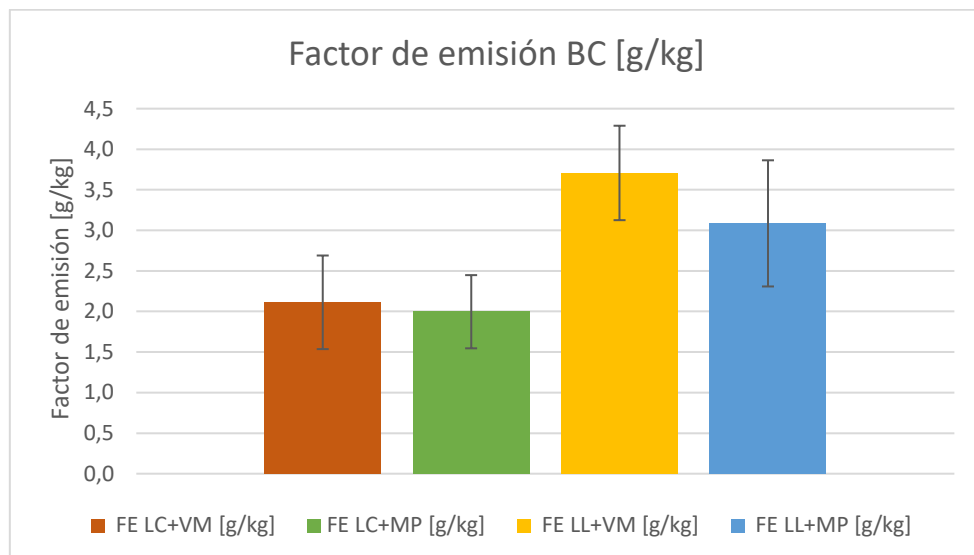


Ilustración 35: Valores promedios de factor de emisión de black carbon. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22: Resumen de factores de emisión y pérdida de datos. Fuente: Elaboración propia.

	FE LC+VM [g/kg]	FE LC+MP [g/kg]	FE LL+VM [g/kg]	FE LL+MP [g/kg]
UVPM	2,1	2,3	3,5	3,3
BC	2,1	2,0	3,7	3,1
Total de datos	53,3	53,5	45,3	46,3
Datos perdidos	6,0	5,5	7,3	7,3
Perdida de datos	12%	11%	17%	16%

De acuerdo con la información mostrada se observa que la leña certificada, posee un factor de emisión más bajo que la leña lavada, comparando los factores de emisión de la vermiculita con el

medio poroso, no se logra observar una tendencia, por lo cual pareciera no afectar a la emisión de black carbon ni brown carbon.

6.5 Gases de combustión

Los gases de combustión fueron medidos utilizando dos equipos, Testo 350 y Testo 330. Con el equipo Testo 350 fue posible realizar el cálculo de factores de emisión de las siguientes especies químicas CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , C_xH_y y H_2 . Con Testo 330 no se pudo realizar el cálculo de factores de emisión dado que el equipo no mide la temperatura ni la presión dentro del ducto primario.

Los factores de emisión obtenidos en cada quema se agruparon de acuerdo con la categoría a la que pertenecen, posteriormente, fueron calculados los factores de emisión promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. A continuación, en las ilustraciones N° 36 – 37 – 38 – 39 – 40 y 41 se presentan los gráficos con los factores de emisión de los gases producto monitoreados.

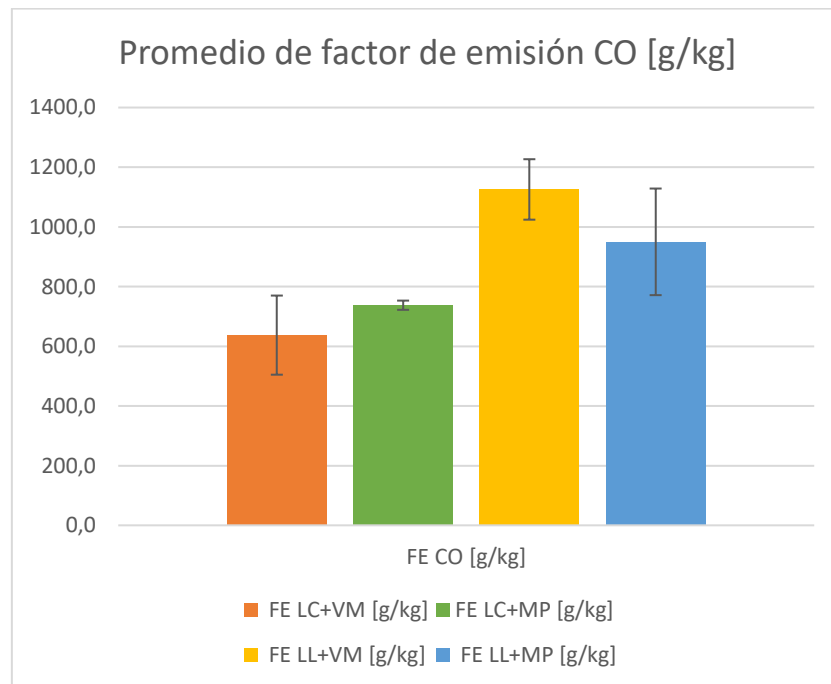


Ilustración 36: Valores promedios de factor de emisión de monóxido de carbono. Fuente: Elaboración propia.

