

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“FACTORES DE EMISIÓN GENERADOS POR LA
QUEMA DE DISTINTOS PELLETS EN UNA CÁMARA
DE COMBUSTIÓN CONTROLADA DE EMISIONES
(3CE)”**

GABRIELA ISABEL MARTÍNEZ CATALÁN

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

**PROFESOR GUÍA:
PROFESORES CORREFERENTES:**

**HENRIK HANSEN
KAREN YAÑEZ**

– NOVIEMBRE 2019 –

Resumen

En Chile actualmente existen elevados índices de contaminación atmosférica, concentrados en la zona centro-sur del país, cuyo origen corresponde principalmente a emisiones generadas por calefacción residencial (MMA, 2018d). Considerando entonces la necesidad de diversificar la matriz energética, el proyecto FONDEF ID15I10580 contempla asignarles valor agregado a diversos residuos generados en la industria agrícola y forestal del país, por medio de la creación de pellets a partir de residuos sin procesar, para posteriormente realizar ensayos de combustión con estos materiales en una Cámara de Combustión Controlada de Emisiones (3CE). El objetivo de este estudio es obtener los Factores de Emisión (FE) de los gases de combustión (CO_2 , CO , NO_x , SO_2 y H_2), de material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10}), de *Black Carbon* (BC) y *Brown Carbon* (BrC) provenientes de las emisiones generadas por la combustión de pellets confeccionados a partir de rastrojos de avena, orujos de uva y de aserrín de pino, para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos por la quema de pellet comercial fabricado a partir de aserrín de pino.

Mediante espectrometría láser se obtuvieron los FE de PM_{10} con valores de $0,35 \pm 0,32$ [g/kg] para los ensayos con avena, de $0,59 \pm 0,46$ [g/kg] con uva, de $2,78 \pm 0,96$ [g/kg] con pino y de $3,24 \pm 0,91$ [g/kg] con pellet comercial. Con respecto al N° de partículas detectadas, se determina que en las emisiones medidas las partículas se concentran principalmente en la moda Aitken, en más de un 58% del total, y en la moda de acumulación, con un 17% del total, presentando tamaños entre $0,02 - 0,1$ [μm], cuya distribución se comporta de manera cualitativa y cuantitativamente de acuerdo con lo esperado teóricamente según lo expuesto por EPA (1996) y Whitby (1978). En cuanto a los FE de BC resultaron de un $0,084 \pm 0,011$ [g/kg] para los ensayos con avena, de $0,080 \pm 0,023$ [g/kg] con uva, de $0,081 \pm 0,002$ [g/kg] con pino y de $0,027 \pm 0,015$ [g/kg] con pellet comercial, por otra parte los FE de BrC resultaron de $0,036 \pm 0,004$ [g/kg] para quemaduras con avena, $0,038 \pm 0,009$ [g/kg] para uva, $0,025 \pm 0,004$ [g/kg] para pino y $0,025 \pm 0,004$ para pellet comercial, se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de BrC y de BC para las biomásas de avena, uva y pino, con un 95% de confianza.

Se concluye que los pellets de pino en el proceso de combustión lograron quemarse en un mayor porcentaje, con un rendimiento de quemado del 90,10 %, seguido de avena con un 87,63% y finalmente de uva con 52,97%.

Se determinó que las quemaduras con uva emitieron en promedio una mayor cantidad de CO durante los ensayos, con un FE promedio de $181,39 \pm 131$ [g/kg], además esta variedad también generó mayores de NO_x , con un FE promedio de $7,6 \pm 1,8$ [g/kg], seguida de la avena con $5,4 \pm 1,8$ [g/kg] y finalmente pino y pellet comercial, con FE de $1,5 \pm 0,57$ [g/kg] y $1,3 \pm 0,5$ [g/kg] respectivamente. Con respecto a las emisiones de SO_2 para el

pellet de pino resultó de $3,5 \pm 1,9$ [g/kg], para el pellet de avena de $1,6 \pm 0,9$ [g/kg], para el caso de la uva de $0,9 \pm 1,1$ [g/kg] y para el pellet comercial, con un valor de $0,00013 \pm 0,0003$ [g/kg].

Con respecto al análisis XRF, se determina que las cenizas de avena presentaron un contenido importante de SiO_2 , en un 34,89% y de K_2O en un 7,88%, de igual manera las cenizas de uva presentan K_2O con un porcentaje elevado, del 22,07%. Por otra parte, con respecto al pellet comercial, se concluye que posiblemente sus cenizas están contaminadas con parte del material que conforma el soporte para la biomasa en la cámara 3CE.

Se concluye que las adaptaciones realizadas a la 3CE resultaron adecuadas para cumplir con el objetivo de combustionar pellets de forma reproducible con todas las variedades de biomasa ensayadas. Con respecto a los FE obtenidos para las concentraciones de material particulado, se identificaron un total de 8 valores atípicos.

Se establece que la consolidación de los *pellets* es un factor clave en la correcta combustión de la biomasa, debido a que afecta tanto a las emisiones de partículas, como a las emisiones gaseosas, generando un aumento de estos contaminantes si es que el material no se encuentra bien consolidado.

Finalmente se recomienda incorporar a este estudio ciertos parámetros que no pudieron medirse en esta experimentación, como los FE de CO_2 para pellet comercial, medir la temperatura de llama en estos ensayos con pellet comercial, analizar las cenizas de pino y conocer la composición elemental completa de las biomásas antes de ser combustionadas.

Abstract

In Chile there exists a high rate of air pollution, concentrated in the central-southern region of the country, whose origins correspond mainly to emissions generated by residential heating (MMA, 2018d). Considering the need to diversify the energy matrix, the FONDEF ID15I10580 project contemplates assigning value added to several waste generated by agricultural and forestry industry, through the creation of pellets from unprocessed waste, to subsequently carry out combustion tests with these materials, in a Controlled Combustion Chamber of Emissions (3CE). The objective of this research is to determinate the Emission Factors (FE) of the combustion gases (CO_2 , CO, NO_x , SO_2 y H_2), particulate matter (PM1, PM2.5 and PM10), Black Carbon (BC) and Brown Carbon (BrC) from the generated emissions by the combustion of pellets manufactured from oats stubble, grape marc and pine sawdust and to compare them with the results for commercial pellet burning, manufactured from pine sawdust.

By using laser spectrometry, it could be possible to determinate the FE of PM10, for oats the value was $0,35 \pm 0,32$ [g/kg], for grapes, it was $0,59 \pm 0,46$ [g/kg], for pine, it was $2,78 \pm 0,96$ [g/kg] and for commercial pellets, it was $3,24 \pm 0,91$ [g/kg]. About the number of particles detected, it is determined that the emissions are concentrated mainly in the Aitken mode, in more than 57% of the total, and in the accumulation mode, with 17% of the total displaying sizes between $0,02$ - $0,1$ [μm], whose distribution behaves qualitatively and quantitatively according to the theoretically expected, as explained by EPA (1996) and Whitby (1978). Regarding to FE of BC, the value was $0,084 \pm 0,011$ [g/kg] for the tests with oats, it was $0,080 \pm 0,023$ [g/kg] for grape tests, it was $0,081 \pm 0,002$ [g/kg] for pine and it was $0,027 \pm 0,015$ [g/kg] for commercial pellet, furthermore the BrC FE resulted was $0,036 \pm 0,004$ [g/kg] for burning with oats, was $0,025 \pm 0,004$ [g/kg] for grape, was $0,025 \pm 0,004$ [g/kg] for pine and was $2,84 \pm 0,78$ for commercial pellets. it was found that there are no statistically significant differences between the means of the BrC and BC FE for oat, grape and pine biomass, with 95% confidence.

It is concluded that pine pellets were burned in a higher percentage, with a burn efficiency of 90,10%, followed by oats with 87,63% and finally by grapes with 52,97%.

It was determined that burns with grapes emitted on average a greater amount of CO during the tests, with a FE of $181,39 \pm 131$ [g/kg], in addition this variety also generated greater NO_x , with a FE average of $7,6 \pm 1,8$ [g/kg], followed by oats with $5,4 \pm 1,8$ [g/kg] and finally pine and commercial pellet, with FE of $1,5 \pm 0,57$ [g/kg] and $1,3 \pm 0,5$ [g/kg] respectively. With regard to SO_2 emissions for the pine pellet it was $3,5 \pm 1,9$ [g/kg], for the oat pellet it was $1,6 \pm 0,9$ [g/kg], in the case of the grape it was $0,9 \pm 1,1$ [g/kg] and for the commercial pellet, with a value of $0,00013 \pm 0,0003$ [g/kg].

Regarding to the XRF analysis, it is determined that oat ashes presented an important content of SiO_2 , in 34,89% and K_2O in 7,88%, in the same way grape ashes present K_2O with a high percentage of 22,07%. On the other hand, with respect to the commercial pellet, it is concluded that possibly its ashes are contaminated with material that forms the biomass support in the 3CE chamber.

It is concluded that the adaptations made to the 3CE were adequate to meet the objective of combusting pellets reproducibly with all the biomass varieties tested. With respect to the FE obtained for the concentrations of particulate material, were identified a total of 8 outliers.

It is established that the consolidation of pellets is a key factor in the correct combustion of biomass, because it affects particle and gaseous emissions, generating an increase in these pollutants if the material is not properly consolidated.

Finally, it is recommended to incorporate into this study certain parameters that could not be measured in this experiment, such as FE of CO_2 for commercial pellets, measure the flame temperature in commercial pellet tests, analyze pine ashes and know the complete elemental composition of the biomass before being combusted.

Índice General

Resumen.....	1
Abstract	3
Índice General	5
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	12
Índice de Gráficos.....	14
Glosario.....	17
1. Introducción	21
2. Objetivos	22
2.1 <i>Objetivo General:</i>	22
2.2 <i>Objetivos específicos:</i>	22
3. Antecedentes generales.....	23
3.1 <i>Energías renovables y no renovables</i>	23
3.2 <i>Biomasa y bioenergía</i>	24
3.2.1 <i>Tecnologías de obtención</i>	25
3.2.2 <i>Clasificación de la biomasa</i>	28
3.2.3 <i>Ventajas y desventajas del uso de biomasa</i>	30
3.3 <i>Biomasa y bioenergía en Chile y el mundo</i>	31
3.3.1 <i>Matriz energética mundial</i>	31
3.3.1 <i>Biomasa y bioenergía en Chile</i>	33
3.3.1 <i>Leña y sus derivados</i>	36
3.3.1.1 <i>Leña</i>	38
3.3.1.2 <i>Pellet</i>	40
3.4 <i>Proceso de combustión</i>	45
3.5 <i>Biomasa residual industrial</i>	51
3.5.1 <i>Biomasa residual de la industria agrícola</i>	55
3.5.1.1 <i>Avena</i>	58

3.5.1.2 Uva.....	60
3.5.2 Biomasa residual de la industria forestal.....	62
3.5.2.1 Pino radiata	65
3.6 Contaminación atmosférica en Chile	67
3.6.1 Contaminantes atmosféricos.....	67
3.6.2 Aspectos legislativos.....	81
3.6.3 Niveles de contaminación atmosférica en Chile	86
4. Definición del problema y propuesta de solución.....	97
5. Procedimiento experimental.....	98
5.1 PARTE 1. Proceso de peletizado.....	98
5.1.1 Pellet de biomasa residual.....	98
5.1.2 Pellet comercial.....	99
5.2 PARTE 2. Proceso de combustión de la biomasa	101
5.2.1 Cámara de combustión Controlada de Emisiones (3CE).....	101
5.2.2 Funcionamiento, adaptaciones y pruebas preliminares en la 3CE	107
5.2.2.1 Pre-cámara.....	107
5.2.2.2 Horno de combustión	120
5.2.2.3 Post – cámara	123
5.2.3 Condiciones finales de operación	137
5.2.4 Procedimientos preliminares	141
5.2.4.1 Preparación del suministro de aire	141
5.2.2.1 Preparación de cartridges	144
5.2.2.2 Preparación de equipos de muestreo y succión	145
5.2.2.3 Preparación de la muestra	147
5.2.2.4 Limpieza química y térmica de la 3CE.....	149
5.2.5 Prueba de blanco	150
5.2.6 Protocolo de ensayos en 3CE	150
5.3 PARTE 3. Análisis de cenizas	153
5.3.2 Materiales y equipos:	153
5.3.3 Procedimiento análisis de cenizas.....	154
6. Metodología de obtención de Factores de Emisión, Rendimiento y análisis de cenizas	157
6.1 Material Particulado.....	157
6.2 Gases	159
6.3 Rendimiento	160

6.4	<i>Análisis de cenizas</i>	164
7.	Tratamiento estadístico de los datos	166
8.	Resultados y discusión	170
8.1	<i>Resultados proceso de peletizado</i>	170
8.2	<i>Prueba de blanco</i>	173
8.3	<i>Emisiones de material particulado</i>	177
8.3.1	Emisiones de PM ₁ , PM _{2,5} y PM ₁₀	178
8.3.1.1	PM ₁	178
8.3.1.2	PM _{2,5}	183
8.3.1.3	PM ₁₀	188
8.3.1.4	Comparación PM ₁ , PM _{2,5} y PM ₁₀	194
8.3.2	Emisiones de PM carbonoso	195
8.3.2.1	Black Carbon	195
8.3.2.2	Brown Carbon	200
8.3.2.3	Comparación PM	206
8.3.3	Cantidad de partículas	209
8.3.4	Evaluación del impacto del recambio de calefactores en las emisiones de PM 217	
8.4	<i>Emisiones de gases de combustión</i>	222
8.4.1	Dióxido de carbono y rendimiento	223
8.4.1.1	Rendimiento de combustión	227
8.4.1.2	Rendimiento de quemado	229
8.4.2	Monóxido de carbono	231
8.4.3	Óxidos de nitrógeno	236
8.4.4	Monóxido de nitrógeno	241
8.4.5	Dióxido de azufre	246
8.4.6	Hidrógeno molecular	251
8.4.7	Oxígeno molecular	256
8.5	<i>Temperatura de llama</i>	259
8.6	<i>Caracterización de cenizas</i>	261
8.6.1	Porcentajes de volatilización	263
8.6.2	Grado de escorificación	265
8.6.3	Comparación con normativa ENPlus y NCh ISO 17255	267
8.7	<i>Análisis de correlación de Spearman</i>	269
9.	Conclusiones y recomendaciones	271

10. Referencias	277
11. Anexos y apéndices	291
11.1 <i>Anexos</i>	291
11.2 <i>Apéndices</i>	296

Índice de Figuras

Figura 3.1 Orígenes de la biomasa.	24
Figura 3.2. Vías tecnológicas para la producción de bioenergía.....	25
Figura 3.3 Clasificación de la biomasa.	28
Figura 3.4 Composición del gas de salida de la combustión.....	46
Figura 3.5 Composición de los gases de salida en función de la cantidad de O ₂	49
Figura 3.6 Avena sativa.....	58
Figura 3.7 Vid.....	60
Figura 3.8 Residuos madereros de la industria del aserrío.	63
Figura 3.9 Comparación tamaño del material particulado.	70
Figura 3.10 Distribución del número de partículas en función del diámetro.....	71
Figura 3.11 Clasificación óptica y termoquímica de los componentes carbonosos del PM.77	
Figura 3.12. Promedio anual de PM _{2.5} [µg/m ³] en Latino América y el Caribe 2018. ...	86
Figura 3.13 Episodios críticos de calidad del aire 2017-2018.....	95
Figura 5.2 Pellet comercial.....	99
Figura 5.3 Esquema de 3CE.....	102
Figura 5.4 Diagrama P&ID de 3CE.....	103
Figura 5.5 Conexiones pre-cámara.....	107
Figura 5.6 Soporte curvo para biomasa (leña).....	108
Figura 5.7 Soporte recto para biomasa tipo pellet.	109
Figura 5.8 Diagrama P&ID sistema de inyección de aire.	110
Figura 5.9 Compresor C-1.....	110
Figura 5.10 Trampa de agua T-1 y llave de paso V-1.	110
Figura 5.11 Deshumidificador S-1.....	111
Figura 5.12 Filtro F-1 y llave de paso V-2.....	111
Figura 5.13 Acumulador C-2 de aire seco.....	111
Figura 5.14 Datalogger de humedad MI-1 y temperatura TI-1.....	112
Figura 5.15 Válvula de paso V-3.....	112
Figura 5.16 Fluómetro FIC-1.....	112
Figura 5.17 Fluómetro FIC-2.....	112
Figura 5.18 Conexión de aire primario y secundario.....	113
Figura 5.19 Flujo de gases entrantes y salientes en 3CE.	114
Figura 5.20 Equipos saturados con material particulado grueso.....	117
Figura 5.21 Exterior e interior horno de combustión.	120
Figura 5.22 Estructura interna horno.....	120
Figura 5.23 Panel de control temperatura horno.	121
Figura 5.24 Diagrama P&ID Horno de combustión.	121
Figura 5.25 Panel de control horno.....	122
Figura 5.26 Controlador PID.....	122

Figura 5.27 Termómetro Extech EA10.....	122
Figura 5.28 Post-cámara con cartridges ensamblados.....	123
Figura 5.29 Sistema de succión.	124
Figura 5.30 P&ID Sistema de succión.	124
Figura 5.31 Componentes internos cartridge.....	125
Figura 5.32 Caudalímetro.	127
Figura 5.33 silicona de alto vacío.....	127
Figura 5.34 Filtros de fibra cerámica.	127
Figura 5.35 PUFs.	127
Figura 5.36 Filtros de cuarzo.	128
Figura 5.37 Controladores flujo succión.....	128
Figura 5.38 Compresor C-3.	128
Figura 5.39 Compresor C-4.	128
Figura 5.40 Esquema sensor IR para medir CO ₂	129
Figura 5.41 Esquema sensor electroquímico.....	130
Figura 5.42 Principio de detección Espectrómetro 1.109 Grimm.	131
Figura 5.43 Principio de detección Nanosizer 1.320.....	132
Figura 5.44. Principio de detección Magee Scientific AE33.	133
Figura 5.45 Aetalómetro Magee Scientific AE33.	133
Figura 5.46 Dilutor.....	133
Figura 5.47 Espectrómetro láser de aerosoles Grimm.....	134
Figura 5.48 Analizador de gases Testo 350XL.....	134
Figura 5.49 Sensor de CO ₂	134
Figura 5.50 Sondas de muestreo.	135
Figura 5.51 Distribución sondas conectadas a la CRET.....	136
Figura 5.52 Enchufe y encendido compresor C-1.	141
Figura 5.53 Despiche compresor C-1.....	141
Figura 5.54 Válvula V-1 y V-2 abiertas.	142
Figura 5.55 Conexión a corriente equipos.....	142
Figura 5.56 Válvula V-3 abierta.	143
Figura 5.57 Ajustando setpoint FIC-1.....	143
Figura 5.58 Baño de ultrasónico VWR 97043-978.....	144
Figura 5.59 Preparación componentes cartridges, impactador (A) y portafiltro (B).	144
Figura 5.60 Fechas dilutor.....	146
Figura 5.61 Termobalanza o balanza infrarroja Sartorius MA30.	147
Figura 5.62 Estufa Memmert INB500.....	147
Figura 5.63 Balanza Electronic Balance.....	148
Figura 5.64 Fase carga y descarga protocolo de combustión.....	150
Figura 5.65 Posición pellets.....	151
Figura 5.66 Horno cerrado.	152

Figura 5.67 Equipo XRF.	153
Figura 5.68 Rollo de Prolene.	153
Figura 5.69 Cenizas luego de combustión.	154
Figura 5.70 Cenizas de pellets de avena (A), uva (B) y pellet comercial (C).	154
Figura 5.71 Analizador XRF modo escritorio.	155
Figura 5.72 Análisis XRF.	156
Figura 8.1 Pellets de paja y cáscara de avena.	170
Figura 8.2 Pellets de orujo de uva.	171
Figura 8.3 Pellets de aserrín de pino.	172