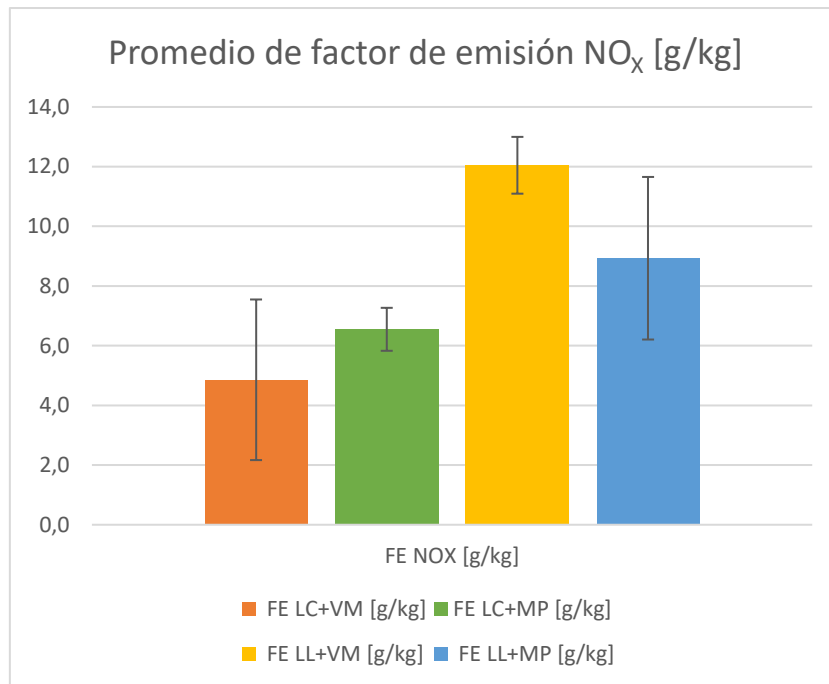


Ilustración 37: Valores promedios de factor de emisión de óxidos de nitrógeno. Fuente: Elaboración propia.

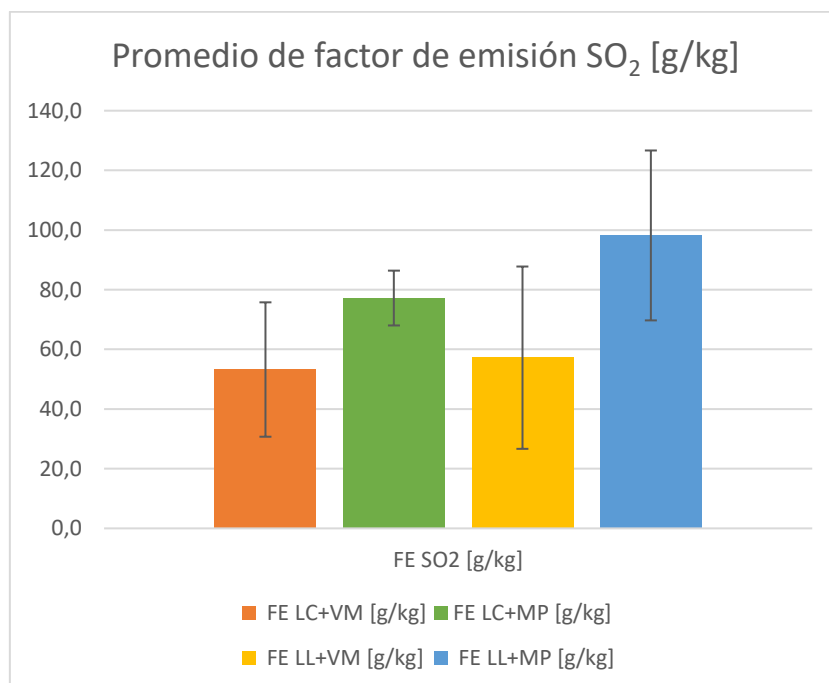


Ilustración 38: Valores promedios de factor de emisión de dióxido de azufre. Fuente: Elaboración propia.

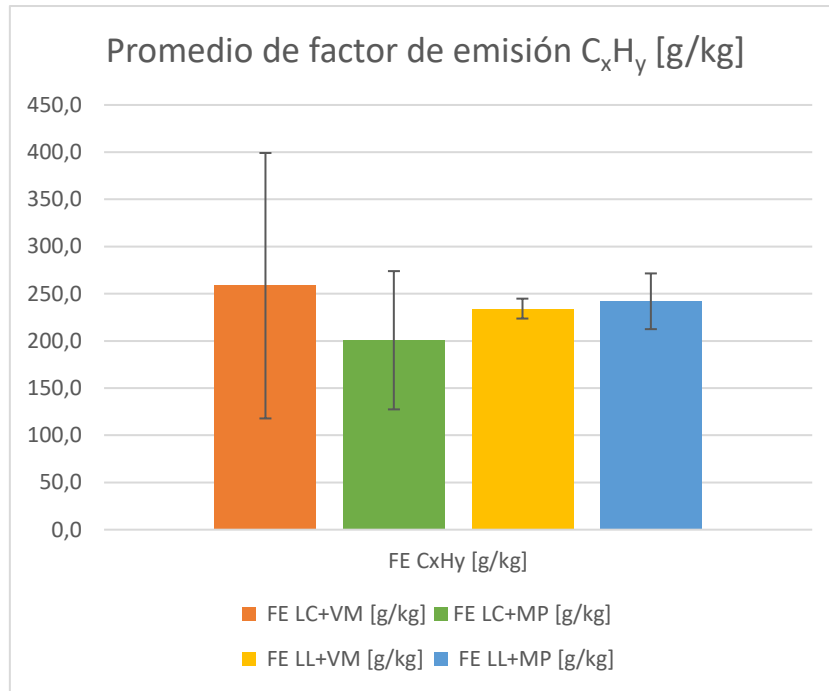


Ilustración 39: Valores promedios de factor de emisión de hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia.

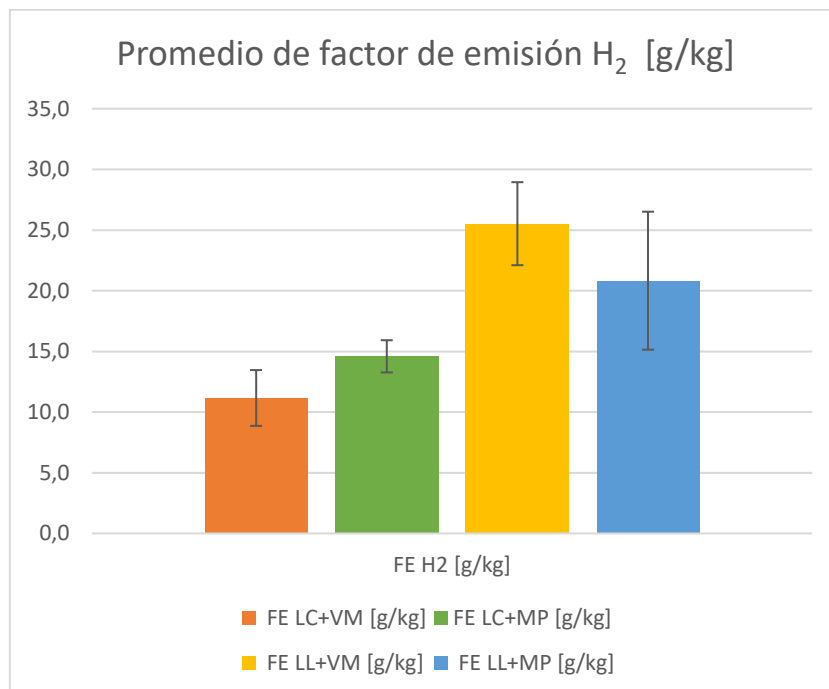


Ilustración 40: Valores promedios de factor de emisión de hidrogeno. Fuente: Elaboración propia.

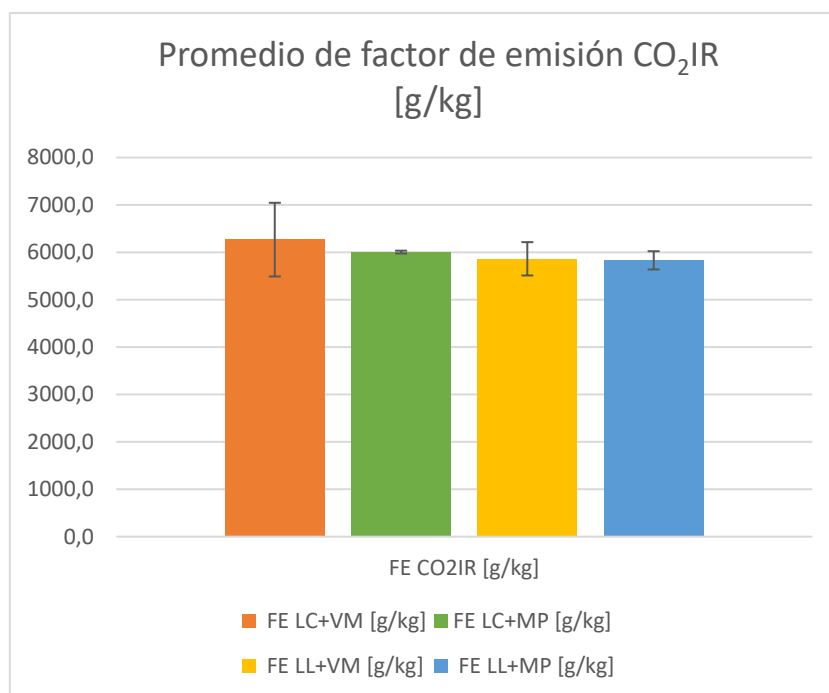


Ilustración 41: Valores promedios de factor de emisión de dióxido de carbono. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas N° 23 y 24 se presentan los factores de emisión promedio y los correspondientes coeficientes de variación.

Tabla 23: Valores promedios de factores de emisión de gases de combustión para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.