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Tipos de biomasa según su composición.....	29
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del uso de biomasa.	30
Tabla 3.3 Cantidad de equipos por tipo de combustible.	37
Tabla 3.4 Penetración en mercado nacional de leña y sus derivados.....	38
Tabla 3.5 Características técnicas para pellets con diversos orígenes.....	40
Tabla 3.6 Propiedades pellets según clasificación ENplus.....	41
Tabla 3.7 Subclasificación biomasa residual industrial.....	51
Tabla 3.8 Estimación de GEI emitidos por quema anual de rastrojos en la Región del Biobío.	52
Tabla 3.9 Estimación de gases y material particulado emitidos anualmente por quemas de rastrojos de trigo en la Región del Biobío.....	53
Tabla 3.10 Toneladas de residuos en cultivos de cereales.....	57
Tabla 3.11 Volumen de residuos industria maderera 2015.....	64
Tabla 3.12 Concentraciones permitidas en Norma de Calidad Primaria.	82
Tabla 3.13 Niveles de emergencia para según Norma de Calidad Primaria.....	82
Tabla 3.14 Límites de emisión de PM según potencia del calefactor.	83
Tabla 3.15 Mortalidad y morbilidad asociada a la exposición de PM _{2,5} año 2017.	96
Tabla 5.1 Análisis elemental pellet avena, uva y pino.	99
Tabla 5.2 Análisis de calidad pellet comercial Ecomas.	100
Tabla 5.3 Clasificación de la biomasa en estudio.....	100
Tabla 5.4 Lazos de control en 3CE.....	104
Tabla 5.5 Equipos de monitoreo en 3CE.	104
Tabla 5.6 Equipos del sistema de inyección de aire.	110
Tabla 5.7 Análisis elemental variedades pellets.	115
Tabla 5.8 Lambdas de combustión.	119
Tabla 5.9 Especificación instrumentos horno de combustión.....	122
Tabla 5.10 Descripción partes cartridge.....	125
Tabla 5.11 Especificación de equipos y materiales en sistema de succión.....	127
Tabla 5.12 Equipos sistema de muestreo.	133
Tabla 5.13 Análisis inmediato pellets.	137
Tabla 5.14 Lambda pellets.....	138
Tabla 5.15 Materiales y equipos análisis de cenizas.	153
Tabla 6.1 Densidad normal de los gases de combustión.	159
Tabla 8.1 Resumen resultados de FE para PM.....	177
Tabla 8.2 Factores de Emisión PM ₁	179
Tabla 8.3 Test de rangos múltiples para FE de PM ₁	183
Tabla 8.4 Factores de Emisión de PM _{2,5}	184
Tabla 8.5 Test de rangos múltiples para FE de PM _{2,5}	188

Tabla 8.6 Factores de Emisión de PM ₁₀	189
Tabla 8.7 Test de rangos múltiples para FE de PM ₁₀	193
Tabla 8.8 Factores de Emisión BC.....	196
Tabla 8.9 Test de rangos múltiples para FE de BC.	200
Tabla 8.10 Factores de Emisión BrC.....	201
Tabla 8.11 Test de rangos múltiples para FE de BrC	205
Tabla 8.12 Factores de Emisión cantidad de partículas.....	209
Tabla 8.13 Tamaño de partículas referente a las modas.....	213
Tabla 8.14 Consumo anual de combustible y horas de uso del sector residencial.....	217
Tabla 8.15 Comparación residuos agrícolas y forestales.....	221
Tabla 8.16 Resumen resultados gases de combustión.....	222
Tabla 8.17 Factores de Emisión de CO ₂	223
Tabla 8.18 %C biomasa.....	224
Tabla 8.19 Test de rangos múltiples para FE de CO ₂	225
Tabla 8.20 Rendimiento de combustión.	228
Tabla 8.21 Test de rangos múltiples para rendimientos de combustión.....	228
Tabla 8.22 Rendimiento de quemado.....	229
Tabla 8.23 Factores de Emisión de CO.	231
Tabla 8.24 Factores de Emisión de NO _x	236
Tabla 8.25 %N biomasa.	237
Tabla 8.26 Test de rangos múltiples para FE de NO _x	238
Tabla 8.27 Factores de Emisión de NO.....	241
Tabla 8.28 Test de rangos múltiples para FE de NO.	243
Tabla 8.27 Factores de Emisión de SO ₂	246
Tabla 8.30 %S biomasa.....	247
Tabla 8.27 Factores de Emisión de SO ₂	251
Tabla 8.32 %H biomasa.....	252
Tabla 8.33 Temperaturas máximas de llama.....	259
Tabla 8.34 Test de rangos múltiples para T° de llama.....	260
Tabla 8.35 Resultados análisis XRF para cenizas.....	261
Tabla 8.36 %Volatilización S y Cl.....	263
Tabla 8.37 Criterio grado de escorificación.	265
Tabla 8.38 Parámetros de escorificación.....	266
Tabla 8.39 Comparación características y composición de pellets con ENPlus y NCh ISO 17255.....	268
Tabla 11.1 Composición elemental pellet HTC-A 0.75.....	291
Tabla 11.2 Masa y volumen de oxígeno estequiométrico y real.	293

Índice de Gráficos

Gráfico 3.1 Porcentaje anual de energías renovables y no renovables en la matriz energética nacional.....	23
Gráfico 3.2 Matriz energética primaria mundial 1971 - 2017.....	31
Gráfico 3.3 Uso final del consumo de bioenergía mundial.....	32
Gráfico 3.4. Matriz energética primaria nacional año 2008 y año 2017.....	33
Gráfico 3.5. Consumo anual de biomasa en Chile.	34
Gráfico 3.6. Sectores abastecidos por biomasa en el año 2017.....	35
Gráfico 3.7. Consumo final de biomasa (leña y sus derivados) por sector 2014 – 2015.	36
Gráfico 3.8 Producción anual nacional pellets 2017.....	43
Gráfico 3.9 Proyección demanda pellets por segmento.	44
Gráfico 3.10 Rendimiento de combustión en función del exceso de aire.....	48
Gráfico 3.11 Cantidad anual de quemas controladas.....	54
Gráfico 3.12 Superficie quemada con residuos agrícolas y forestales año 2017.....	55
Gráfico 3.13 Distribución de la superficie nacional de avena.....	59
Gráfico 3.14 Cantidad de producción y residuos anuales en el cultivo de avena.....	59
Gráfico 3.15 Distribución regional cultivo vitivinícola-pisquero y vid de mesa 2016-2017.	60
Gráfico 3.16 Cantidad anual de orujos de uva.....	61
Gráfico 3.17 Destino de los residuos madereros 2015.....	64
Gráfico 3.18 Distribución de la superficie de pino radiata 2017.	66
Gráfico 3.19 Cantidad anual emitida de aserrín primario y secundario de pino radiata.	66
Gráfico 3.20 Componentes del forzamiento radiativo 1750-2011.....	79
Gráfico 3.21 Unidades acumuladas según Programa de Recambio de Calefactores	85
Gráfico 3.22 Concentración trianual promedio PM10 y PM 2,5 año 2017.....	88
Gráfico 3.23 Emisiones de NO _x 2016.....	90
Gráfico 3.24 Emisiones de SO ₂ 2016.....	91
Gráfico 3.25 Emisiones de PM _{2,5} año 2016.	92
Gráfico 3.26 Emisiones de GEI anuales.	93
Gráfico 3.27 Emisiones de Black Carbon por sector.....	94
Gráfico 8.1 Comportamiento en tiempo real de partículas en prueba de blanco.....	173
Gráfico 8.2 Cantidad de partículas durante prueba de blanco en función del diámetro.	174
Gráfico 8.3 Comportamiento en tiempo real de los gases en prueba de blanco.....	175
Gráfico 8.4 Comportamiento CO ₂ y O ₂ durante ensayo de blanco.....	176
Gráfico 8.5 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de avena.....	180
Gráfico 8.6 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de uva.	180
Gráfico 8.7 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de pino.....	181

Gráfico 8.8 Emisiones en tiempo real de PM ₁ para pellet comercial.	181
Gráfico 8.9 Emisiones en tiempo real de PM _{2,5} para pellet de avena.....	185
Gráfico 8.10 Emisiones en tiempo real de PM _{2,5} para pellet de uva.....	185
Gráfico 8.11 Emisiones en tiempo real de PM _{2,5} para pellet de pino.....	186
Gráfico 8.12 Emisiones en tiempo real de PM _{2,5} para pellet comercial.	186
Gráfico 8.13 Emisiones en tiempo real de PM ₁₀ para pellet de avena.....	190
Gráfico 8.14 Emisiones en tiempo real de PM ₁₀ para pellet de uva.....	190
Gráfico 8.15 Emisiones en tiempo real de PM ₁₀ para pellet de pino.	191
Gráfico 8.16 Emisiones en tiempo real de PM ₁₀ para pellet comercial.	191
Gráfico 8.17 Comparación Factores de Emisión PM.....	194
Gráfico 8.18 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de avena.....	197
Gráfico 8.19 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de uva.	197
Gráfico 8.20 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de pino.	198
Gráfico 8.21 Emisiones en tiempo real de BC para pellet comercial.....	198
Gráfico 8.22 Emisiones en tiempo real de BrC para avena.....	202
Gráfico 8.23 Emisiones en tiempo real de BrC para uva.	202
Gráfico 8.24 Emisiones en tiempo real de BrC para pino.	203
Gráfico 8.25 Emisiones en tiempo real de BrC para pellet comercial.	203
Gráfico 8.26 Comparación FE de BC con BrC.....	206
Gráfico 8.27 Porcentajes de BC y BrC en el PM _{2,5}	207
Gráfico 8.28 Comparación FE de BC, BrC y PM.	208
Gráfico 8.29 FE de cantidad de partículas totales.	210
Gráfico 8.30 Gráfico de cajas y bigotes para los FE del N° de partículas.....	211
Gráfico 8.31 Distribución FE de cantidad de partículas.....	212
Gráfico 8.32 Cantidad de partículas por tamaño.	214
Gráfico 8.33 Clasificación partículas según tamaño.....	215
Gráfico 8.34 Tasas de emisión para avena, pino uva y leña.	219
Gráfico 8.35 Factores de Emisión de CO ₂	224
Gráfico 8.36 Emisiones en tiempo real de CO ₂ para avena.	226
Gráfico 8.37 Emisiones en tiempo real de CO ₂ para uva.	226
Gráfico 8.38 Emisiones en tiempo real de CO ₂ para pellet comercial.	227
Gráfico 8.39 Gráfico de cajas y bigotes para el rendimiento de quemado.....	230
Gráfico 8.40 Factores de Emisión de CO.	232
Gráfico 8.41 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de CO.....	233
Gráfico 8.42 Emisiones en tiempo real de CO para avena.....	234
Gráfico 8.43 Emisiones en tiempo real de CO para uva.....	234
Gráfico 8.44 Emisiones en tiempo real de CO para pino.	235
Gráfico 8.45 Emisiones en tiempo real de CO para pellet comercial.....	235
Gráfico 8.46 Factores de Emisión promedio de NO _x	237
Gráfico 8.47 Emisiones en tiempo real de NO _x para avena.	239

Gráfico 8.48 Emisiones en tiempo real de NO _x para uva.....	239
Gráfico 8.49 Emisiones en tiempo real de NO _x para pino.....	240
Gráfico 8.50 Emisiones en tiempo real de NO _x para pellet comercial.....	240
Gráfico 8.51 Factores de Emisión promedio de NO.....	242
Gráfico 8.52 Emisiones en tiempo real de NO para avena.....	243
Gráfico 8.53 Emisiones en tiempo real de NO para uva.	244
Gráfico 8.54 Emisiones en tiempo real de NO para uva.	244
Gráfico 8.55 Emisiones en tiempo real de NO para pellet comercial.	245
Gráfico 8.56 Factores de Emisión promedio de SO ₂	247
Gráfico 8.57 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de SO ₂	248
Gráfico 8.58 Emisiones en tiempo real de SO ₂ para avena.....	249
Gráfico 8.59 Emisiones en tiempo real de SO ₂ para uva.....	249
Gráfico 8.60 Emisiones en tiempo real de SO ₂ para pino.	250
Gráfico 8.61 Emisiones en tiempo real de SO ₂ para pellet comercial.....	250
Gráfico 8.62 Factores de Emisión promedio de H ₂	252
Gráfico 8.63 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de H ₂	253
Gráfico 8.64 Emisiones en tiempo real de H ₂ para avena.....	254
Gráfico 8.65 Emisiones en tiempo real de H ₂ para uva.....	254
Gráfico 8.66 Emisiones en tiempo real de H ₂ para pino.	255
Gráfico 8.67 Emisiones en tiempo real de H ₂ para pellet comercial.....	255
Gráfico 8.68 Emisiones en tiempo real de O ₂ para avena.....	256
Gráfico 8.69 Emisiones en tiempo real de O ₂ para uva.....	257
Gráfico 8.70 Emisiones en tiempo real de O ₂ para pino.....	257
Gráfico 8.71 Emisiones en tiempo real de O ₂ para pellet comercial.....	258
Gráfico 8.72 Caracterización de cenizas.	262
Gráfico 8.73 Comparación %S en cenizas y biomasa.	264
Gráfico 8.74 Comparación %Cl en cenizas y biomasa.....	264
Gráfico 11.1 Diagramas de cajas y bigotes para los FE obtenidos.....	294
Gráfico 11.2 Diagramas de cajas y bigotes para los FE obtenidos.....	295

Glosario

ACHS	: Asociación Chilena de Seguridad.
AR	: Registrador de Análisis, según Norma ANSI/ISA S5.4.
Ar	: Argón.
ARU	: Aguas Residuales Urbanas.
ATECYR	: Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración.
BCN	: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
BC	: <i>Black Carbon</i> .
BrC	: <i>Brown Carbon</i> .
CCVMC	: Contaminantes Climáticos de Vida Media Corta.
CE	: Carbono Elemental.
CH₄	: Metano.
CIIFEN	: Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
cm³	: Centímetro cúbico.
CO	: Monóxido de carbono.
CO₂	: Dióxido de carbono.
CONAF	: Corporación Nacional Forestal.
COVs	: Compuestos Orgánicos Volátiles.
CNE	: Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile.
CRANA	: Centro de Recursos Ambientales de Navarra.
CRET	: Cámara de Recolección de Emisiones Termostatizada.
DEFRA	: Department for Environment, Food and Rural Affairs.
EBIA	: European Biomass Industry Association.
EMRP	: Estaciones de Monitoreo de calidad del aire con Representatividad Poblacional.
ENplus	: Certificación internacional para <i>pellets</i> de madera bajo el estándar de calidad ISO17225-2.
ENR	: Energía No Renovable.
EPA	: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.
EPC	: European Pellet Council.
ERNC	: Energías Renovables No Convencionales.
FAO	: Food and Agriculture Organization.
FI	: Indicador de Flujo, según Norma ANSI/ISA S5.4.

FIC	: Controlador e Indicador de Flujo, según Norma ANSI/ISA S5.4.
FE	: Factor de Emisión.
FSC	: <i>Forest Stewardship Council</i> , organización internacional que establece los estándares para el manejo responsable de bosques.
GEI	: Gases de Efecto Invernadero.
GDB	: Evaluation's Global Burden of Disease Project.
GISS	: Goddard Institute for Space Studies.
GRH	: Gases Reales Húmedos.
GRS	: Gases Reales Secos.
GTH	: Gases Teóricos Húmedos.
HAPs	: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.
HEI	: Health Effects Institute.
HTC	: Hydrothermal Carbonization.
HTL	: Hydrothermal Liquefaction.
HTU	: Hydrothermal Upgrading.
HWE	: Hot Water Extraction.
H₂	: Hidrógeno molecular.
H₂O	: Agua.
H₂SO₄	: Ácido sulfúrico.
IC	: Índice de Cosecha.
IEA	: International Energy Agency.
IGSD	: Instituto de Gobernanza y Desarrollo Sostenible.
IHME	: Institute for Health Metrics and Evaluation.
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change.
kg	: Kilógramo.
kt	: Kilotoneladas.
kt CO₂ eq	: Kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente.
LHW	: <i>Liquid Hot Water</i> .
MI	: Indicador de Humedad, según Norma ANSI/ISA S5.4.
MM USD	: Millones de dólares.
MMA	: Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile.
MTEP	: Millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo.
MW	: Megawatts.
m³	: Metro cúbico.

m³ scc	: Metros cúbicos sólidos con corteza.
NDIR	: Sensor infrarrojo no dispersivo.
ng	: Nanogramo.
NH₃	: Amoníaco.
nm	: Nanómetro.
NO:	: Óxido nítrico.
NO_x	: Óxidos de nitrógeno.
N₂	: Nitrógeno molecular.
N₂O	: Óxido nitroso.
Nm³ o sm³	: Normal metro cúbico o metro cúbico estándar, que describe el volumen en condiciones normales o estándar de presión y temperatura dependiendo de la publicación u organismo que defina estas condiciones, las cuales habitualmente varían entre 0 [°C] – 25 [°C] para la temperatura, y entre 0,9 – 1 [atm] para la presión.
OC	: Carbono Orgánico.
ODEPA	: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.
OMS	: Organización Mundial de la Salud.
O₂	: Oxígeno molecular.
O₃	: Ozono.
Pb	: Plomo.
PCI	: Poder Calorífico Inferior.
PCS	: Poder Calorífico Superior.
PDA	: Planes de Descontaminación Atmosférica.
PHWE	: <i>Pressurized Hot Water Extraction</i> .
PM	: Material Particulado.
PM1	: Material Particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 1 [µm].
PM2,5	: Material Particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 [µm].
PM10	: Material Particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 [µm].
PUF	: Filtro de poliuretano.
RAE	: Residuos Aprovechables Energéticamente.
RETC	: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes.
RSU	: Residuos Sólidos Urbanos.
SAG	: Servicio Agrícola y Ganadero.
SINCA	: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire.

SO₂	: Dióxido de azufre.
SO₃	: Trióxido de azufre.
t	: tonelada.
TCal	: Teracaloría.
TI	: Indicador de Temperatura, según Norma ANSI/ISA S5.4.
TIC	: Controlador e Indicador de Temperatura, según Norma ANSI/ISA S5.4.
TK	: Panel de control de Temperatura, según Norma ANSI/ISA S5.4.
TPC	: Tubo de Post-Combustión.
TR	: Registrador de Temperatura, según Norma ANSI/ISA S5.4.
XRF	: Fluorescencia de rayos X.
W/m²	: Watts por metro cuadrado.
μm	: Micrómetro.
3CE	: Cámara de Combustión Controlada de Emisiones.
λ	: Coeficiente de exceso de aire.

1. Introducción

En el marco del proyecto FONDEF ID15I10580, denominado “Investigación y optimización de la producción de pellets hidrofóbicos de alta densidad energética a través de la carbonización hidrotérmica de diferentes mezclas de biomasa de relevancia nacional”, la presente memoria de título abarca la primera etapa de este proyecto, donde se contempla otorgarle valor agregado a diversos residuos provenientes de la industria agrícola y forestal, llevando a cabo la elaboración de *pellets* a partir de estos desechos, para posteriormente realizar ensayos de combustión de manera controlada con estas biomásas en el Laboratorio de Combustión del Centro de Tecnologías Ambientales UTFSM, con el fin de determinar cuál de todos los materiales ensayados presenta menor cantidad de emisiones contaminantes y se quema de manera más eficiente.

El proyecto originalmente seleccionó las siguientes variedades de biomasa residual para fabricar *pellets*: pino radiata, trigo, avena, maíz, raps, uva y olivo, sin embargo, para efectos de esta experimentación en específico se trabajará solamente con avena, uva y pino radiata.

En el presente informe se detallan los antecedentes preliminares que apoyan la elaboración del proyecto, como la cuantificación nacional de residuos agrícolas y forestales, y un análisis de la contaminación atmosférica en Chile, sus causas y las consecuencias que han provocado en la población.

Posteriormente se especifica el procedimiento experimental realizado para lograr los objetivos de la investigación, el cual contempla inicialmente diversas modificaciones y adaptaciones efectuadas a los equipos e instrumentos del laboratorio para poder realizar los ensayos de combustión de manera adecuada, y así monitorear las emisiones de material particulado en diversos tamaños y los gases de combustión generados en el proceso. Además, con el objetivo de analizar diferencias significativas entre los datos, se contempló un tratamiento estadístico de los resultados y la comparación de estos con lo esperado teóricamente, determinando también si cumplen con la normativa legal vigente en el país.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General:

Obtener Factores de Emisión (FE) de gases de combustión, material particulado (PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀), *Black Carbon* (BC) y *Brown Carbon* (BrC) provenientes de las emisiones generadas por la combustión de tres tipos de *pellets* obtenidos a partir de rastrojos de avena, orujos de uva y de aserrín de pino.

2.2 Objetivos específicos:

- Adaptar la Cámara de Combustión Controlada de Emisiones (3CE) para la quema de *pellets* de distintos orígenes.
- Realizar ensayos de combustión y medir las emisiones gaseosas (CO₂, CO, NO_x, SO₂ y H₂) para la obtención de FE.
- Medir las emisiones de material particulado (PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀), BC y BrC para obtener los respectivos FE.
- Analizar y cuantificar elementos presentes en las cenizas generadas por la combustión empleando la fluorescencia de rayos X.
- Calcular la Eficiencia de Combustión del proceso de quema de los distintos *pellets* en estudio.
- Comparar los resultados de las emisiones de los distintos *pellets* estudiados versus un *pellet* comercial chileno.