	FE LC+VM [g/kg]	FE LC+MP [g/kg]	FE LL+VM [g/kg]	FE LL+MP [g/kg]
FE CO [g/kg]	637,4	737,6	1125,6	950,0
FE NO_x [g/kg]	4,9	6,5	12,0	8,9
FE SO₂ [g/kg]	53,2	77,2	57,2	98,2
FE C_xH_y [g/kg]	258,5	200,7	234,2	242,0
FE H₂ [g/kg]	11,2	14,6	25,5	20,8
FE CO₂IR [g/kg]	6268,0	6004,8	5863,2	5831,1

Tabla 24: Valores promedios de coeficiente de variación para distintas quemas. Fuente: Elaboración propia.

	LC+VM	LC+MP	LL+VM	LL+MP
CV CO [%]	20,8%	2,1%	9,0%	18,8%
CV NO_x [%]	55,4%	11,0%	7,9%	30,5%
CV SO₂ [%]	42,3%	11,9%	53,4%	29,0%

CV C_xH_y [%]	54,4%	36,5%	4,5%	12,2%
CV H₂ [%]	20,6%	9,1%	13,4%	27,3%
CV CO₂IR [%]	12,4%	0,5%	6,0%	3,3%

Las mediciones con el equipo Testo 330 no resultaron tan bien como se esperaba, y el registro de datos era oscilatorio variando entre valores altos y bajos, no correspondiendo con la realidad del ensayo. Se tuvo que realizar un filtrado de los datos, en el cual el criterio de selección fue buscar los valores mínimos en un intervalo de tiempo en el caso de la concentración de oxígeno y buscar los valores máximos en el mismo intervalo de tiempo para la concentración de CO. Luego, se calcularon los valores promedios de las concentraciones de oxígeno y monóxido de carbono, durante los primeros 20 minutos del ensayo.

A continuación, en las ilustraciones N° 42 y 43 se muestran gráficos de variación de concentración de oxígeno en el tiempo y los valores promedios para cada quema.

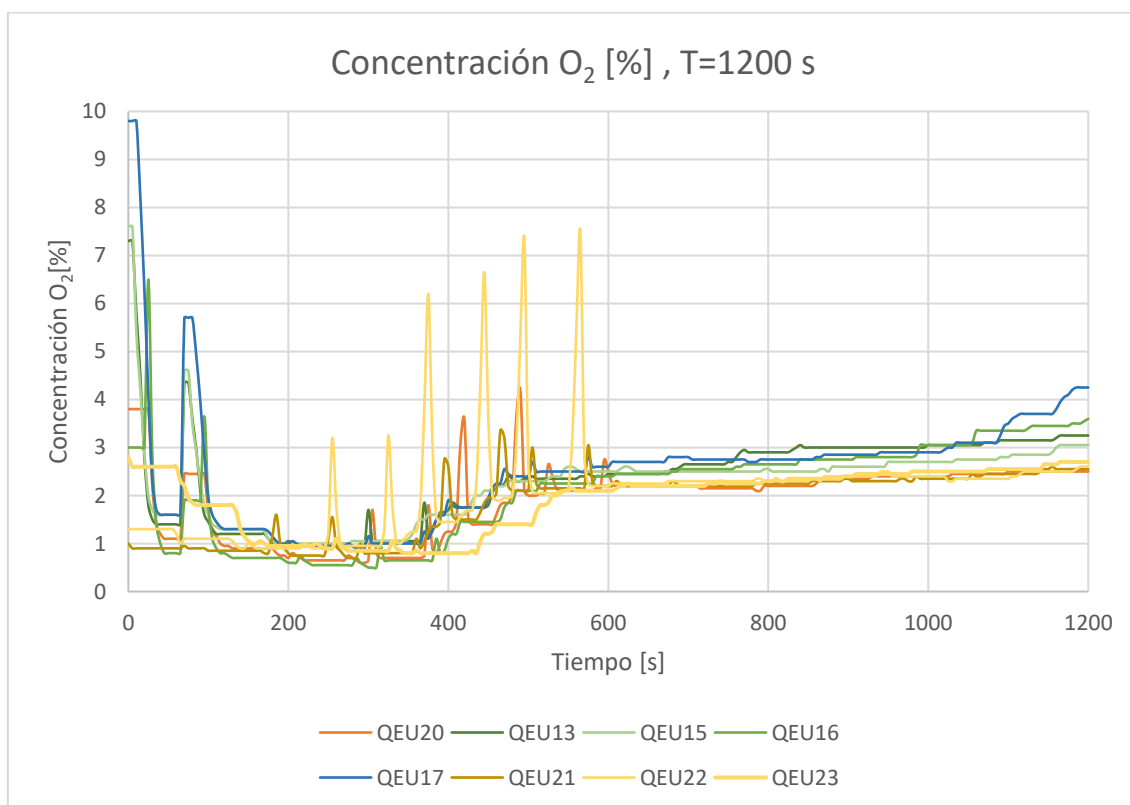


Ilustración 42: Variación en el tiempo de la concentración de oxígeno en distintas quemaduras. Fuente: Elaboración propia.

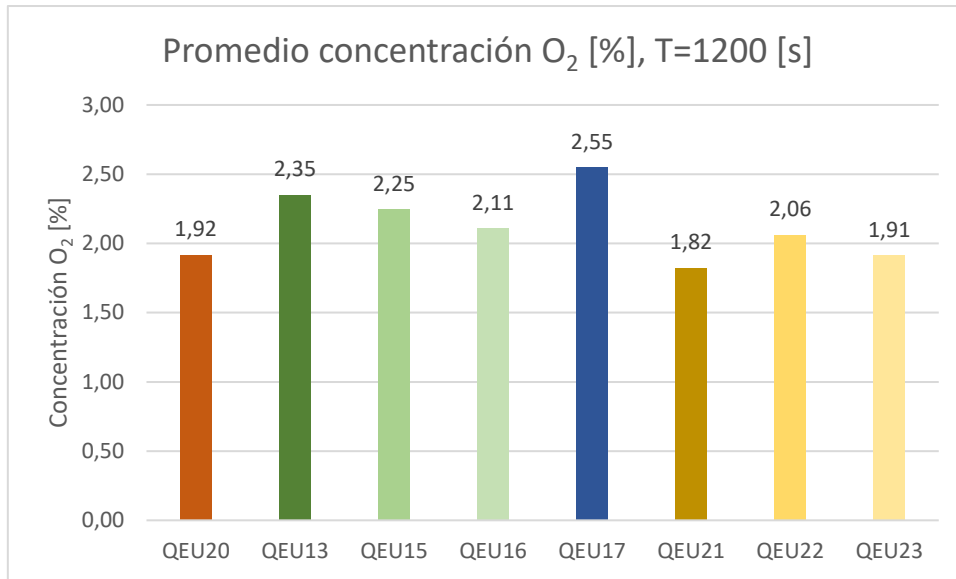


Ilustración 43: Valores promedio de concentración de oxígeno para varias quemas en los primeros 1200 [s]. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las ilustraciones N° 44 y 45 se muestran gráficos de variación de concentración de monóxido de carbono en el tiempo y los valores promedios para cada quema.

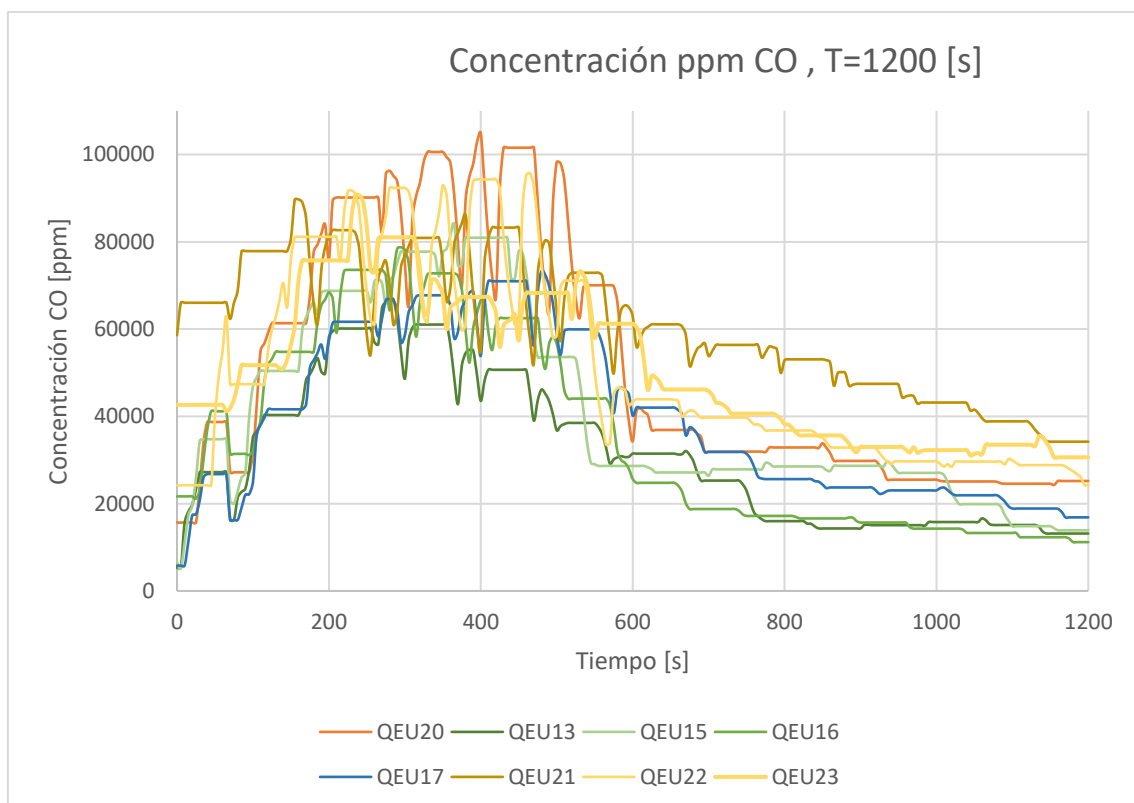


Ilustración 44: Variación en el tiempo de la concentración de monóxido de carbono en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