3. Antecedentes generales

3.1 Energías renovables y no renovables

Las energías renovables corresponden a toda fuente de generación energética que no ocasiona agotamiento del recurso de origen, es decir que tanto en los procesos de transformación como de aprovechamiento, la energía útil no llega a consumirse al nivel de la escala humana. Este tipo de energía se clasifica en dos grandes grupos: las energías convencionales y las no convencionales, dependiendo del nivel de desarrollo tecnológico existente para su aprovechamiento y la frecuencia de uso dentro del mercado energético. Según el Ministerio de Energía de Chile “se define como fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) a la eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 [MW]), la biomasa, el biogás, la geotermia, la solar y la energía de los mares” (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2018). Por otra parte, las Energías No Renovables (ENR) corresponden a aquellas fuentes energéticas que están presentes en cantidades limitadas en la naturaleza, por lo que eventualmente pueden llegar a agotarse, como es el caso del petróleo, el carbón, el gas natural, entre otras (Gestiona Energía, 2018).

Como se aprecia en el Gráfico 3.1 según datos de la Comisión Nacional de Energía (2017), anterior al año 2012 Chile presentaba una matriz energética abastecida en más de un 75% con ENR, mientras que desde el año 2012 en adelante este panorama ha ido cambiando, llegando a utilizarse más de un 32% de energía renovable en el año 2017 dentro de la matriz energética nacional.

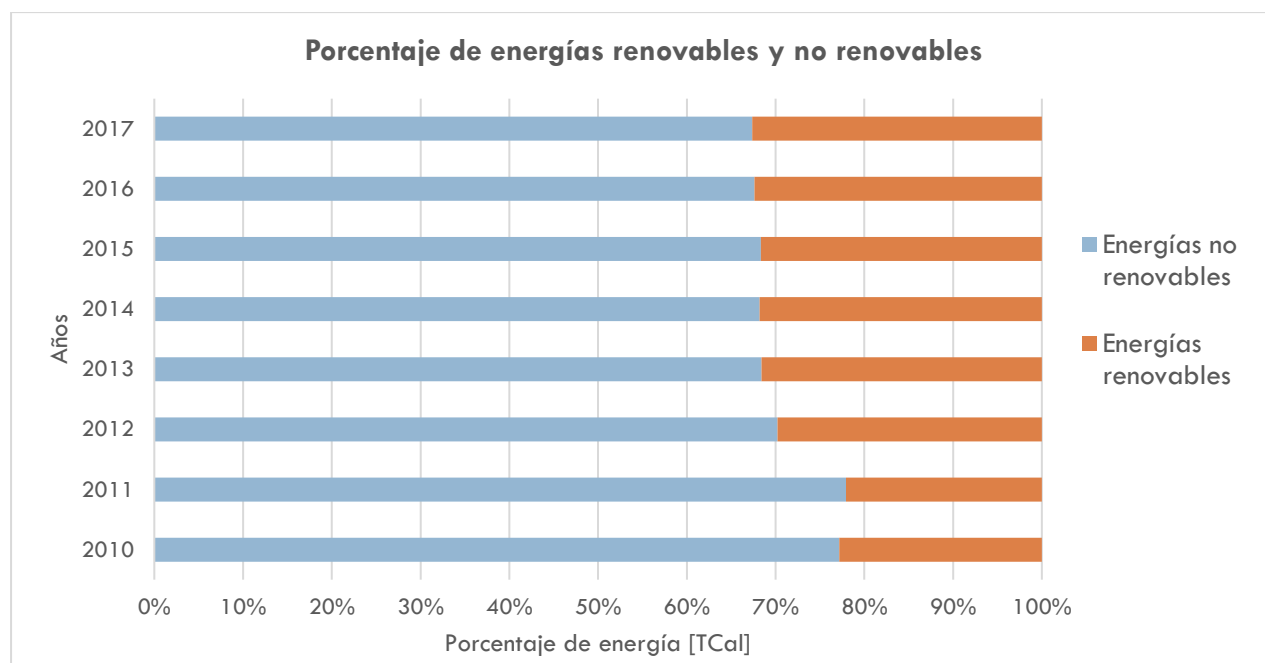


Gráfico 3.1 Porcentaje anual de energías renovables y no renovables en la matriz energética nacional.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Balance Nacional de Energía (Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile, 2017).

3.2 Biomasa y bioenergía

Según lo mencionado anteriormente, la biomasa corresponde a un tipo de materia prima que puede ser potencialmente utilizada como fuente de energía renovable y se define como toda materia orgánica, ya sea de origen animal o vegetal, que mediante procesos termoquímicos o bioquímicos, es capaz de generar energía aprovechable denominada bioenergía, la que puede ser del tipo mecánica, eléctrica o térmica. La bioenergía proviene fundamentalmente de la transformación de la energía solar en energía química por medio de los organismos vegetales en el proceso de fotosíntesis, logrando como resultado el almacenamiento de sustancias orgánicas. Por su parte, los animales son capaces de incorporar esta energía a través de la alimentación con vegetales, transformándolos en sustancias útiles para su metabolismo, de manera que los productos de esta transformación, que habitualmente son considerados residuos, presentan el potencial de ser utilizados como recurso energético (De Lucas, Del Peso, Rodríguez y Prieto, 2012).

La bioenergía corresponde a una de las fuentes combustibles más antiguas utilizada por los seres humanos, siendo empleada desde hace más de 500.000 años y presentándose como la única forma exógena de energía ocupada por la humanidad hasta el surgimiento del carbón mineral, a fines del siglo XVIII (Paneque et al., 2011).

Como se aprecia en la Figura 3.1 existen numerosos productos de la transformación de la energía solar que pueden ser utilizados como biomasa, los cuales serán detallados en capítulos posteriores.

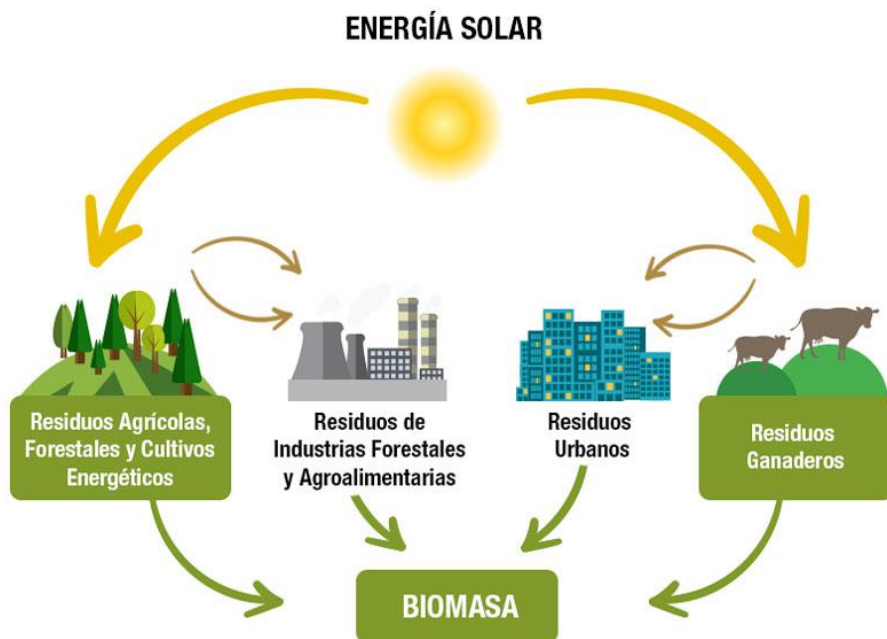


Figura 3.1 Orígenes de la biomasa.
Fuente: Energía de la biomasa (Dínamos, 2018).

3.2.1 Tecnologías de obtención

Actualmente existen variados procesos de obtención y transformación de la energía potencial contenida en la biomasa, la cual proviene mayoritariamente de los enlaces químicos presentes en su estructura. Estos procesos han sido implementados a través del desarrollo de diversas tecnologías a través del tiempo, Turkenburg et al. (2000) propone la siguiente esquematización para las vías tecnológicas que convierten diferentes tipos de biomasa en bioenergía, ya sea en forma de calor, electricidad o combustible, como se aprecia en la Figura 3.2.

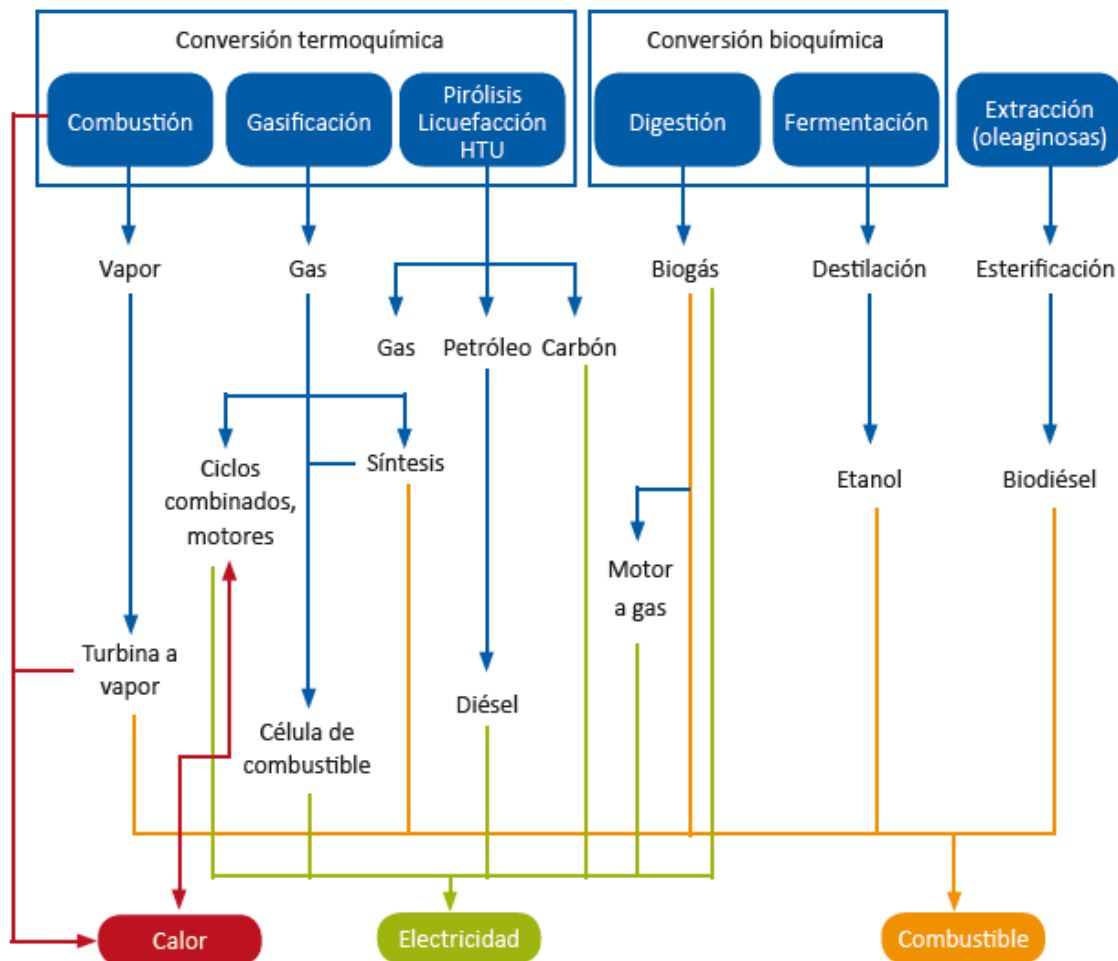


Figura 3.2. Vías tecnológicas para la producción de bioenergía.

Fuente: World energy assessment, energy and the challenge of sustainability. (Turkenburg et al., 2000).

A grandes rasgos cada una de estas vías tecnológicas consiste en lo siguiente:

- **Combustión:** corresponde a un proceso exotérmico de oxidación de la biomasa, llevado a cabo a temperaturas elevadas y con exceso de aire, generándose dióxido de carbono y vapor de agua como resultado, además de desechos inorgánicos que no combustionan (Uriel, 2013).

- **Gasificación:** corresponde a un proceso oxidativo donde la biomasa es transformada en un gas combustible, en presencia de un agente gasificante y altas temperaturas (800-900 [°C]), habitualmente más altas que la combustión. Los productos de esta reacción dependen del tipo de agente gasificante que se utilice, el cual puede ser aire, oxígeno o vapor de agua. En general se generan dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, nitrógeno molecular entre otros. El gas obtenido también puede ser utilizado como gas de síntesis para la generación de otros combustibles como el metanol (Expósito, 2008).
- **Pirólisis:** corresponde a un proceso de descomposición de la biomasa a temperaturas más bajas que los procesos termoquímicos nombrados anteriormente, y es llevado a cabo en ausencia de oxígeno. Los productos de esta reacción corresponden a una mezcla de gases combustibles, hidrocarburos líquidos y residuos sólidos de carbón (Expósito, 2008).
- **Licuefacción:** este proceso se caracteriza por descomponer las moléculas orgánicas complejas de cadenas largas presentes en la biomasa sólida o gaseosa, para transformarlas en moléculas más simples en estado líquido. Ocurre habitualmente a temperaturas menores que la pirólisis y en presencia de catalizadores. Los productos de reacción corresponden a una mezcla de líquidos orgánicos que pueden ser directamente combustionados o tratados para seguir descomponiéndose (Expósito, 2008).
- **Conversión hidrotérmica:** proceso que consiste en la remoción del oxígeno contenido en la biomasa, llevándose a cabo en presencia de agua y en condiciones de temperatura y presión cercanas a su punto crítico, lo cual produce un incremento en el poder calorífico de la biomasa, además de generar como producto moléculas de dióxido de carbono y agua (Amadeus, Rodríguez y Díaz, 2007). Según Wikberg et al. (2015) los procesos de conversión hidrotérmica se pueden dividir en las siguientes categorías de acuerdo con el rango de temperatura utilizada:
 - **HWE:** proceso conocido como *Hot Water Extraction*, el cual opera a presión atmosférica y a temperaturas menores al punto de ebullición del agua. Este método resulta útil para extraer de la biomasa los componentes hidrófilos solubles en agua.
 - **PHWE:** proceso denominado *Pressurized Hot Water Extraction*, donde se trabaja con agua en forma líquida procurando mantener presiones suficientemente altas y temperaturas que oscilan entre 150 – 180 [°C].
 - **LHW:** tratamiento llamado *Liquid Hot Water*, en el que la biomasa húmeda es sometida a presión durante 20 [min] aproximadamente, con temperaturas que fluctúan entre 140 – 230[°C] (Wikberg et al., 2015).

- **HTC:** proceso conocido como *Hydrothermal Carbonization*, cuyo objetivo es generar nuevos materiales carbonosos con propiedades y estructuras específicas. En este tratamiento la biomasa húmeda se procesa a temperaturas entre 180 – 250 [°C], con presiones que oscilan entre 20 – 30 [bar]. Como resultado se generan tres fases: un producto carbonoso sólido, una fase líquida que contiene compuestos orgánicos e inorgánicos y una fase gaseosa.
 - **HTL:** proceso denominado *Hydrothermal Liquefaction*, el cual opera en condiciones cercanas al punto crítico del agua, con rangos de temperatura de 280 – 370 [°C] y presiones entre 100 – 250 [bar], generándose así un producto orgánico similar al petróleo, conocido como biocrudo (Wikberg et al., 2015).
 - **HTU:** tratamiento referente a *Hydro Thermal Upgrading*, desarrollado durante 1982-1993 por el Royal Dutch Shell Laboratory. El proceso consiste en la transformación de la biomasa en hidrocarburos oxigenados, mediante la aplicación de humedad, temperaturas de 200 [°C] y alta presión, mayor a 30 [bar], seguido de un tratamiento a 330 [°C] y 200 [bar]. La reacción libera dióxido de carbono y forma un producto orgánico que puede ser procesado para obtener kerosene y diésel (Uriel, 2013; Capital Energy, 2015).
- **Digestión:** se define como un proceso llevado a cabo por acción de bacterias, las cuales por medio de su actividad metabólica consumen la materia orgánica presente en la biomasa y liberan calor o son capaces de generar compuestos con alto nivel energético, como el biogás. La digestión puede clasificarse en dos categorías:
 - **Digestión aerobia:** las bacterias operan en un ambiente con concentraciones altas de oxígeno, liberando energía mientras consumen materia orgánica. Los productos de esta reacción son dióxido de carbono, sólidos inorgánicos y materia orgánica sin reaccionar.
 - **Digestión anaerobia:** las bacterias operan en un ambiente sin necesidad de oxígeno. A diferencia de la digestión aerobia, requiere un aporte energético inicial para llevarse a cabo. Los principales productos de esta reacción son metano y dióxido de carbono (Castello, 2014).
- **Fermentación:** este proceso consiste primeramente en la hidrólisis de la biomasa, es decir, en la conversión de la biomasa en azúcares por medio de enzimas o de compuestos ácidos. Posterior a este proceso, y por medio de la acción de levaduras, dichos azúcares son convertidos en etanol, liberándose principalmente dióxido de carbono (Castello, 2014).

- **Extracción:** consiste en la remoción de las grasas disponibles en semillas oleaginosas, el cual puede llevarse a cabo por medio de extracción mecánica o química. La extracción mecánica se realiza mediante una secuencia de etapas de prensado y extrusión, en cambio la extracción química se realiza por medio solventes químicos, siendo el más utilizado el hexano. El aceite obtenido pasa posteriormente por un proceso de esterificación y transesterificación, donde mediante la acción de un alcohol y un catalizador se genera biodiésel (Expósito, 2008).

3.2.2 Clasificación de la biomasa

Existen diversas formas para clasificar para la biomasa, según lo expuesto por De Lucas, Del Peso, Rodríguez y Prieto (2012) dentro de los criterios más relevantes se encuentran: la clasificación respecto a su composición, respecto a su origen y respecto a su estado, como se ve representado en la Figura 3.3.

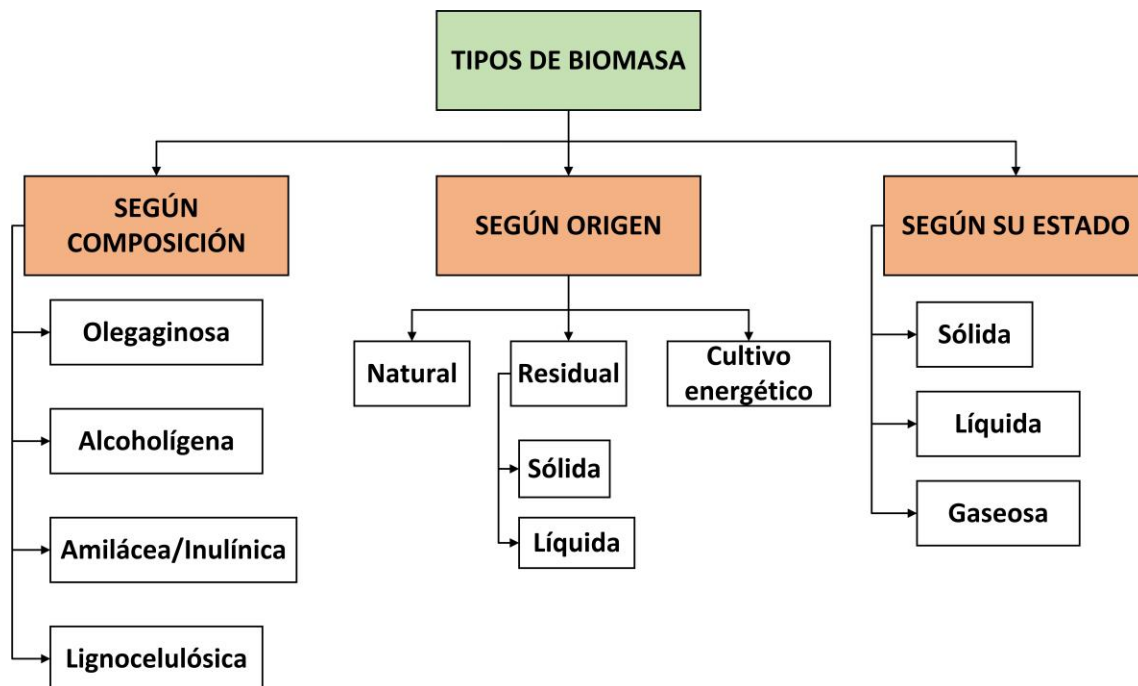


Figura 3.3 Clasificación de la biomasa.

Fuente: Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad (De Lucas et al., 2012).

- **Según su composición:**

En la Tabla 3.1 se resumen los diferentes tipos de biomasa clasificados de acuerdo con su composición química en moléculas orgánicas, especificando ejemplos dentro de la industria agrícola y forestal según De Lucas et al. (2012):

Tabla 3.1 Tipos de biomasa según su composición.

Tipo	Sustancia bioorgánica		Ejemplos
Lípidos			
Oleaginosa	-		Semillas de girasol, soja,
			maíz, lino, almendro
Hidratos de Carbono			
Alcoholígena	Monosacáridos	Glucosa	Pulpa de fruta
		Fructosa	Pulpa de fruta
	Disacáridos	Sacarosa	Caña de azúcar, sorgo
			dulce, remolacha
Inulínica / Amilácea	Polisacáridos	Insulina	Tubérculo de patata y rizomas de dalia
			Achicoria
		Almidón	Granos de cereal
			Tubérculo de patata
Lignocelulósica	Polisacáridos	Hemicelulosa	Maderas en general
		Celulosa	Residuos lignocelulósicos

Fuente: Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad (De Lucas et al., 2012).

- **Según su origen:**

- **Natural:** Se clasifica como la biomasa generada espontáneamente en ecosistemas donde no existe intervención humana, cuya explotación no suele ser rentable debido a los altos costos de adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización.
- **Residual:** Corresponde a la biomasa procedente de residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas e industriales, por ejemplo: residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería, residuos ganaderos, residuos líquidos y sólidos urbanos (RSU y ARU), entre otros.
- **Cultivos energéticos:** Son cultivos de especies vegetales destinados exclusivamente a la producción de biomasa para uso energético. Dentro de las especies forestales destacan el sauce, el eucalipto y el pino, y dentro las especies agrícolas destacan el cardo, el sorgo, entre otras (De Lucas et al., 2012).

- **Según su estado:**

- **Biomasa sólida:** Corresponde a materiales en estado sólido provenientes de la industria forestal y agrícola, además de residuos urbanos, residuos de madera y sus derivados, residuos de industrias que trabajan con biomasa (carpinterías, papeleras, etc.), residuos de podas, cultivos energéticos, residuos agroindustriales, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, entre otros.
- **Biomasa líquida:** Corresponde a sustancias en estado líquido provenientes de residuos ganaderos, residuos industriales biodegradables y aguas residuales urbanas (ARU), además de algunos aceites y biocarburantes como el bioetanol y el biodiésel.
- **Biomasa gaseosa:** Corresponde al metano o biogás obtenido a través de procesos termoquímicos y microbiológicos en rellenos sanitarios o biodigestores con residuos de animales, residuos agroalimentarios, etc. (De Lucas et al., 2012).

3.2.3 Ventajas y desventajas del uso de biomasa

A continuación, en la Tabla 3.2 se resumen las principales ventajas y desventajas del uso de biomasa para fines energéticos según Lienqueo (2012) y Basu (2010).

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del uso de biomasa.

Ventajas	Desventajas
Baja huella de carbono, ya que la biomasa al ser consumida solamente libera el dióxido de carbono que fue captado en el proceso de fotosíntesis.	Presenta menor densidad energética, implicando depósitos de almacenamiento de mayor tamaño en comparación con otros combustibles.
En sus procesos de obtención se generan cantidades muy bajas de contaminantes nitrogenados y sulfurados, por lo que no contribuye en el fenómeno de la lluvia ácida.	El rendimiento de los equipos que funcionan con biomasa tiende a ser menor que aquellos equipos de similares características que funcionan en base a fuentes de energía convencional.
Provee la oportunidad de reciclar una amplia gama de residuos ya sea de procesos forestales, silvoagropecuarios, entre otros.	Las zonas de cultivo energéticos de biomasa pueden llegar a competir con zonas de cultivos silvoagropecuarios o agrícolas para la producción de alimentos.
Presenta disponibilidad abundante en Chile, contribuyendo a disminuir la dependencia energética hacia los combustibles fósiles.	Cuando la biomasa proviene de origen residual es difícil tener control sobre la disponibilidad de este insumo energético.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Caracterización de la biomasa (Lienqueo, 2012) y Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory (Basu, 2010).

3.3 Biomasa y bioenergía en Chile y el mundo

3.3.1 Matriz energética mundial

Analizando primeramente el escenario energético mundial, según lo establecido por la International Energy Agency (IEA) en el “World energy balances 2019: Overview”, el suministro total de energía primaria a nivel mundial ha aumentado alrededor de 2,5 veces desde el año 1971, con un total de 5.519 [MTOE], hasta el año 2017 con 13.972 [MTOE]. Con respecto a la composición de la matriz energética, se aprecia que tanto en el pasado como en la actualidad los combustibles fósiles presentan un papel predominante dentro de esta, como se distingue en el año 1971, donde un 86% de la matriz se basó en estos combustibles y en el año 2017, un 81%. Dentro de los combustibles fósiles, el más utilizado corresponde al petróleo, sin embargo, su uso durante los últimos 45 años ha decaído en promedio en un 9%, en cambio el carbón y el gas natural han aumentado ligeramente su proporción. Con respecto a los biocombustibles, que ocupan el cuarto lugar dentro de los combustibles más utilizados, con un 10% del total, su proporción dentro de la matriz energética ha disminuido en 1% desde el año 1971 hasta el 2017. La utilización de energía hidroeléctrica ha permanecido constante a través del tiempo y la proporción de energía nuclear ha aumentado en un 4% dentro del período señalado en el Gráfico 3.2. Cabe destacar que, si bien se ha reducido el porcentaje de utilización de petróleo y de biocombustibles en proporción dentro la matriz energética mundial, el volumen utilizado de estos combustibles ha presentado un aumento debido a que los requerimientos energéticos actuales son considerablemente superiores a los requerimientos del año 1971, como se mencionó al inicio de este párrafo (International Energy Agency, 2019).

Matriz energética primaria mundial 1971 Matriz energética primaria mundial 2017

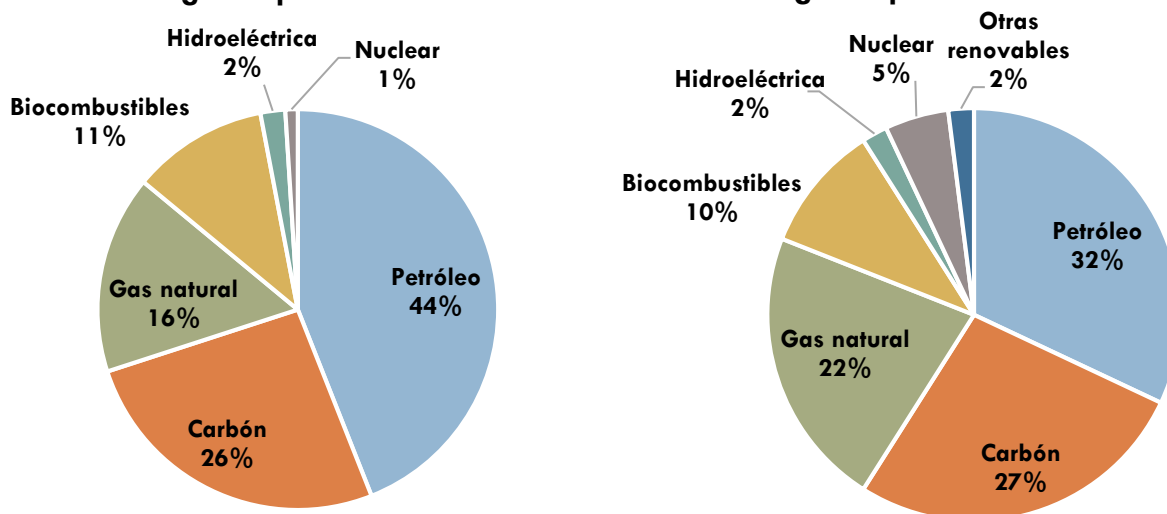


Gráfico 3.2 Matriz energética primaria mundial 1971 - 2017.

Fuente: Elaboración propia basada en World energy balances 2019: Overview (International Energy Agency, 2019).

En la actualidad, si bien la bioenergía compone el 10% de la matriz energética mundial, también constituye una fuente importante de energía renovable y representa más del 70% del total de producción correspondiente a las ERNC a escala mundial, contribuyendo en la demanda energética final cinco veces más que la eólica y la solar fotovoltaica combinadas en todos los sectores energéticos (IEA, 2017).

A continuación, en el Gráfico 3.3 se presentan los distintos usos finales para los que se emplea la bioenergía en la actualidad, los cuales se concentran principalmente en el sector de la generación de calor, sin embargo, el uso de biocombustibles en los sectores de electricidad y transporte está creciendo rápidamente debido al apoyo de diversas políticas al respecto. Se aprecia entonces, que más del 50% de la bioenergía generada mundialmente está relacionada con el uso tradicional de la biomasa, es decir, es utilizada para cocinar y calentar las viviendas mediante chimeneas o estufas simples con su respectivo impacto en la salud y el medio ambiente, ya sea directamente en edificios o en esquemas de calefacción distrital. Dentro del sector industrial el uso de bioenergía es común en las fábricas que generan residuos de biomasa, como la producción de pulpa de celulosa y papel, así como en el sector de procesamiento de alimentos. La IEA estima que, en el largo plazo, la bioenergía desempeñará un papel esencial en un sistema de energía con bajas emisiones de carbono (IEA, 2017).

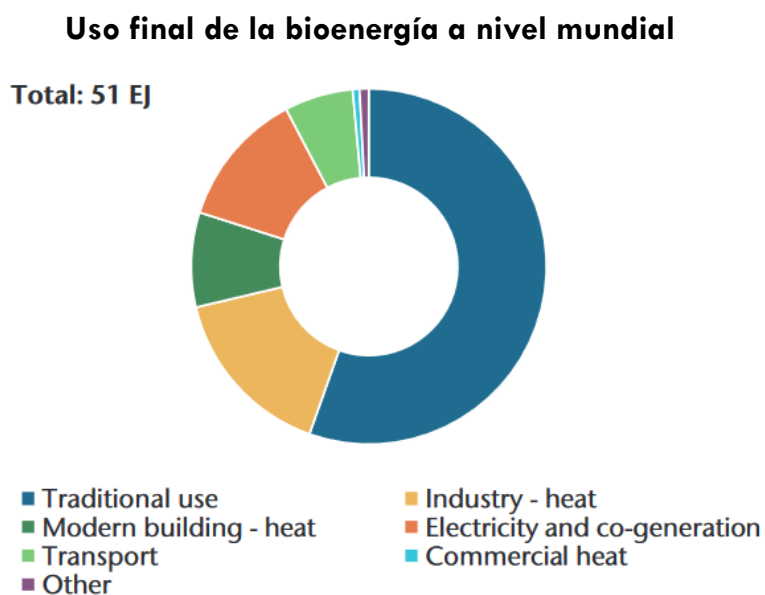


Gráfico 3.3 Uso final del consumo de bioenergía mundial.

Fuente Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (International Energy Agency, 2017).

3.3.1 Biomasa y bioenergía en Chile

El uso energético de la biomasa se encuentra ampliamente considerado en Chile, cuyas aplicaciones principales corresponden a la producción de gas, de energía calórica (térmica) y de energía eléctrica. El Balance Nacional de Energía contempla en su elaboración los siguientes tipos de biomasa: consumo de leña, derivados de leña (briquetas, *pellets*, carbón vegetal, despuntes de madera), licor negro, residuos orgánicos municipales líquidos y sólidos, además de residuos agrícolas (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015a).

Según Bellolio y Karelovic (2011) esta forma de energía entrega como ventaja al país la reducción de la cantidad de desechos que son enviados a rellenos sanitarios o vertederos, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, como también contribuye a diversificar la matriz energética nacional, que depende en gran medida de los mercados externos, principalmente de petróleo, gas y carbón.

El Gráfico 3.4 ilustra la diferencia entre la matriz energética nacional del año 2008 y del año 2017, basándose en información proporcionada por la Comisión Nacional de Energía [CNE] (2018) en el último balance energético nacional informado, donde destaca principalmente la disminución del uso de petróleo crudo de un 44% en el 2008, a un 29% en el año 2017, sin embargo, ha ocurrido un aumento tanto del uso de carbón como de gas natural. Destaca también la incorporación de la energía eólica, solar y biogás a la matriz. En el caso de la biomasa, se distingue un aumento del 5% aproximadamente entre los años 2008 y 2017.

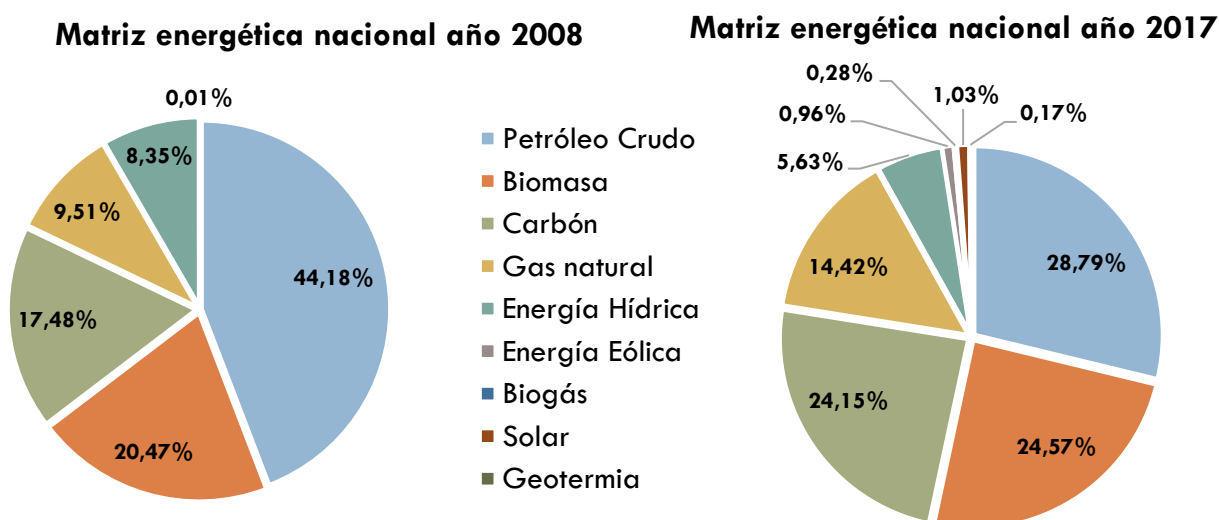


Gráfico 3.4. Matriz energética primaria nacional año 2008 y año 2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Balance Nacional de Energía (Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile, 2018).

Por lo tanto, considerando la información presentada por la CNE (2018), puede establecerse que a través de los años Chile ha ido diversificando su matriz energética, incorporando paulatinamente energías renovables, sin embargo, aún continúa presentando una gran dependencia hacia los combustibles fósiles, al igual que la matriz energética mundial (International Energy Agency, 2017). En el año 2017 la biomasa fue el segundo combustible más utilizado dentro de la matriz energética nacional, junto con el carbón y luego del petróleo crudo, lo que perfila a la biomasa como una fuente de energía que ha entrado en competencia directa con los combustibles fósiles (CNE, 2018).

Con respecto específicamente al consumo nacional de biomasa, de acuerdo con los datos de la CNE (2018), se puede apreciar detalladamente en el Gráfico 3.5 la tendencia a aumentar que ha presentado a través del tiempo el consumo de este tipo de energía, desde el año 2008 en adelante, si bien ha mostrado algunas variaciones durante el período, su tendencia final es al aumenta, llegando a un total de 80.026 [TCal] consumidas en el año 2017.

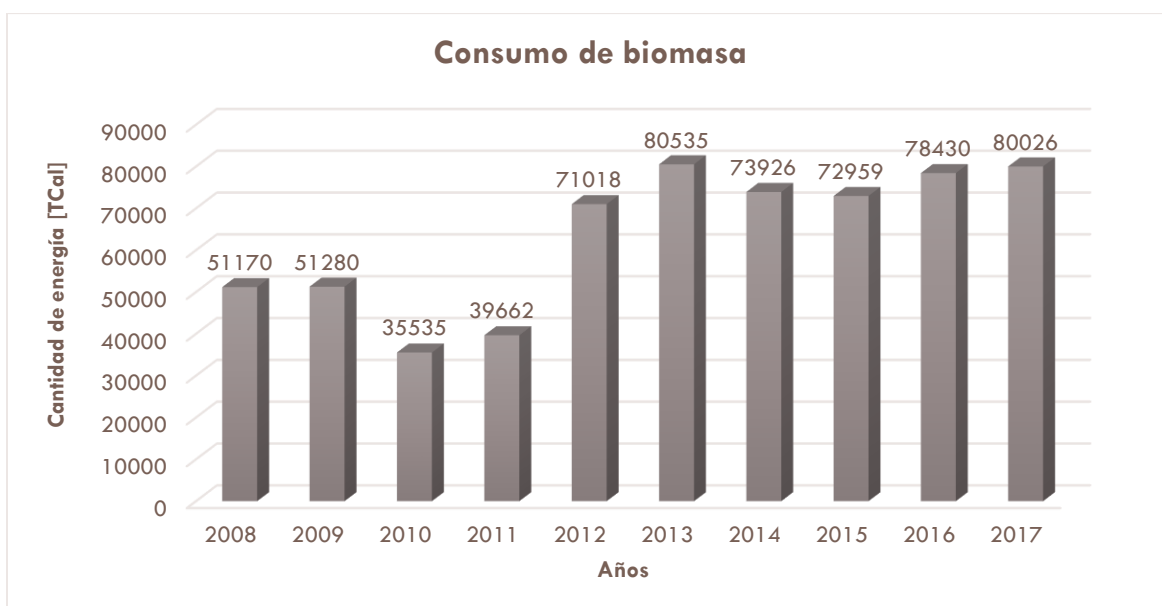


Gráfico 3.5. Consumo anual de biomasa en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Balance Nacional de Energía (Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile, 2018).

Por otra parte, tomando en consideración los diversos sectores que componen la matriz energética nacional establecidos por la CNE (2018), se aprecia en el Gráfico 3.6 aquellos sectores que fueron abastecidos de energía a través de diversos tipos de biomasa durante el año 2017, donde destaca principalmente el sector de Electricidad con 53%, seguido por el sector Industrial con un 25% y finalmente el sector Comercial, Público y Residencial con un 22%.

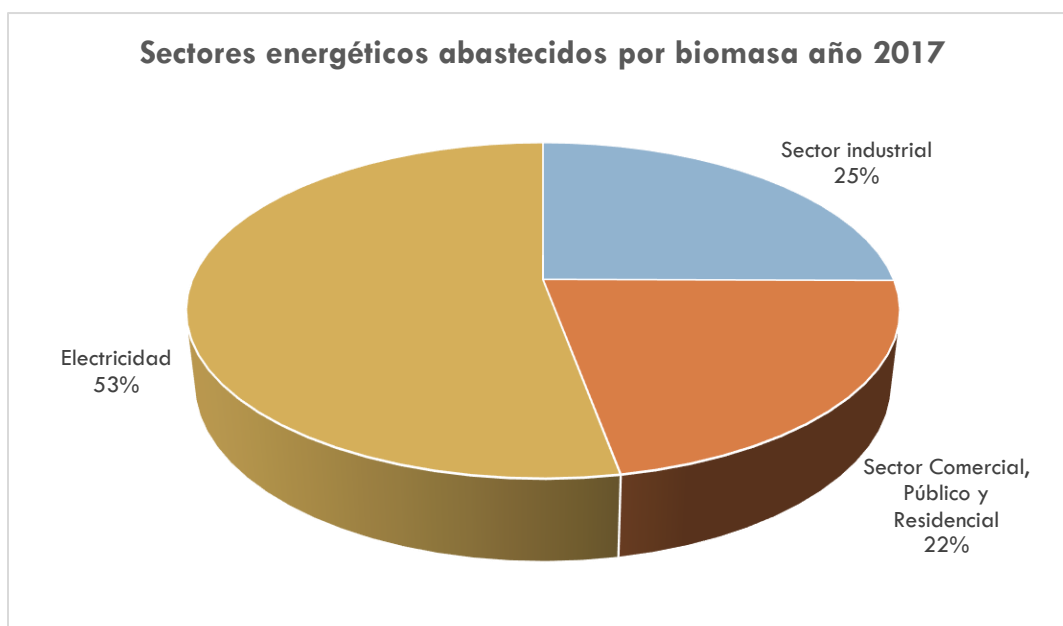


Gráfico 3.6. Sectores abastecidos por biomasa en el año 2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de Balance Nacional de Energía (Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile, 2018).

Con respecto al sector Electricidad, actualmente existen en Chile plantas de cogeneración eléctrica que aprovechan los residuos energéticos provenientes del proceso de producción de celulosa, como licor negro o cortezas, los que son utilizados para generar electricidad con el fin de ocuparla en sus procesos industriales o inyectarla directamente al Sistema Interconectado Central, lo cual ocurre también en el caso de las plantas termoeléctricas a biomasa. En el año 2017 se generó un total anual de 42.333 [TCal] de energía procedente de este sector. Con respecto al sector Industrial, destaca la obtención de energía a partir de la extracción de biogás desde rellenos sanitarios y del uso de leña y sus derivados. El total de energía consumida por este sector en el año 2017 fue alrededor de 17.604 [TCal] y para los sectores Comercial, Público y Residencial en conjunto correspondió a un total de 20.090 [TCal], donde se destaca principalmente la utilización de leña y sus derivados. (Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile, 2017).