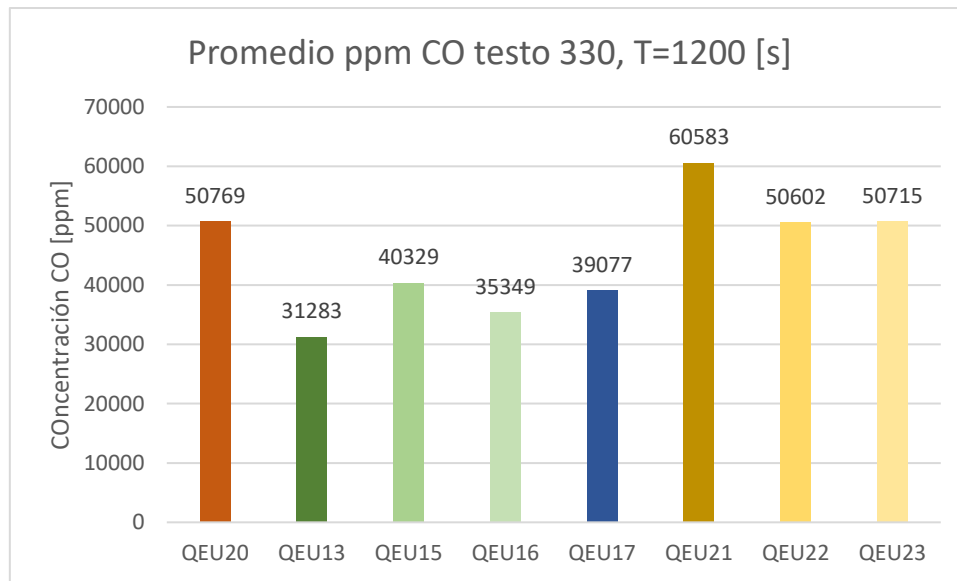


Ilustración 45: Valores promedio de concentración de monóxido de carbono para varias quemas en los primeros 1200 [s]. Fuente: Elaboración propia.

6.6 Eficiencia térmica

La eficiencia fue calculada haciendo referencia a la norma NCh. 3173, no fue posible calcular eficiencia en todas las quemas, ni de todas las categorías, dado que era necesario tener información del Testo 350 y de la temperatura interior del ducto primario, la cual no estuvo disponible en todas las quemas por lo cual solo se pudo calcular eficiencia de las quemas QEU7 (LC+VM), QEU15 (LC+MP), QEU22 y QEU23 (LL+VM).

A continuación, se presenta la tabla N° 25, la cual, contiene información de los datos de entrada y salida de las quemas, necesarios para la aplicación de la NCh.3173, en los ensayos que fue posible realizar cálculos.

Tabla 25: Aplicación de la NCh.3173 para cálculos de eficiencia, potencia térmica total y caudal másico de los humos. Fuente: Elaboración propia.

	QEU7	QEU15	QEU22	QEU23
Concentración media CO Testo 350 [ppm]	1262	2728	3906	3874
Concentración media CO₂ Testo 350 [%]	1,31	1,46	1,43	1,41
Temperatura ambiente [°C]	16,0	23,8	22,2	27,1
Temperatura ducto primario [°C]	393,7	362,1	393,4	379,3
Eficiencia térmica [%]	60,9	65,4	60,7	60,7
Tasa de quemado [kg/h]	3,31	4,09	4,42	3,91
Potencia térmica total [kW]	9,8	13,0	13,0	11,2
Caudal Másico de los Humos [g/s]	154,0	160,5	165,5	148,3

Se observa que la quema que fue realizada con medios porosos interés en el interior de la estufa posee una eficiencia mayor que las otras quemas utilizando la estufa convencional, las cuales presentan valores de eficiencia similares.

7. Análisis experimental

De acuerdo con las pruebas experimentales realizadas se observa que existió poca variabilidad entre las masas de los ensayos realizados en sus distintas categorías. En relación con la humedad del combustible utilizado, las pruebas realizadas con leña certificada contuvieron un mayor porcentaje de humedad, el cual rondó entre 16% y 17%, en las pruebas realizadas con leña lavada el combustible poseyó un porcentaje de humedad menor el cual rondó ente 11% y 14%, lo cual pudo ser debido a que los leños fueron sometidos a un proceso de secado en horno.

Las tasas de quemado en los ensayos realizados con leña lavada fueron mayores que en los realizados con leña certificada, lo cual quizás estuvo relacionado con el porcentaje de humedad del combustible, sin embargo, si se compara entre vermiculita y medio poroso, se observa que, en los ensayos realizados con medios porosos, la leña pudo durar una mayor cantidad de tiempo en ambos casos.

En cuanto a las temperaturas medidas tanto en el interior como en el exterior de la estufa, no es posible establecer una relación concluyente respecto a cuál configuración, alcanzó mayor temperatura. Esto pudo ser debido a que los ensayos fueron realizados bajo distintas condiciones ambientales (temperatura, presión atmosférica y humedad ambiental), lo cual genera variaciones en la combustión y también debido al excesivo uso y altas temperaturas a la que se expusieron los termopares utilizados, dando lugar a errores experimentales por descalibración de los instrumentos.