3.3.1 Leña y sus derivados

La norma chilena NCh 2907 (2005) define a la leña como porciones de madera en bruto de troncos, ramas y otras partes de árboles y arbustos, que son utilizadas como combustible sólido residencial e industrial. Según el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015a) los diferentes sectores a los cuales la leña y sus derivados abastecen de energía corresponden principalmente al sector Industrial con más de un 50% del consumo total, seguido del sector Residencial con un 47% en el año 2015, como se aprecia en el Gráfico 3.7. Por otra parte, la leña también abastece al sector Comercial y Público con menos del 3%, y los demás sectores como el Minero, Transporte y Energético no son abastecidos por esta fuente.

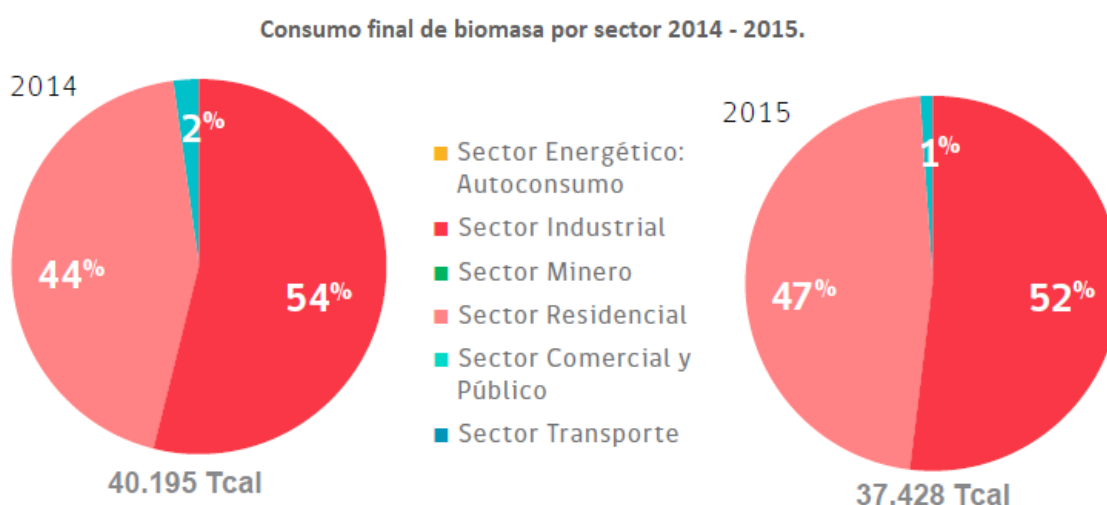


Gráfico 3.7. Consumo final de biomasa (leña y sus derivados) por sector 2014 – 2015.

Fuente: Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015a).

Considerando entonces específicamente el sector Residencial, según los datos aportados por una encuesta realizada por el Ministerio de Energía en el año 2015, cuyos resultados se publicaron en el informe titulado "Medición del Consumo Nacional de Leña y otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera", puede establecerse que en Chile la leña ocupa un lugar importante en el ámbito de la calefacción residencial, estimándose alrededor de 1.856.486 equipos instalados para la obtención de su energía, valor que tiene representatividad nacional, siendo esta cantidad considerablemente mayor al total de cada uno de los demás tipos de combustibles contemplados en la encuesta (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b), como se presenta en la Tabla 3.3.

De acuerdo con la información proporcionada por Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015b), y considerando la representatividad nacional de la muestra y las estimaciones realizadas en la encuesta, puede establecerse también que la cantidad de equipos utilizados para calefacción proveniente tanto de leña como de *pellets*, se concentran

principalmente en las regiones VIII (Región del Biobío) y XI (Región de la Araucanía). Comparando estos valores con las cantidades de equipos instalados para los demás tipos de combustible en las otras regiones del país, se aprecia que existe una mayor predominancia de aquellos que funcionan con gas y parafina concentrados principalmente en la Región Metropolitana y la V Región (Región de Valparaíso), lo cual se explica debido al gran número de habitantes que presentan estas zonas y la menor disponibilidad de leña y *pellets* en esas ubicaciones.

También es importante señalar que para el año 2015 solo existieron cuatro regiones a lo largo del país que presentaron cantidades significativas de equipos para obtener energía a base de *pellets*, siendo estas regiones la XIII (Región del Biobío), IX (Región de la Araucanía), XI (Región de Aysén) y XIV (Región de Los Ríos), cuyas cantidades de equipos para *pellets* comparadas tanto con leña como con el resto de los otros tipos de combustibles, son considerablemente menores, siendo en algunos casos hasta seiscientos veces menor, como ocurre en la IX Región, con aproximadamente 434 equipos instalados para quemar *pellets* en comparación con los 290.953 equipos instalados para quemar leña (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Tabla 3.3 Cantidad de equipos por tipo de combustible.

Región	Leña	Pellets	Carbón	Petróleo	Parafina	Gas	Electricidad
Zona Norte	42.017		0		31.723	49.250	3.192
V Región	100.835		3.028		68.916	262.013	178.255
VI Región	163.611		1.687		62.509	84.380	63.621
VII Región	230.129		7.040		63.462	88.545	38.783
VIII Región	454.956	7.582	3.732	1.429	85.789	86.071	80.008
IX Región	290.953	434	15.749		51.501	34.395	40.720
X Región	250.774		48.763	515	15.447	30.808	25.907
XI Región	38.505	74			1.466	3.584	3.045
XII Región	6.454				177	43.377	1.686
R.M	145.870		5652		494.414	990.558	218.763
XIV Región	132.385	447	25690		6.805	18.896	5.459
Total	1.856.489	8.537	111.340	1.944	882.209	1.691.876	659.438

Fuente: Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Ahora bien, considerando específicamente la leña y sus derivados, el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015b) establece la penetración en el mercado nacional que tuvo en el año 2015 el uso para calefacción residencial de leña, briquetas, *pellets*, carbón vegetal y despuntes, como se presenta en la Tabla 3.4, donde puede señalarse que la leña ocupa un porcentaje del 37,6% de penetración en el mercado, el cual resulta muy elevado

en comparación con los demás materiales contemplados, los que conjunto no superan el 4% de la penetración en el mercado nacional.

Por otra parte, también es importante señalar que existen regiones con una muy elevada penetración en el mercado respecto al consumo de leña para el sector Residencial donde sobresalen la XI Región (Región de Aysén) con un 99,3%, la X Región (Región de Los Lagos) con un 96,3% y la XIV Región (Región de Los Ríos) con un 94,6%, lo cual se condice también con la información proporcionada en Tabla 3.3 sobre la gran cantidad de equipos instalados para calefacción con leña en estas regiones (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Tabla 3.4 Penetración en mercado nacional de leña y sus derivados.

	LEÑA	BRIQUETA	PELLETS	CARBÓN VEGETAL	DESPUNTES
Zona Norte	7,2%	0%	0%	0%	1,8%
V Región	20,2%	0%	0%	0,6%	0%
VI Región	57,8%	0%	0%	0,7%	0%
VII Región	64,1%	0%	0%	2,2%	0%
VIII Región	73,7%	0%	1,3%	0,6%	0%
IX Región	91,2%	0,1%	0,1%	5,4%	0%
X Región	96,3%	2,5%	0%	20,9%	0%
XI Región	99,3%	0%	0,2%	0%	0,2%
XII Región	13,0%	0,2%	0%	0%	0%
R.M	8,9%	0,1%	0%	0%	0,1%
XIV Región	94,6%	1,7%	0,4%	0,6%	0%
Total	37,6%	0,2%	0,2%	2,5%	0,3%

Fuente: Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

3.3.1.1 Leña

Los datos presentados anteriormente demostraron que existe un amplio uso de la leña a nivel residencial en todas las regiones del centro-sur del país, lo que se fundamenta con el variado uso histórico de este tipo de biomasa, generándose un arraigo cultural y posicionándose como parte importante de la idiosincrasia de la población, teniendo en consideración que la leña constituye un combustible barato, asequible y de gran disponibilidad, debido a la abundancia de bosque y de productores que comercializan leña (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015a).

Con respecto a la comercialización de la leña, existen diversos formatos en que esta se distribuye, ya sea como astillas, canastos, sacos, metro lineal, metro granel, carretillas, triciclos y kilogramos. El Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015b) determinó que se consumieron un total de 11.926.411 [sm³] de leña por parte del sector Residencial en el año 2015. Sin embargo, cabe destacar que las actuales condiciones de consumo no son las más adecuadas, ya que actualmente la utilización de este tipo de biomasa se ha convertido en una importante fuente de contaminación, existiendo numerosas ciudades que han sido declaradas zonas saturadas debido a las altas concentraciones de material particulado respirable en el ambiente (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015a).

Por otro lado, existe una serie de factores que determinan la cantidad de energía que puede lograr obtenerse a partir de la leña, como por ejemplo el porcentaje de humedad que presenta, la normativa recomienda un contenido máximo del 25% de humedad en base seca, el cual está sujeto al correcto almacenamiento y secado de madera, también resulta determinante la densidad y sanidad de la leña, la correcta aislación térmica en las viviendas, minimizando las fugas de calor, y la utilización de equipos de combustión eficientes, con una correcta instalación y mantención. Considerando esto, se estima que la comercialización de la leña es altamente informal, donde aproximadamente el 90% de las ventas de leña son realizadas sin emitir boletas y sin cumplir con la normativa forestal vigente, siendo además de origen desconocido, pudiendo provenir de talas no autorizadas incumpliendo con los criterios mínimos de sustentabilidad del recurso e incluso perjudicando al bosque nativo. Esto se suma a la falta de un marco legal que regule la calidad de la leña comercializada y el correcto procedimiento para su combustión. Otro factor importante a considerar, es que un gran porcentaje de esta leña perteneciente al mercado informal, se distribuye con un alto contenido de humedad, lo que implica dificultades adicionales para lograr el correcto funcionamiento de los equipos de combustión, agregando además la existencia de calefactores ineficientes y viviendas con baja aislación térmica, por lo tanto la leña termina siendo el principal actor responsable de la contaminación atmosférica en las ciudades del centro-sur del país (Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA], 2016).

El mercado de la leña está constituido mayoritariamente por medianos y pequeños productores y comerciantes, estimándose un total alrededor de 5.000 en el centro-sur del país. En general el producto suele venderse en la misma región en donde es producido, ocasionando un impacto positivo en las economías locales respecto de los ingresos netos obtenidos por su venta. La compra de leña durante el año no es homogénea, distribuyéndose principalmente entre los meses de enero y abril con un 48% de las compras promedio al año, entre las regiones de O'Higgins y Aysén. Como ejemplo la Región de La Araucanía concentra más del 50% de las compras de leña anual entre los meses de menor

temperatura, desde mayo hasta agosto (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015a).

3.3.1.2 *Pellet*

La Norma Chilena sobre Biocombustibles Sólidos – Especificaciones y Clases, define a los *pellets* como “sólidos, generalmente de forma cilíndrica, fabricados a partir de partículas finas de madera sin tratar pulverizada y aglomerada, con o sin ayuda de ligantes. Se producen principalmente a partir de residuos de la industria de transformación mecánica de la madera. Con respecto al tamaño, forma y densidad, se comportan como un fluido, lo que facilita su transporte, su almacenamiento y su uso en sistemas de combustión automatizados, conformando un biocombustible sólido de alta calidad” (NCh ISO 17225, 2017).

Las propiedades de los *pellets* en general varían según sea el tipo de materia prima que los constituye, sin embargo, existen diversos estándares de calidad que limitan su contenido de cenizas, los productos químicos que presenta, su poder calorífico, entre otras de sus propiedades. Las características técnicas requeridas para *pellets* elaborados con biomasa leñosa, herbácea, de frutos, acuática y mezclas, han sido establecidas en la NCh ISO 17225 (2017), las cuales se resumen en la siguiente Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características técnicas para pellets con diversos orígenes.

Características	Pellets
Origen	Biomasa leñosa, biomasa herbácea, biomasa de frutos, biomasa acuática, conjuntos y mezclas
Tamaño	Diámetro: 6 – 25 [mm] Largo: 3,15 – 50 [mm]
Poder Calorífico Inferior (PCI)	> 18 [MJ/kg]
Contenido de Humedad	< 15%
Contenido de cenizas	< 0,5% - 10%
Durabilidad mecánica	> 95%
Densidad a granel	Mínimo 550 [kg/sm ³]
Nitrógeno (% en masa en base seca)	< 0,2% - 3%
Azufre (% en masa en base seca)	< 0,02% – 0,2%
Cloro (% en masa en base seca)	< 0,01% - 0,3%
Cantidad de aditivo	< 20% de la masa prensada

Fuente: Elaboración propia a partir de NCh ISO 17225 (2017).

Además de la norma de estandarización nacional para *pellets*, existen otros estándares internacionales relevantes, como es el caso de la certificación internacional ENplus del European Pellet Council (EPC), que otorga un sello de garantía para *pellets* de madera, presentes en el mercado de la calefacción, que cumplen con las características de calidad mínimas establecidas, realizando pruebas de calidad constantes tanto en el proceso de fabricación como en el de distribución. El esquema de certificación establece 3 categorías basadas en la norma ISO 17225-2, según las características técnicas del *pellet*: A1, A2 y B. En la Tabla 3.6 se aprecian las diversas características exigidas para cada categoría (European Pellet Council, 2015a).

Tabla 3.6 Propiedades pellets según clasificación ENplus.

Propiedad	A1	A2	B
Origen y fuente	-Leña del tronco del árbol - Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente	-Árboles enteros sin las raíces -Leña del tronco del árbol - Residuos de corta - Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente	- Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen - Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente -Madera procedente de otros usos, sin tratamiento químico
Diámetro	6 ± 1 u 8 ± 1 [mm]		
Largo (L)	3,15 < L < 40 [mm]		
Humedad	< 10 %		
Ceniza	< 0,7%	< 1,2 %	< 2,0 %
Durabilidad mecánica	> 98 %	> 97,5 %	
Poder calorífico inferior	> 16,56 [MJ/kg]		
Densidad (D) a granel	600 < D < 750 [kg/m³]		
Aditivos	< 2 %		
Nitrógeno	< 0,3 %	< 0,5 %	< 1,0 %
Azufre	< 0,04 %	< 0,05 %	
Cloro	< 0,02 %		< 0,03 %

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada en ENplus Handbook, Part 3-Pellet (European Pellet Council, 2015b).
Nota: Todos los porcentajes son en masa y en base seca.

Tabla 3.6 Propiedades pellets según clasificación ENplus (Continuación).

Propiedad	A1	A2	B
Arsénico		< 1,0 [mg/kg]	
Cadmio		< 0,5 [mg/kg]	
Cromo		< 10 [mg/kg]	
Cobre		< 10 [mg/kg]	
Plomo		< 10 [mg/kg]	
Mercurio		< 0,1 [mg/kg]	
Níquel		< 10 [mg/kg]	
Zinc		< 100 [mg/kg]	

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada en ENplus Handbook, Part 3-Pellet (European Pellet Council, 2015b).

Nota: Todos los porcentajes son en masa y en base seca.

➤ **Ventajas y desventajas del uso de pellets:**

El Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile (2015) establece que la utilización de pellets presenta las siguientes ventajas:

- No es un material peligroso ni produce malos olores.
- Presenta alta densidad de energía, por lo tanto, bajas necesidades de almacenamiento.
- Al ser biomasa CO₂ neutral ayuda a evitar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- Posee gran poder calorífico y produce muy poco residuo en forma de ceniza como resultante de la combustión.
- Las estufas y calderas para pellets están en parte subvencionadas por el Estado al ser una fuente de energía renovable.
- La mayoría de las estufas y calderas de pellets son automatizadas y funcionan sin requerir intervención, autorregulando su encendido, apagado y potencia.
- Las estufas para pellets son más eficientes que los calefactores a leña, alcanzando una eficiencia del 95% en comparación contra un 50 – 60% de los calefactores a leña tradicionales.

Por otra parte, con respecto a las desventajas de la utilización de *pellets* como fuente de energía, algunos autores como Ecotermia y Banico Spain (2018) y Fernández (2014) afirman que:

- Es recomendable utilizar esta biomasa solo con estufas o calderas especializadas para quemar *pellets*.
- El *pellet* debe presentar una calidad adecuada ya que aquellos de baja calidad pueden dañar la caldera o estufa.
- Deben ser almacenados en un lugar seco, ya que pueden absorber humedad o convertirse en serrín y perder sus propiedades.
- Los sistemas para combustionar *pellets* son en general más costosos que los equipos para quemar leña.
- En general requieren un mayor espacio y atención para obtener un buen rendimiento

➤ **Mercado de *pellets* en Chile:**

En relación con el mercado de *pellets* en Chile, en el año 2006 aparecen por primera vez tres proyectos relacionados con la fabricación de *pellets*. El rubro comienza a expandirse rápidamente y se introducen marcas europeas. En el año 2014 ocurre una crisis por quiebre de stock, ocasionado por una deficiente comunicación entre productores e importadores. Para el año 2015 aumentó la oferta, alcanzando en el año 2016 una demanda aproximada de 60.000 [t] de *pellets*. Con respecto al año 2017 la producción nacional aumentó a un total de 78.200 [t], como se observa en el Gráfico 3.8, distribuidas principalmente hacia las regiones del Biobío (VIII), La Araucanía (IX), el Maule (VII) y Los Lagos (X). Los segmentos abastecidos por esta variedad de biomasa correspondieron en un 75% a hogares, un 15% a instituciones y un 10% a industrias. (Asociación Chilena de Biomasa, 2017a).

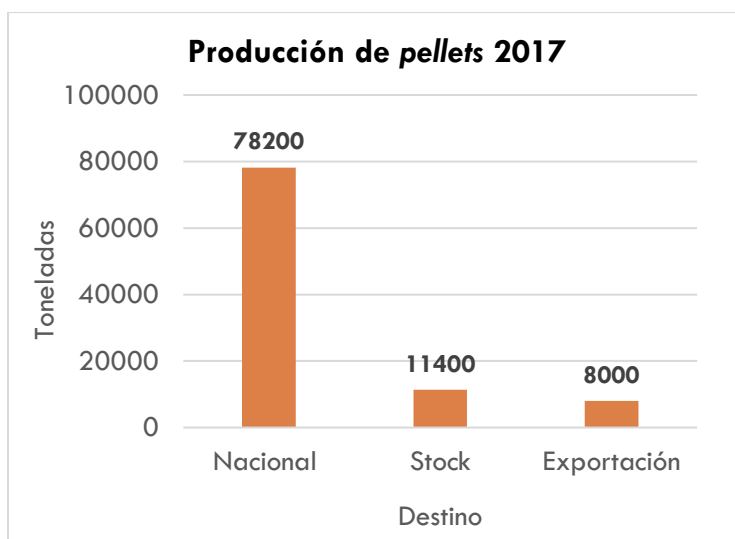


Gráfico 3.8 Producción anual nacional pellets 2017.

Fuente: Elaboración propia con datos de Mercado del pellet en Chile (Asociación Chilena de Biomasa, 2017b).

Dentro de la producción total para el año 2017 también se contemplaron 8.000 [t] respectivas a exportación de *pellets* hacia otros países y un excedente de 11.400 [t].

La Asociación Chilena de Biomasa realizó también una proyección de la demanda de *pellets* desde el año 2016 hasta el año 2025, considerando que se cumple el plan de Gobierno que impulsa el uso de este material. Se proyecta que para el año 2020 exista una demanda aproximada de 150.000 [t] y para el año 2025 se espera triplicar la demanda actual con 300.000 toneladas en total, como se aprecia en el Gráfico 3.9 (Asociación Chilena de Biomasa, 2017c).

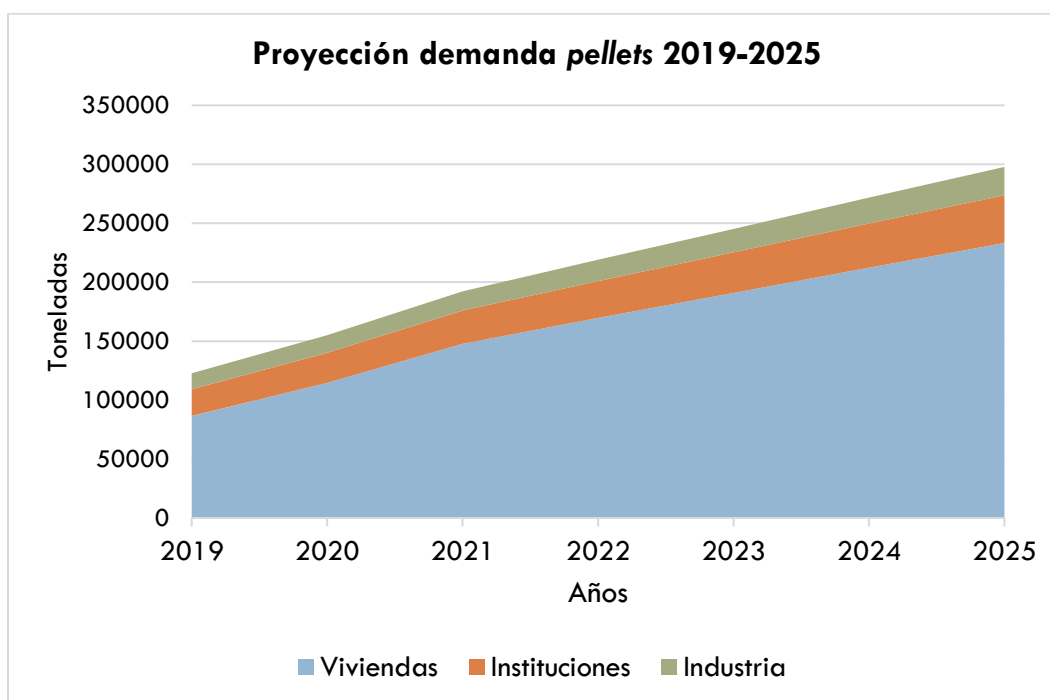


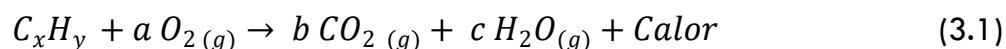
Gráfico 3.9 Proyección demanda pellets por segmento.

Fuente: Elaboración propia con datos de Mercado del pellet en Chile (Asociación Chilena de Biomasa, 2017b).

3.4 Proceso de combustión

La combustión consiste en un conjunto de reacciones de oxidación exotérmicas generadas debido a la interacción entre dos elementos principales: el combustible, que corresponde a un hidrocarburo en estado sólido, líquido o gaseoso, y el comburente que equivale a una sustancia oxidante. La mayoría de los combustibles, independiente del estado de la materia en que se encuentren, están compuestos básicamente por carbono e hidrógeno además de otros elementos en menor cantidad como azufre, nitrógeno, cloro, humedad, etc. El comburente u oxidante universal es el oxígeno presente en el aire, que se constituye por una mezcla de oxígeno (21%) y nitrógeno (79%). En algunos casos especiales se utiliza como comburente atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (Martínez, 1992).

La reacción química general que describe este proceso es la siguiente:



Los productos principales de la combustión son dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O), si bien el combustible en la Ecuación 3.1 está representado por un hidrocarburo de la forma C_xH_y, en la práctica, al contener otros elementos, se generan también diferentes productos de combustión relacionados, por ejemplo, si el combustible presenta azufre en su composición, los productos de combustión contendrán entonces óxidos de azufre. Cuando el combustible contiene nitrógeno en su estructura, este se libera en primera instancia como radical libre, para posteriormente formar NO o NO₂. En el caso del nitrógeno presente en el aire, ocurre que absorbe el calor sensible generado en el proceso, presentando una tendencia a ser muy estable y en general no experimenta cambios significativos durante la combustión, sin embargo, existe una pequeña cantidad que sí reacciona formando óxidos de nitrógeno (NO_x) cuando las condiciones de temperatura son elevadas, por lo que se conoce como NO_x térmico (García, 2001; Fernández, 2010).

En la Figura 3.4 se ilustra un diagrama de la combustión y de la composición de los gases emitidos en el proceso. A medida que se va consumiendo el combustible, la cantidad de CO₂ aumenta gradualmente hasta llegar a un punto donde comienza a descender cuando ya se ha quemado todo el carbono presente en el hidrocarburo. Por otra parte, el oxígeno recién comienza a aumentar cuando la combustión ha finalizado, adicionalmente también aparece monóxido de carbono (CO), cuyos niveles aumentan cuando el combustible comienza a agotarse, y desciende cuando el combustible ya se consume completamente (Testo A.G, 2003).

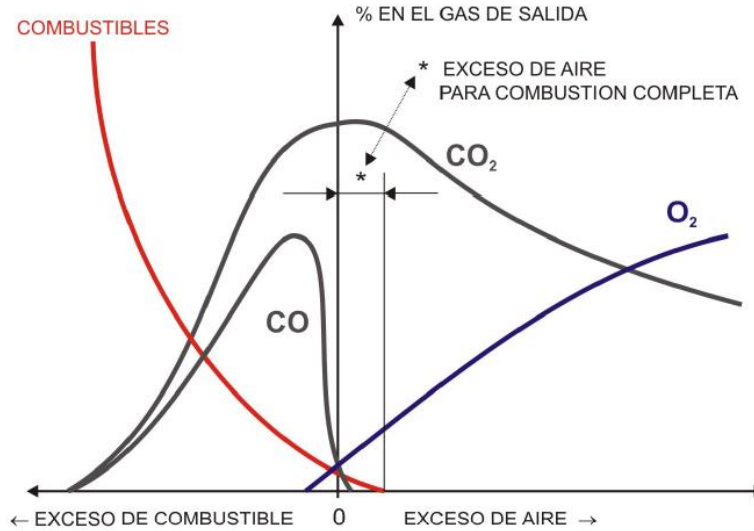


Figura 3.4 Composición del gas de salida de la combustión.

Fuente: Análisis de gases de combustión en la industria: Guía Práctica para medir Emisiones y Procesos (Testo A.G, 2003).

En general, los procesos reales de combustión no se llevan a cabo en condiciones ideales. Cuando se le suministra al proceso un volumen estequiométrico exacto de oxígeno, este no llega a ser suficiente para quemar completamente el combustible debido al gran tamaño de sus partículas en comparación con las del oxígeno, por lo que no se propicia una correcta mezcla entre los elementos, la dificultad del mezclado será mayor mientras más grandes sean las partículas del combustible, por lo tanto, para compensar este efecto, el proceso de combustión requiere un suministro mayor de oxígeno que el valor dado por la estequiometría de la reacción, esta diferencia denominada “coeficiente de exceso de aire”, es nombrada con la letra griega λ y se define como la razón entre la masa de oxígeno real y la masa de oxígeno teórico estequiométrico, indicado en la Ecuación 3.2, el cual puede representarse también como porcentaje de exceso de aire, según se define en la Ecuación 3.3 (Testo A.G, 2003).

$$\lambda = \frac{[g] O_{2 \text{ real}}}{[g] O_{2 \text{ teórico}}} \quad (3.2)$$

$$\% \text{ Exceso de aire} = \frac{[g] O_{2 \text{ real}} - [g] O_{2 \text{ teórico}}}{[g] O_{2 \text{ teórico}}} * 100 \% \quad (3.3)$$

$\lambda = 1$: representa una combustión con la cantidad estequiométrica exacta de oxígeno, es decir un porcentaje de exceso de aire del 0%.

$\lambda < 1$: representa una combustión con deficiencia de oxígeno.

$\lambda > 1$: representa una combustión con exceso de oxígeno.

El exceso de aire en la combustión depende de muchos factores, la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración [ATECYR] (2007) y Testo A.G (2003) señalan que el λ depende principalmente de las siguientes condiciones:

- Tipo, preparación y características del combustible.
- Diseño del horno o caldera de combustión, que define el espacio disponible para que se desarrolle el proceso.
- Diseño del quemador, el cual define la mezcla combustible/comburente y el tiempo de permanencia del proceso en la caldera.
- Velocidad de infiltración del aire.
- Condiciones ambientales.
- Temperatura de alimentación del combustible.

Por ende, un mismo combustible tendrá distintos valores de exceso de aire en diferentes hornos de combustión, ocasionando que no pueda establecerse un ajuste universal del factor λ para cada combustible.

➤ **Rendimiento:**

El rendimiento de combustión da indicios de la pérdida de energía asociada al exceso de aire utilizado en la combustión, al comparar las emisiones de CO_2 respecto a la cantidad que se debería producir estequiométricamente (Burschel, Hernández y Lobos, 2003). La fórmula para calcular el rendimiento de combustión se aprecia en la Ecuación 3.4.

$$\% \text{ Rendimiento de combustión} = \frac{CO_{2 \text{ medido}}}{CO_{2 \text{ estequiométrico}}} * 100\% \quad (3.4)$$

Dónde,

$CO_{2 \text{ medido}}$: porcentaje de CO_2 medida en los gases de combustión.

$CO_{2 \text{ teórico}}$: porcentaje de CO_2 teórico estequiométrico, con $\lambda=1$.

Por otra parte, el rendimiento de quemado señala cuánto es lo que realmente se logra quemar del combustible, considerando la formación de CO_2 en los gases de escape en comparación con la cantidad que debería producirse teóricamente con el exceso de aire real utilizado. Este valor da indicios del beneficio que confiere el combustible generando calor, al evaluar las pérdidas por combustible sin quemar en el proceso (Burschel, Hernández y Lobos, 2003). La fórmula de cálculo del rendimiento de quemado se expresa en la Ecuación 3.5.

$$\% \text{ Rendimiento de quemado} = \frac{CO_{2 \text{ medido}}}{CO_{2 \text{ teórico real}}} * 100\% \quad (3.5)$$

Donde,

$CO_{2\text{ medido}}$: porcentaje de CO_2 medida en los gases de combustión.

$CO_{2\text{ teórico real}}$: porcentaje de CO_2 teórico real, con λ =exceso real de aire.

El rendimiento máximo de combustión presenta un punto óptimo relacionado con el factor de exceso de aire, como se aprecia en el Gráfico 3.10. Cuando disminuye el factor λ , el rendimiento de la combustión tiende a descender, debido a que el combustible no logra oxidarse completamente originando productos no quemados como el monóxido de carbono (CO). En cambio, al aumentar el exceso de aire por encima de su valor óptimo, el rendimiento también tiende a disminuir, ya que una parte del calor liberado en el proceso se destina a calentar un mayor volumen de aire (ATECYR, 2007).

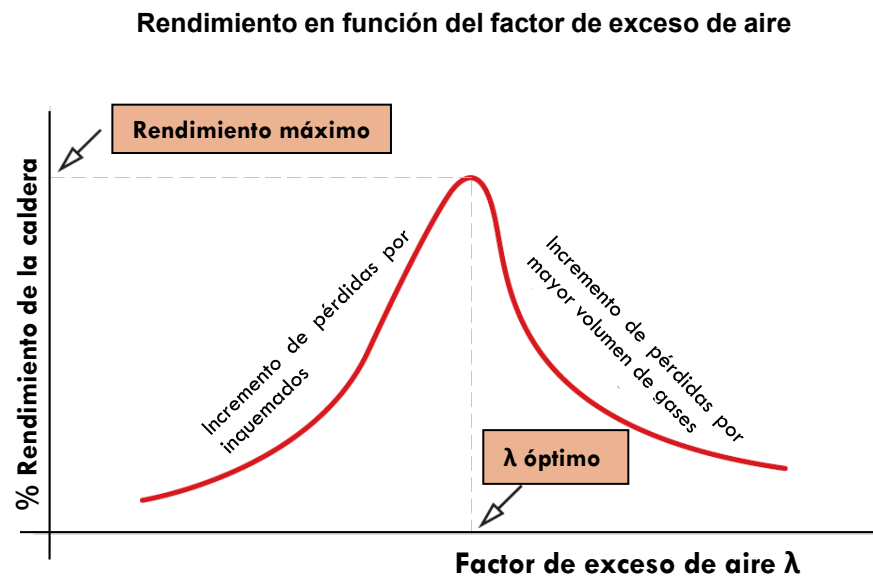


Gráfico 3.10 Rendimiento de combustión en función del exceso de aire.

Fuente: Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas. (ATECYR, 2007).

➤ Tipos de combustión:

La cantidad mínima de oxígeno necesario para quemar completamente todos los componentes de un combustible, es decir, la cantidad de oxígeno estequiométrica está sujeta a la composición elemental del combustible. El exceso de oxígeno es muy relevante para el óptimo desarrollo de la combustión (García, 2001). A continuación, se presentan clasificaciones respecto a la cantidad de aire que se les suministró:

Combustión con defecto de aire: en este caso la cantidad de aire suministrada no contiene oxígeno suficiente para oxidar por completo los componentes del combustible, por lo que además de los productos usuales de la combustión (CO_2 y H_2O), también se generan otros

productos como el monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), hollín, incluso en algunas situaciones con excesiva deficiencia de aire, pueden existir cantidades de carbono y combustible sin quemar en las emisiones (Martínez, 1992).

Combustión estequiométrica: ocurre cuando se emplea la cantidad exacta de oxígeno requerido en el proceso, es decir, el aire empleado corresponde al mínimo teórico necesario para oxidar completamente el combustible (García, 2001).

Combustión con exceso de aire: en esta reacción la cantidad de aire aportada es superior a la correspondiente al valor estequiométrico, en estas condiciones la combustión puede resultar completa o incompleta:

- **Combustión completa:** para este caso se utiliza un exceso de aire adecuado y el combustible se logra oxidar en su totalidad, por lo tanto, la combustión no genera sustancias no quemadas en sus emisiones, como CO, H₂, entre otras. Este tipo de combustión se caracteriza por presentar O₂ en sus emisiones.

- **Combustión incompleta:** si bien en esta situación la cantidad de aire utilizada es superior a la cantidad estequiométrica, de todas formas, el combustible no logra oxidarse por completo debido a la falta de mezclado entre el combustible y el aire. Este tipo de reacción se caracteriza por la presencia de componentes no quemados en los gases de combustión, como hollín, CO, H₂ o hidrocarburos (Martínez, 1992).

En la Figura 3.5 se comparan las situaciones descritas anteriormente y se logra apreciar las diferencias entre las proporciones de los gases emitidos en cada caso.

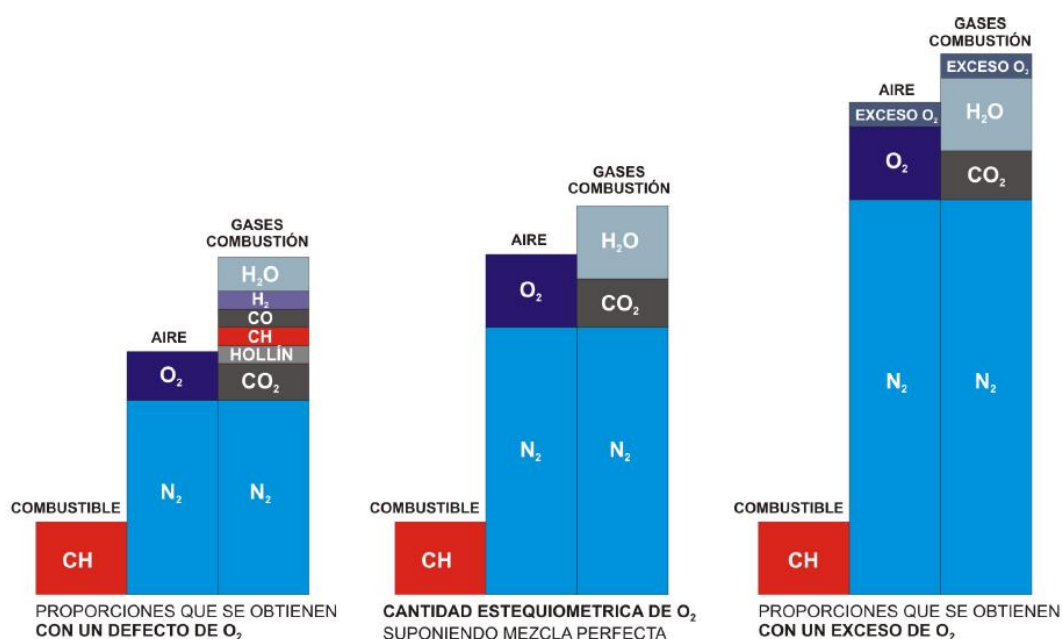


Figura 3.5 Composición de los gases de salida en función de la cantidad de O₂.
Fuente: *Análisis de gases de combustión en la industria: Guía Práctica para medir Emisiones y Procesos* (Testo A.G, 2003).

Por otra parte, una de las características que distingue a la combustión comparada con otros procesos de oxidación, es que representa un proceso de oxidación rápida y con presencia de una llama estable. Para propiciar el adecuado comienzo y desarrollo de la combustión es necesario que se cumplan ciertos requisitos:

- **Tiempo:** resulta muy relevante que el combustible permanezca un período de tiempo suficiente dentro del horno para que logre quemarse por completo.
- **Temperatura:** provee de energía de activación para desencadenar la reacción de combustión, si la temperatura no es lo suficientemente alta el combustible tardará o en encenderse, por lo tanto, es relevante mantener la temperatura correcta, garantizando que el combustible se queme rápidamente y libere toda la energía que posee.
- **Turbulencia:** la presencia de un ambiente turbulento propicia una adecuada mezcla entre el combustible y comburente. El flujo al cual se suministrará aire en el horno es un factor importante para lograr la mezcla requerida. Una mezcla incorrecta da como resultado el escape de hidrocarburos sin quemarse (Fernández, 2010).

➤ **Poder calorífico:**

Una de las propiedades más importantes de los combustibles corresponde al Poder Calorífico (PC), que equivale a la cantidad máxima de energía térmica almacenada que el combustible es capaz de liberar en la reacción de combustión, considerando una unidad de masa o volumen del combustible, la cual se puede clasificar en:

- Poder calorífico Superior (PCS): mide la cantidad total de calor que puede desprender la reacción completa de combustión, sin embargo, una parte de este se emplea como calor latente en la evaporación del agua que contiene el combustible, por lo tanto, no queda disponible para ningún uso térmico deseado.
- Poder calorífico Inferior (PCI): también conocido como Poder Calorífico Neto (PCN), refleja la cantidad de calor que se desprende la reacción completa del combustible, pero excluye el calor latente de vaporización del agua. Mientras mayor sea el contenido de humedad que presenta un combustible, mayor será la diferencia entre el PCS y PCI, y además será menor será la energía total disponible (Food and Agriculture Organization [FAO], 2015).

3.5 Biomasa residual industrial

La biomasa residual industrial se define como el conjunto de materiales de origen orgánico que se genera en actividades productivas de transformación y consumo, en cuyo contexto no presenta un valor económico y que en general debe retirarse para facilitar o mejorar el proceso de producción (Ruiz, Wolff y Claret, 2015). Estos residuos están condicionados a la actividad industrial que los ocasiona, como se mencionó en el Capítulo 3.2.2 sobre la clasificación de la biomasa y dependiendo de su origen pueden subclasificarse en residuos vegetales o animales de acuerdo con los autores Manterola, Cerda y Mira (1999), como se aprecia en la siguiente Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Subclasificación biomasa residual industrial.

De origen vegetal	
De cultivos frutales	De origen industrial
Frutas de desecho Pajas de cereales Hojas y coronta de remolacha y maíz Vainas y envolturas Chapoda de frutales	Subproductos de la industria vitivinícola Subproductos de la industria cervecera Subproductos de la industria azucarera Subproductos de la industria aceitera Subproductos de la industria arrocería Subproductos de la industria hortifrutícola Subproductos de la industria forestal
De origen animal	
De la industria avícola	De la industria porcina y bovina
Cama de broiler Excretas de ponedoras Harina de vísceras Harina de plumas	Fecas Harina de sangre Desechos de matadero

Fuente: Los residuos agrícolas y su uso en la alimentación de rumiantes (Manterola, Cerda y Mira, 1999).

Según lo indicado en la Tabla 3.7, si bien existen diversos orígenes de donde puede provenir la biomasa residual industrial, esta investigación se centrará específicamente en la biomasa residual agrícola y forestal, debido a que estas variedades presentan relevancia nacional teniendo en cuenta el gran volumen de residuos que se generan anualmente en estas actividades (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2017; Gysling y Soto, 2015).

Es importante señalar que la Corporación Nacional Forestal [CONAF] (2018a) informa que tanto en el pasado como en la actualidad, el fuego es utilizado como método de eliminación de grandes volúmenes de residuos vegetales en las faenas agrícolas y forestales, con el objetivo de habilitar rápidamente para otros propósitos la superficie que estos residuos ocupan, como también para eliminar enfermedades que estén afectando a los cultivos. Se

estima que entre el 80% y el 90% de la superficie con rastrojos de trigo presente en las regiones del Biobío y de La Araucanía se maneja efectuando la quema de estos materiales (Taladriz y Schwember, 2012). Sin embargo, a pesar de ser una práctica tan extendida debido a su bajo costo, este procedimiento implica una gran cantidad de desventajas, considerando primeramente que se está desaprovechando una importante cantidad de energía que podría ser utilizada de otra manera, para generar por ejemplo calor o electricidad. Algunos autores, como Bertran y Morales (2008) estiman que los residuos forestales en Chile, utilizándose entre un 60% a un 75%, tienen la capacidad potencial de generar entre 310 a 470 [MW] de energía. Por otra parte, la quema de estos residuos, al dejar la superficie del terreno al descubierto, facilita el proceso de erosión hídrica y degradación del suelo, además de producir un desequilibrio ecológico afectando negativamente a la fauna y la microflora presente en el terreno, ocasiona también la disminución de la materia orgánica que este contiene (Ruiz et al., 2015). Según lo indicado por Taladriz y Schwember (2012) al realizar la quema de rastrojos en un cultivo se desaprovecha entre el 98% al 100% del nitrógeno contenido en los residuos, entre el 70% al 90% del azufre y además entre el 20% al 40% del fósforo y potasio.