Respecto a las emisiones de material particulado estas tuvieron un comportamiento similar en el tiempo en las distintas configuraciones, una alta tasa de emisión durante el encendido, un peak de emisión al momento de modificar la admisión de aire primario y finalmente estabilizándose durante todo el tiempo restante. Con respecto a los factores de emisión, la línea base fue la que presentó un mayor factor de emisión, mientras que la categoría de leña certificada con medio poroso fue la que menor factor de emisión tuvo, provocando una reducción de un 61,4 % en la emisión de PM 2,5 respecto a la línea base. Además, se logra observar, en todas las categorías que mientras el diámetro de partícula es menor genera una mayor reducción en la emisión de estas, las cuales son las más peligrosas para la salud de los humanos y organismos vivos.

Sobre las emisiones de black carbon (BC) y el material particulado ultravioleta (UVPM), las categorías con leña certificada presentan un menor factor de emisión de BC y UVPM, frente a las categorías de leña lavada. Las configuraciones con medios porosos tuvieron un factor de emisión ligeramente menor que las con vermiculita, sin embargo, esto no es concluyente debido a la variabilidad de los datos. Cabe destacar que durante estas mediciones existió una importante pérdida de datos debido al equipo de medición utilizado, no obstante, a mayor proporción de

perdida de datos se infiere que existió una mayor emisión de estas especies, dado que la cinta tuvo que correrse una mayor cantidad de veces.

En cuanto a la medición de los gases de combustión con el equipo Testo 350 se observa que las emisiones de CO, NO_x, H₂ fueron mayores en las categorías que utilizaron leña lavada como combustible. Con el equipo Testo 330, se observó que, a mayor concentración de oxígeno, menor es la concentración de monóxido de carbono, es decir, se genera una combustión más completa. Fenómeno el cual ocurrió entre las quemas 13 y 17, las cuales fueron realizadas con medios poroso. Se podría inferir que en las quemas realizadas con medios porosos se obtuvo una combustión más completa.

En cuanto a la eficiencia térmica, esta no se pudo calcular en todas las quemas no categorías, la mayor eficiencia térmica fue de 65,4% en la QEU15 de la categoría LC+MP, mientras que en las otras la eficiencia fue cercana al 61%. Sin embargo, dada la baja cantidad de repeticiones no es posible observar una tendencia.

8. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en esta investigación es posible concluir que el reemplazo de la vermiculita por medios porosos en la estufa tuvo resultados positivos provocando una combustión más completa, disminuyendo la emisión de material particulado y mejorando la eficiencia térmica del equipo. Lo cual puede estar relacionado a que dada la geometría del medio poroso el flujo que ingresa en el aire secundario es más turbulento que con la vermiculita, esta turbulencia puede provocar que el oxígeno sea capaz de reaccionar con una mayor cantidad de gases de combustión dando lugar a una combustión más completa.

En cuanto el pretratamiento del combustible, si bien redujo las emisiones de material particulado, no se redujo más que la categoría LC+MP, lo cual pudo estar relacionado con que por el tamaño de la leña el solvente no fue capaz de extraer en su totalidad los componentes químicos que se deseaban extraer. El aumento de las emisiones de carbono negro en la leña lavada es algo que no se esperaba y quizás pudo ser debido a que en el interior de leño quedaba humedad y por eso lo inusual de los resultados.

La categoría con la cual se obtuvieron mejores resultados fue la de leña certificada con medios porosos disminuyendo los factores de emisión de PM, BC y UVMP, también favoreció la emisión de CO₂ lo cual es positivo ya que indica una combustión más completa. A su vez tuvo la tasa de quemado más baja, lo cual también es positivo.

En base a lo señalado previamente, es posible mejorar los resultados obtenidos, lo cual puede ser realizado mediante un mayor control de las condiciones ambientales que puedan afectar la combustión, utilizar equipos más robustos que se puedan exponer a mayores concentraciones y realizar una mayor repetición de los ensayos de combustión por cada categoría. También sería interesante comparar la mejora realizada en el prototipo con una estufa a pellet dado que se presenta como un potencial competidor.

La leña y la biomasa en general de la mano con la ciencia y la tecnología pueden ser capaces de ser un actor importante dentro de la transición energética hacia las energías renovables, debido a su presencia en diversas regiones y puede ayudar a aprovechar los residuos y desechos orgánicos. Siempre cuando exista una adecuada sostenibilidad y gestión de los recursos, de esta manera minimizar sus impactos negativos.