La quema de residuos agrícolas y forestales también contribuye en la producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). A continuación, en la Tabla 3.8 se presenta una estimación de los GEI generados anualmente a partir de la quema de residuos dentro de los cultivos más importantes en la Región del Biobío (trigo harinero, maíz, raps y cebada). Se aprecia que con respecto al N_2O , se emite una cantidad anual entre 0,3 a 0,7 kilogramos por hectárea quemada de rastrojos, por otra parte, se genera también una cantidad entre 13,0 a 28,7 kilogramos por hectárea de CH_4 y entre 100 a 230 kilogramos por hectárea de N_2O , dependiendo del cultivo que se examine. Cabe destacar que el maíz es el cereal que libera más cantidad de emisiones dentro de esta estimación, debido a que su cultivo genera un mayor número de biomasa residual en comparación con los demás cereales estudiados (Ruiz et al., 2015).

Tabla 3.8 Estimación de GEI emitidos por quema anual de rastrojos en la Región del Biobío.

Clase de quema	Paja (t/ha)	Óxido nitroso N_2O (t/ha)	Metano CH_4 (t/ha)	N_2O , equiv. a CO_2 (t/ha)	CH_4 , equiv. a CO_2 (t/ha)
Rastrojos de trigo harinero	6,3	0.0003	0.0130	0.10	0.27
Rastrojos de maíz p/consumo	13,9	0.0007	0.0287	0.23	0.60
Rastrojo de raps	8,8	0.0005	0.0182	0.15	0.38
Rastrojos de cebada	6,8	0.0004	0.0140	0.11	0.29
Otros rastrojos	6,3	0.0003	0.0130	0.10	0.27

Nota: El cálculo de las emisiones por hectárea asumen quema de rastrojos con 10% humedad, 85% eficiencia de quema y coeficientes 0.07 y 2.7 para N_2O y CH_4 respectivamente).

Fuente: Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales (Ruiz, Wolff y Claret, 2015).

De la misma manera, además de los gases de efecto invernadero, la quema de estos residuos genera también emisiones de otros gases contaminantes, como monóxido de carbono (CO), compuestos nitrogenados (NO₂), hidrocarburos y material particulado de diversos tamaños. En la Tabla 3.9 se presenta una estimación de la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera anualmente, producto de la quema de rastrojos de trigo en la Región del Biobío, donde destaca principalmente la gran emisión de monóxido de carbono, con un total de 10.578 toneladas al año, seguido por la generación de hidrocarburos con 1.851 toneladas y de PM10 con 1.322 toneladas. Para efectos de esta estimación se consideró una superficie de 29.384 [ha] quemada con residuos agrícolas (Ruiz et al., 2015).

Tabla 3.9 Estimación de gases y material particulado emitidos anualmente por quemas de rastrojos de trigo en la Región del Biobío.

Algunos gases liberados en las quemas	kg/ha	Total liberados (t)
Monóxido de carbono (CO)	360	10.578
Compuestos nitrogenados (NO ₂)	13,5	397
Hidrocarburos	63	1.851
Material particulado	45	1.322

Nota: La estimación fue realizada considerando la quema de 29.384 [ha] de rastrojos de trigo.

Fuente: Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales. (Ruiz, Wolff y Claret, 2015).

Para tener un control sobre la cantidad de quemas que se realizan en el territorio nacional y así evitar incendios forestales, en el año 1925 se promulgó la Ley de Bosques, la cual está vigente actualmente. En esta normativa se define el concepto de bosque y se prohíbe la roza a fuego como sistema de explotación de terrenos forestales, además se autoriza el uso de fuego para destruir vegetación arbórea solamente con el propósito de habilitar terrenos agrícolas (Decreto Supremo N°4363, 1931). Sin embargo, más adelante fue necesario establecer medidas para que el fuego se maneje de forma segura y controlada, lo cual fue estipulado en el Decreto Supremo 276/1980 del Ministerio de Agricultura modificado en el año 2016, donde se señala que una quema controlada equivale a “la acción de usar el fuego para eliminar residuos agrícolas y forestales en forma dirigida, circunscrita o limitada a un área previamente determinada, conforme a normas técnicas preestablecidas, con el fin de mantener el fuego bajo control” (Decreto Supremo N°34, 2016). Esta legislación también establece objetivos específicos que debe perseguir la quema de residuos y define un protocolo de acción para obtener la debida autorización para quemar este tipo de residuos. Los organismos encargados de fiscalizar esta actividad, desde la Región de Arica y Parinacota hasta Magallanes, corresponden a la Corporación Nacional Forestal y a Carabineros de Chile (Decreto Supremo N°34, 2016).

Conforme con las últimas estadísticas que maneja CONAF (2018b), sobre el número de avisos anuales de quemas controladas, se elaboró a continuación, en el Gráfico 3.11, un resumen de la cantidad de quemas que han sido autorizadas desde el año 2010 en adelante, clasificadas según la variedad de residuo quemado, ya sea del tipo agrícola, forestal o mixto. Se distingue que el número de quemas de residuos agrícolas ha presentado fluctuaciones a través del tiempo, sin embargo, su tendencia general es al alza, con más de 12.000 quemas anuales desde el año 2012. Por otra parte, la quema de residuos forestales se ha mantenido relativamente constante al pasar de los años, con cantidades que fluctúan entre 900 y 1.300 quemas al año. Con respecto al número de quemas de residuos mixtos, se aprecia que son efectuadas muy pocas y no superan las 250 quemas anuales. Al comparar la cantidad de quemas controladas con respecto a los diversos tipos de residuos, se aprecia que las quemas de residuos agrícolas son considerablemente superiores en cantidad a las quemas de residuos forestales y mixtos, siendo aproximadamente diez veces más numerosas, por ejemplo, en el año 2017 se llevaron a cabo alrededor de 16.000 quemas con residuos agrícolas, en cambio solo se efectuaron aproximadamente 1.400 quemas con residuos forestales (CONAF, 2018b).

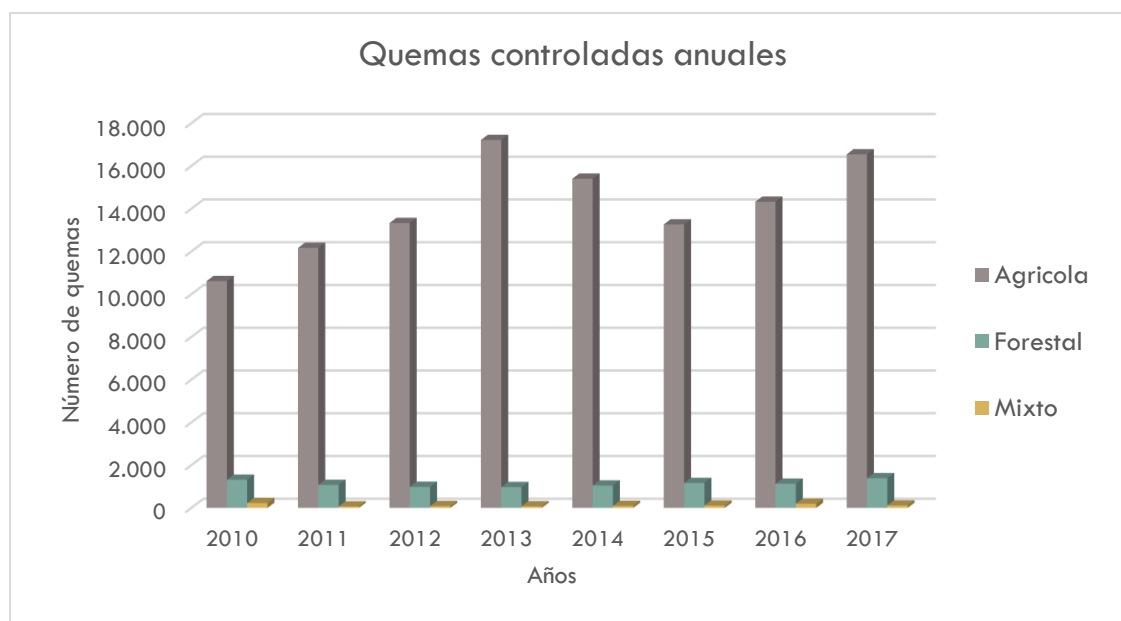


Gráfico 3.11 Cantidad anual de quemas controladas.

Fuente: Elaboración propia con información de Número de Avisos y superficie tratada por tipo de quemas 1981-2017, (CONAF, 2018b)

Ahora bien, al considerar otros datos proporcionados por CONAF (2018b), se presenta en el Gráfico 3.12 la distribución de las superficies quemadas con residuos agrícolas y forestales para cada región del país en el año 2017. Se establece entonces, que el mayor número de hectáreas con residuos sometidas a quemas controlados a nivel nacional se concentra en la zona sur del país, principalmente en la Región de La Araucanía (IX) con más

de 150.000 hectáreas quemadas, y también en la Región del Biobío (VIII) con alrededor de 50.000. Las demás regiones del territorio nacional presentan superficies quemadas notablemente inferiores a lo anunciado en las dos zonas anteriores. Se destaca además, que al comparar la información del Gráfico 3.12 con lo expuesto en el Gráfico 3.11 existen coincidencias en lo referente al número de quemas controladas de residuos agrícolas y a la superficie destinada para este propósito, donde estos residuos presentan valores considerablemente superiores al número y superficie de quemas realizadas con residuos forestales en todas las regiones del país (CONAF, 2018b).

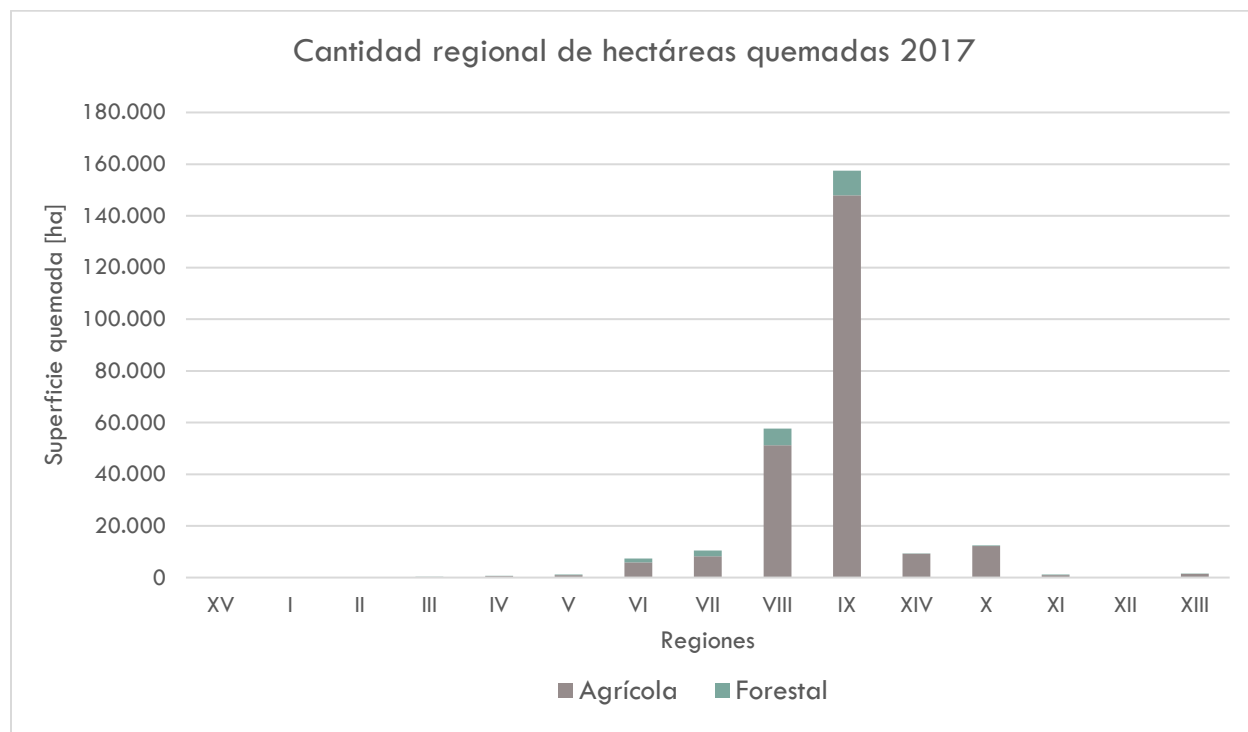


Gráfico 3.12 Superficie quemada con residuos agrícolas y forestales año 2017.

Fuente: Elaboración propia con información de Número de Avisos y superficie tratada por tipo de quemas 1981-2017, (CONAF, 2018b)

3.5.1 Biomasa residual de la industria agrícola

La biomasa residual agrícola está constituida por porciones de materia orgánica vegetal que no son cosechadas en los cultivos para su comercialización o para alimentación humana, debido a que no cumplen con las características mínimas de calidad para ser vendidas como tal, ya que habitualmente se generan a partir de podas y limpiezas con el fin de evitar plagas e incendios en los cultivos (Ruiz et al., 2015).

Estos residuos constituyen una serie heterogénea de materiales que tienen en común la característica de presentar ciertas dificultades de eliminación, entre ellos destacan: tallos,

raíces, hojas, paja, cáscaras, granos, huesos, zuros, orujos, malezas, plantas enfermas, tocones, etc. (De Gregorio, 2015).

La cantidad de residuos generados es habitualmente muy variable y está sujeta a diversos factores como el manejo del cultivo, el rendimiento y el tipo de suelo, lo que ocasiona la existencia de variaciones en los niveles de residuos emitidos en cada área agroecológica. (De Gregorio, 2015). Ruiz et al. (2015) señalan que la cantidad de residuos producidos en los cultivos de cereales puede estimarse en función de su índice de cosecha (IC), el cual representa la relación entre el peso del grano cultivado y el peso total de la planta en su madurez, sin contabilizar las raíces, como se aprecia en la Ecuación 3.6, siendo esta magnitud de carácter adimensional. Este índice puede presentar variaciones con respecto a la zona, la variedad y el manejo del cultivo en estudio.

$$\text{Índice de cosecha (IC)} = \frac{\text{Peso del grano}}{\text{Peso total planta excepto raíces}} [-] \quad (3.6)$$

Por su parte, la cantidad total de residuos generados se calcula mediante la Ecuación 3.7, que corresponde al producto entre la cantidad total de grano obtenido de un cultivo específico y un factor multiplicativo que contiene al índice de cosecha (Ruiz et al., 2015).

$$\text{Cantidad de residuos [t]} = \text{Producción de grano [t]} * \frac{1 - IC}{IC} \quad (3.7)$$

Considerando la información referente a los cultivos de cereales en el país, proporcionada por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA] (2018) perteneciente al Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile, se presenta a continuación en la Tabla 3.10 una estimación de la cantidad anual de los residuos generados a partir de los principales cultivos de cereales presentes en Chile, abarcando las temporadas agrícolas desde el año 2012 hasta el año 2017, utilizando un índice de cosecha de referencia.

A partir de la Tabla 3.10 se puede afirmar que si bien la cantidad total de residuos agrícolas generados en Chile en los últimos 5 años ha presentado fluctuaciones, en general este valor es cercano a 5.000.000 de toneladas anuales, donde destacan en orden decreciente los cultivos de trigo harinero, maíz consumo y avena, con más de 1.200.000 de toneladas al año de residuos generados, seguidos del cultivo de raps, con alrededor de 470.000 toneladas anuales (ODEPA, 2018).

Tabla 3.10 Toneladas de residuos en cultivos de cereales.

Cultivo	Índice de cosecha	Cantidad de residuos anuales				
		Toneladas [t]				
		2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017
Trigo harinero	0,45	1.668.484	1.510.779	1.629.482	1.871.229	1.492.662
Trigo candeal	0,45	133.881	149.156	182.230	245.580	156.717
Avena	0,37	1.158.488	1.038.522	716.920	907.677	1.214.201
Cebada Cervecera	0,45	75.690	84.717	42.194	77.734	82.367
Cebada Forrajera	0,45	21.613	15.934	18.396	54.594	34.333
Centeno	0,25	12.441	10.961	14.166	13.803	-
Maíz Consumo	0,46	1.656.458	1.309.773	1.781.873	1.348.872	1.220.489
Maíz Semilla	0,46	126.186	82.638	24.491	29.874	26.898
Arroz	0,44	165.846	171.671	208.167	221.465	162.739
Triticale	0,29	284.901	253.846	315.713	357.505	291.108
Poroto Consumo	0,33	33.251	-	-	-	-
Poroto Exportación	0,33	5.310	-	-	-	-
Lenteja	0,37	1.183	948	677	1.343	1.963
Raps	0,28	400.827	350.565	518.092	545.185	471.062
TOTAL		5.744.558	4.979.510	5.452.401	5.674.862	5.154.539

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cultivos anuales históricos (ODEPA, 2018).

El Protocolo de Agricultura Sustentable (ODEPA, 2017) recomienda que los desechos vegetales sean reutilizados en los campos a través de técnicas como compostaje y lombricultura, además de la reincorporación a los cultivos por medio de picado y rastraje, por su parte Ruiz et al. (2015) recomienda el uso de estos residuos para alimentación de rumiantes o como camas para animales, sin embargo, debido al gran volumen generado de este material residual, es frecuente que se utilice la práctica de quemarlos para facilitar la rotación de siembras, solamente en el año 2017 se llevaron a cabo un total aproximado de 16.500 quemas controladas de residuos agrícolas, abarcando una superficie de 240.000 hectáreas, como se indicó en el Gráfico 3.11 y Gráfico 3.12 (CONAF, 2018b).

Considerando entonces las cuantiosas cantidades de desechos emitidos anualmente por la industria agrícola, el proyecto FONDEF ID15110580 seleccionó las siguientes cinco variedades de biomasa residual de relevancia nacional: trigo, avena, maíz, raps, uva y olivo. Sin embargo, para efectos de esta experimentación en específico, se trabajará solamente con avena y uva, por lo tanto, a continuación, serán detallados más antecedentes referentes a estas dos variedades de biomasa.

3.5.1.1 Avena

La avena corresponde a una planta herbácea anual que pertenece a la familia de las gramíneas. En su estructura presenta hojas largas y planas de color verde oscuro, como se aprecia en la Figura 3.6, siendo su tallo recto y grueso, logrando alcanzar en su madurez una altura aproximada de un metro. Sus raíces son profundas y abundantes en comparación con otros cereales. Con respecto a sus flores y frutos, estos se desarrollan en la zona superior de los tallos, las flores se organizan en racimos de espiguillas conformando pequeños sacos colgantes, por otra parte, sus frutos crecen en cariósides o granos con glumillas adheridas (Faba y Muñoz, 2011).

La avena es una planta rústica perteneciente a climas templados y fríos, siendo en general muy sensible a temperaturas altas especialmente en el momento de la floración. Esta planta se adapta fácilmente a variados tipos de suelo, y debido a que presenta una alta tasa de transpiración, su adecuado crecimiento exige una gran cantidad de agua. El cultivo de avena en Chile está representado principalmente por dos especies: *Avena strigosa* Schreb. y *Avena sativa* L. La primera de ellas se emplea frecuentemente para la obtención de forraje, en cambio la *Avena sativa* L., conocida también como avena blanca, es utilizada para obtener grano, ya sea destinado a la alimentación animal en forma de grano bruto o despuntado, como también se emplea para el consumo humano en diversas presentaciones tales como: harina, láminas aplastadas o enteras, mezclas de cereales, granolas, barras energéticas, hojuelas y galletones (Farías y Merino, 2017). La época de siembra y cosecha de la planta de avena depende de la zona donde se ubique el cultivo, en Chile la siembra se realiza habitualmente durante julio y agosto. Es recomendable, según los requerimientos de la industria, cosechar la avena con una humedad promedio en sus granos cercana al 14%, lo cual se logra alcanzar entre los meses de noviembre y enero (FAO, 1995).

Con respecto a la distribución geográfica de las superficies de cultivos de avena en Chile, estas se encuentran desarrolladas principalmente en las regiones de La Araucanía y del Biobío, como se aprecia en el Gráfico 3.13, representando respectivamente el 62% y el 24% del total nacional promedio entre las últimas cinco temporadas agrícolas (Farías y Merino, 2017).



Figura 3.6 Avena sativa.