9. Referencias

1. BOSCA (2017), Manual de Usuario Calefactores a Leña BOSCA. Ingeniería de Combustión BOSCA Chile S.A. Página 4. Disponible en: <https://www.bosca.cl/fichas-tecnicas/Manual-Eco-Limit-Multibosca-Spirit.pdf>.
2. BOSCA (2019), Ficha Técnica Estufa Spirit 380. Ingeniería de Combustión BOSCA Chile S.A. Disponible en: https://www.bosca.cl/wp-content/uploads/2019/07/Calef-Spirit-380_14X22.pdf.
3. C. Molina & Departamento de Política Sectorial y Análisis de Mercado (2022), “Oportunidades y desafíos de la biomasa forestal como biocombustible regulado”, Santiago de Chile.
4. D. Villablanca (2022), “Desarrollo de un procedimiento de pretratamiento de lavado de leña y análisis de propiedades termo-f”, Memoria de titulación para optar al título de: ingeniero civil mecánico, Valparaíso. Chile.
5. Durag Group (2022), “Grimm aerosol technik: world-class solutions for the analysis of aerosol particles”, Alemania. Disponible en: <https://www.durag.com/en/grimm-aerosol-technik-4528.htm>
6. F. Esposito et al. (2012), “A new algorithm for brown and black carbon identification and organic carbon detection in fine atmospheric aerosols by a multi-wavelength Aethalometer”, Universidad de Basilea, Suiza. Disponible en: <https://amt.copernicus.org/preprints/5/C646/2012/amtd-5-C646-2012.pdf>
7. F. Muñoz (2019), “Análisis de emisión de material particulado en el proceso de combustión de leña en estufa de calefacción residencial con el uso de esponjas cerámicas”, Memoria de titulación para optar al título de: ingeniero civil mecánico, Valparaíso. Chile.
8. Gallardo, L., Basoa, K., Tolvett, S., Osses, M., Huneus, N., Bustos, S., Barraza, J., Ogaz, G. (editores) (2020), Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Resumen para tomadores de decisión. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia para el Ministerio del Medio Ambiente a través de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la iniciativa Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants (SNAP). Disponible en: <http://www.cr2.cl/carbononegro/>
9. Grupo de termoquímica sostenible (2023), “FONDEF ID20I10319”. Universidad Técnica Federico Santa María: Departamento de Ingeniería Mecánica, Valparaíso. Chile. Disponible en: <https://gts.usm.cl/resultados/>.

10. Huneus, N., Urquiza A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., Álamos, N., Amigo, C., Arrieta, D., Basoa, K., Billi, M., Blanco, G., Boisier, J.P., Calvo, R., Casielles, I., Castro, M., Chahuán, J., Christie, D., Cordero, L., Correa, V., Cortés, J., Fleming, Z., Gajardo, N., Gallardo, L., Gómez, L., Insunza, X., Iriarte, P., Labraña, J., Lambert, F., Muñoz, A., Opazo, M., O’Ryan, R., Osses, A., Plass, M., Rivas, M., Salinas, S., Santander, S., Seguel, R., Smith, P., Tolvett, S (2020). “El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile.”, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009).
11. IOPscience (2009), “New methods and standards for fine dust” J. Phys.: Conf. Ser. 170 012024. Disponible en: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/170/1/012024>
12. Met One Instruments (2023), “BC 1060 Portable Black Carbon Monitor”. Washington. Disponible en: <https://metone.com/products/bc-1060/>.
13. Ministerio de energía (2022), “Balance nacional de energía”, Santiago de Chile.
14. Ministerio de energía (2022), “Protocolo de análisis y/o ensayos de seguridad de productos de leña y otros dendroenergéticos”, Santiago de Chile.
15. Ministerio de energía (2022), “Matriz energética y eléctrica de Chile”, biblioteca de congreso, Santiago de Chile.
16. Ministerio de medioambiente (2015), “Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire” Santiago de Chile. Disponible en: <https://sinca.mma.gob.cl>
17. Ministerio de salud (2012), “Método ch-5 g: determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución”, Instituto de salud pública. Santiago de Chile. Disponible en: https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2019/06/METODO_CH-5G_2012.pdf.
18. N. Álamos, C. Amigo, R. Calvo (2020), “Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética”, Santiago de Chile.
19. N. García (2021), “Matriz energética y eléctrica de Chile”, biblioteca de congreso, Santiago de Chile.
20. R. Oyarzo (2022), “Investigación experimental del pretratamiento de lavado de leña para la mitigación de contaminantes atmosféricos”. Memoria de titulación para optar al título de: ingeniero civil mecánico, Valparaíso. Chile.

21. R.Torres (2021), “Tecnologías de medición de contaminantes aéreos”, Biblioteca del Congreso, Santiago de Chile.
22. Red de Pobreza Energética (RedPE) & Generadoras de Chile (2022). “Una mirada multidimensional a la pobreza energética en Chile”, Reporte N° 1. Santiago de Chile.
23. Testo Argentina SA (2018), “Gases de combustión”, Argentina. Disponible en: <https://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion>.
24. Testo SE & Co. KGaA (2023), “Muestra de lectura: Cartilla práctica sobre el análisis de gases de combustión industriales. Guía para la medición de emisiones y procesos”, Colombia. Disponible en: <https://www.testo.com/es-CO/aplicaciones/emission-practical-guide-registration>
25. Testo SE & Co. KGaA (2023),” Testo 350 - Caja analizadora para el sistema de análisis de combustión”. Santiago de Chile. Disponible en: <https://www.testo.com/es-CL/testo-350/p/0632-3510>.
26. Testo SE & Co. KGaA (2023),” Medidor de partículas finas testo 380 - Medidor portátil”. España. Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES/medidor-de-particulas-finas-testo-380/p/0632-3800>.