Fuente: Avena sativa. Dr. Otto Wilhelm Thomé. Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz 1885, Gera, Germany.

Distribución de la superficie nacional de avena Promedio temporadas 2012/2013 a 2016/2017

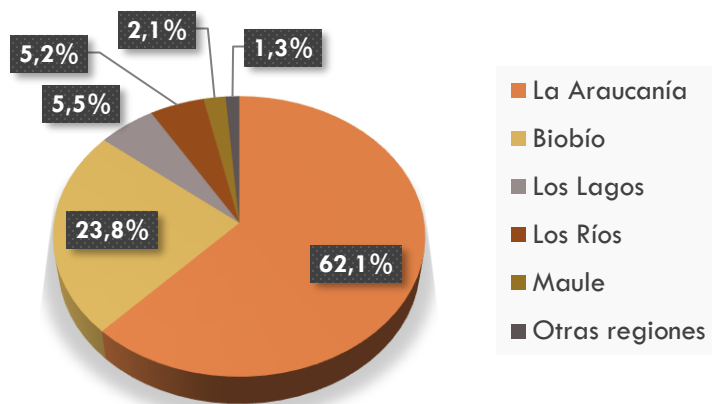


Gráfico 3.13 Distribución de la superficie nacional de avena.

Fuente: Elaboración propia con datos de El mercado de la avena blanca en Chile (Farías y Merino, 2017).

La cosecha del grano de avena genera principalmente dos tipos de residuos: paja y cáscaras. Considerando entonces que esta biomasa residual depende de la cantidad de producción de avena y de su índice de cosecha, como se expuso anteriormente, a continuación, en el Gráfico 3.14 se representa la cantidad total de biomasa residual emitida en los últimos años por la industria de producción de avena en Chile. Se aprecia que desde la temporada 2011/2012 en adelante, la cantidad total de residuos supera las 600.000 toneladas, además en las últimas tres temporadas se ha generado un aumento de los residuos logrando alcanzar 1.200.000 de toneladas durante la temporada 2016/2017 (ODEPA, 2018).

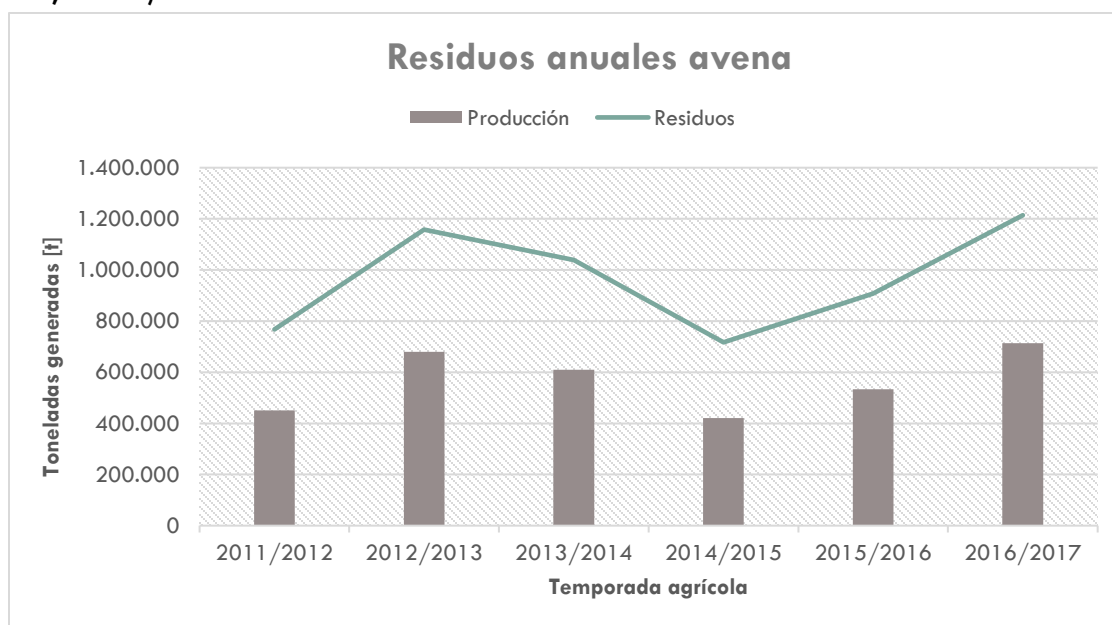


Gráfico 3.14 Cantidad de producción y residuos anuales en el cultivo de avena.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cultivos anuales históricos (ODEPA, 2018).

3.5.1.2 Uva

La uva corresponde al fruto de la vid, planta que pertenece al género *Vitis* de la familia *Vitaceae*, de la cual existen alrededor de 100 especies identificadas en la literatura. La vid es una planta leñosa trepadora que puede alcanzar un tamaño entre 20 y 30 [m], sus hojas son grandes, caducas e irregularmente dentadas, como se aprecia en la Figura 3.7, con un tamaño promedio de 15 [cm]. Las flores son pequeñas y crecen en panículas racimosas en dirección opuesta a las hojas. Algunas especies pueden tener más de 100 flores dentro de mismo racimo, mientras que otras tan solo 10. El fruto es una baya ovoide y jugosa, con 2 a 4 semillas en su interior (Mencarelli y Bellincontro, 2005). Lagos et al. (2004) señala que las vides son sensibles a las lluvias y a las bajas temperaturas durante la etapa de floración y madurez de las uvas, por lo que su desarrollo se realiza adecuadamente en zonas con un clima seco y temperado durante estas fases, con temperaturas entre 25 a 35 [°C]. Por otra parte, esta planta se adapta bien a diversos tipos de suelos, como los arenosos, arcillosos e incluso aquellos con baja fertilidad.



Figura 3.7 Vid.

Fuente: *Vitis vinifera*. Franz Eugen Köhler. Köhler's Medizinal-Pflanzen, 1896.

El cultivo de la vid en Chile está orientado a la exportación y consumo nacional de uva de mesa, además de la producción de vino y de pisco. Las plantaciones de vid de mesa se distribuyen principalmente en las regiones de Atacama, Coquimbo, Metropolitana, Valparaíso y O'Higgins, como se aprecia en el Gráfico 3.15, donde destacan principalmente estas dos últimas regiones, con más de 10.000 [ha] plantadas en cada una (Servicio Agrícola y Ganadero [SAG], 2017; ODEPA, 2018).

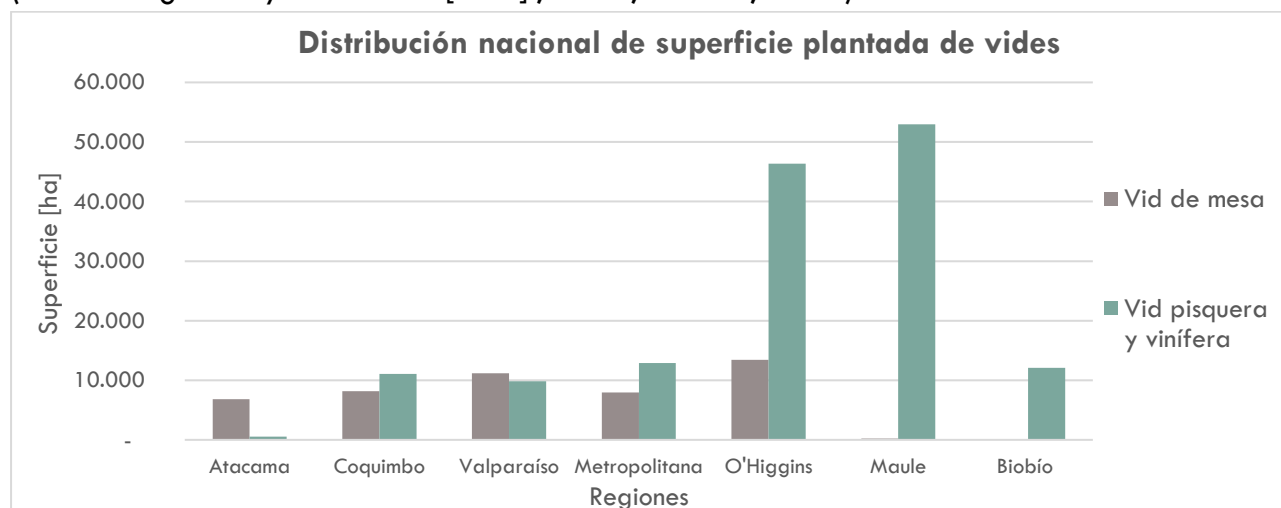


Gráfico 3.15 Distribución regional cultivo vitivinícola-pisquero y vid de mesa 2016-2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Catastro vitivinícola nacional (SAG, 2017) y Catastro frutícola (ODEPA, 2018).

Por otra parte, la superficie utilizada en plantaciones de vid vinífera y pisquera, con un total de 145.865 [ha], resulta considerablemente superior al área destinada a plantaciones de vid de mesa, con 47.799 [ha], según información proporcionada por el Servicio Agrícola y Ganadero (2017) y por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2016). La distribución nacional de plantaciones de vid vitivinícola-pisquera se localiza principalmente en las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule y Biobío, de las cuales destacan principalmente las regiones de O'Higgins y Maule con más de 40.000 [ha] cada una destinadas para este propósito, como también se logra apreciar en el Gráfico 3.15.

La fase de cosecha de la uva de mesa comienza en el mes de noviembre para algunas variedades y puede extenderse hasta marzo para otras (Torres, et al., 2017), en cambio la cosecha de uva destinada a la producción de vino, período también conocido como vendimia, según lo informado por la Asociación Nacional de Ingenieros Agrónomos Enólogos de Chile (2016), se realiza aproximadamente a mitad del mes de abril.

Los orujos de uva corresponden a residuos sólidos conformados por semillas y hollejos provenientes del proceso de vinificación (Flanzy, 2000). Según Sáenz (1992), el orujo generado equivale al 15% de la cosecha total obtenida para la vendimia, por lo tanto, considerando que en el año 2017 la producción de vino fue de 983.020.000 [L], se generó un total de 173.474 [t] de orujo de uva, estimando la densidad del vino como 1 [g/mL] (ODEPA, 2018).

En el Gráfico 3.16 se detalla la cantidad de orujos de uva producidos anualmente por la industria vitivinícola nacional, donde se puede apreciar que esta cantidad supera las 150.000 toneladas anuales desde el año 2012 en adelante (ODEPA, 2018).

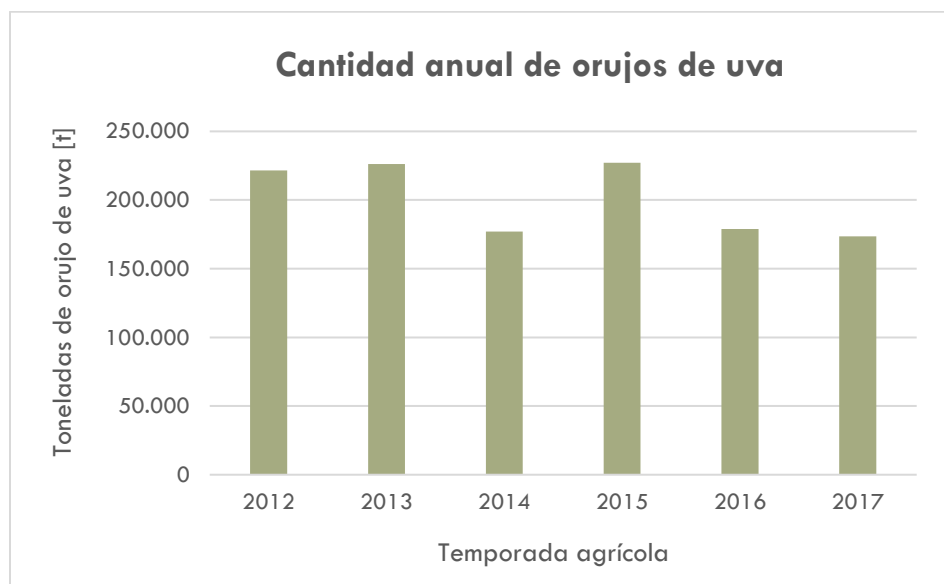


Gráfico 3.16 Cantidad anual de orujos de uva.

Fuente: Elaboración propia a partir de Cultivos anuales históricos (ODEPA, 2017), considerando la densidad del vino como 1[g/mL].

3.5.2 Biomasa residual de la industria forestal

En la actualidad Chile cuenta con una amplia superficie de recursos forestales, con un total de 17,9 millones de hectáreas según lo establecido en el Anuario Forestal 2019, donde el 82% corresponde a bosque nativo y el 17% a plantaciones forestales (Gysling, Álvarez, Soto, Pardo y Poblete, 2019). La explotación de estos recursos es una actividad productiva que genera anualmente una considerable cantidad de residuos, los que provienen principalmente de la industria forestal primaria, la cual abarca aquellos rubros que se encargan de realizar el primer procesamiento de los trozos de madera extraídos de bosques y plantaciones forestales. Esta categoría reúne a todas las actividades relacionadas con la conversión mecánica, química o mixta de la madera en trozos, considerando aserraderos y plantas de transformación física de la madera (plantas astilladoras, plantas de tableros y chapas, fábricas de postes y polines) como también se incluye a plantas de celulosa. Los residuos generados igualmente provienen de la industria forestal secundaria, que se encarga de realizar remanufactura de la madera anteriormente procesada (Gysling y Soto, 2015).

La Comisión Nacional de Energía (CNE) y el Instituto Forestal (INFOR) en su estudio sobre Disponibilidad de Residuos Madereros definen como Residuos Aprovechables Energéticamente (RAE) a todos aquellos residuos que permanecen disponibles después de procesar la materia prima obteniéndose como resultado un producto principal, además de subproductos (González et al., 2015). La fórmula de cálculo de este concepto se expresa en la siguiente Ecuación 3.8.

$$RAE = V_{cc} - P - S \quad (3.8)$$

Dónde:

V_{cc} = Volumen de trozas sólidas con cortezas [m^3 scc].

P = Volumen del producto principal, madera aserrada [m^3 scc].

S = Volumen de los subproductos [m^3 scc].

Para la realización del estudio nombrado anteriormente solo se consideraron los residuos emitidos en establecimientos de aserrío, excluyéndose a plantas de celulosa y tableros, ya que estas industrias reutilizan los residuos madereros para sus procesos productivos o para la obtención de energía. A continuación, se describen todos los tipos de residuos forestales que son generados en los aserraderos según González et al. (2015) en el informe sobre Disponibilidad de Residuos Madereros:

- **Cortezas:** corresponden a la capa externa de los trozos de madera rolliza y provienen de los aserraderos que cuentan con equipos descortezadores.
- **Aserrín:** equivale al conjunto de partículas de tamaño pequeño generado en el proceso de aserrado (aserrín primario) y en el reproceso de la madera (aserrín secundario).

- **Lampazos:** comprenden las secciones laterales de la troza obtenidos en el proceso de aserrío y presentan una cara libre de corteza.
- **Despunte:** consisten en secciones terminales de tamaño variable provenientes del proceso de dimensionado en largo de piezas de madera.
- **Virutas:** corresponden a cintas delgadas con espesor variable generadas a partir del cepillado de piezas de madera, ya sea en aserraderos o remanufacturas.

En la Figura 3.8 se esquematiza el flujo productivo del procesamiento primario y secundario de la madera en la industria forestal nacional además de la generación de los respectivos residuos, el cual fue elaborado con información del estudio sobre la Industria Forestal Primaria en Chile para el año 2015. Se aprecia que los RAE corresponden aproximadamente al 30% del total del volumen de trozos de madera en bruto procesados, destacando que la mayoría de estos residuos se originan en el primer procesamiento de la madera (RAE aserrío), con un 27,3% de total, y solo una pequeña parte de ellos aparece en la remanufactura (2,6%) (Gysling y Soto, 2015).

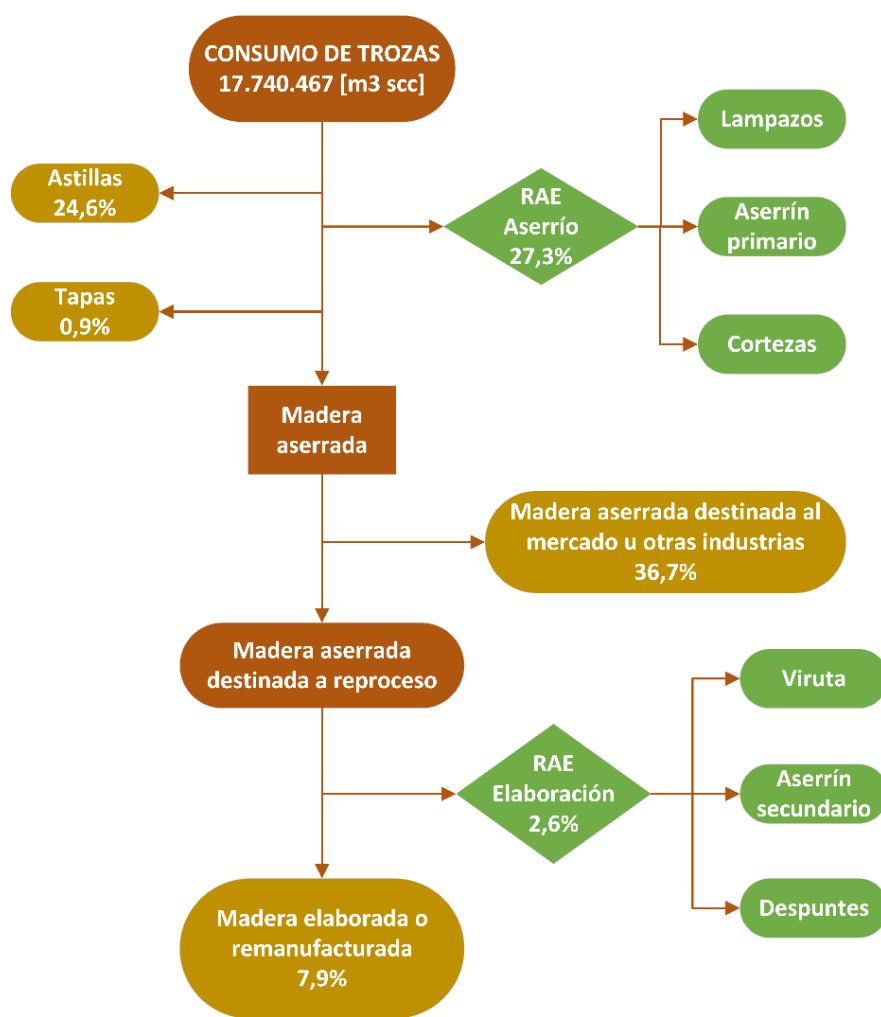


Figura 3.8 Residuos madereros de la industria del aserrío.

Fuente: Elaboración propia en base a informe Industria Forestal Primaria en Chile, Periodo 2006-2015 (Gysling y Soto, 2015).

Se establece entonces que existe una fracción significativa de recursos leñosos del país que se transforman finalmente en residuos, como se indica en detalle en la Tabla 3.11, donde se informa que en el año 2015 se generó un total de 5.307.773 [m³] de residuos madereros entre cortezas, lampazos, aserrín, despuntes y viruta, destacando particularmente el aserrín obtenido del procesamiento primario de la madera, con 2.758.486 [m³] y las cortezas con 1.319.154 [m³] (Gysling y Soto, 2015).

Tabla 3.11 Volumen de residuos industria maderera 2015.

Tipo de residuo	Volumen (m ³)	% (*)	Variación (2015 / 2005)
Corteza	1.319.154	7,4	+2,0%
Lampazos	767.148	4,3	+0,7%
Aserrín (primario)	2.758.486	15,5	-0,8%
Aserrín (secundario)	122.271	0,7	-30,6%
Despuntes	109.632	0,6	-64,5%
Viruta	231.081	1,3	-32,4%
Total	5.307.773	29,8	-4,2%

(*) Porcentaje respecto del volumen total consumido de trozos.

Fuente: *Industria Forestal Primaria en Chile, Periodo 2006-2015* (Gysling y Soto, 2015).

Es importante destacar que posterior al procesamiento, un volumen importante de estos residuos se comercializa, se autoconsume o se regala. A continuación, en el Gráfico 3.17 se presenta el porcentaje que se destina a diversos propósitos para cada tipo de residuo. Entre ellos destaca principalmente que para las cortezas, aserrín, lampazos y virutas, más del 50% de estos materiales son comercializados en el mercado de la biomasa, tanto para la industria de la cogeneración de energía, como para la industria de tableros y *pellets*. Asimismo, se aprecia también que alrededor del 20% del volumen total de las cortezas, aserrín, despuntes y virutas, son autoconsumidos por los establecimientos para satisfacer sus propios requerimientos energéticos. Finalmente, un porcentaje muy pequeño de estos residuos (5,8%) son regalados, y el volumen restante (3,8%) se acumula (Gysling y Soto, 2015).

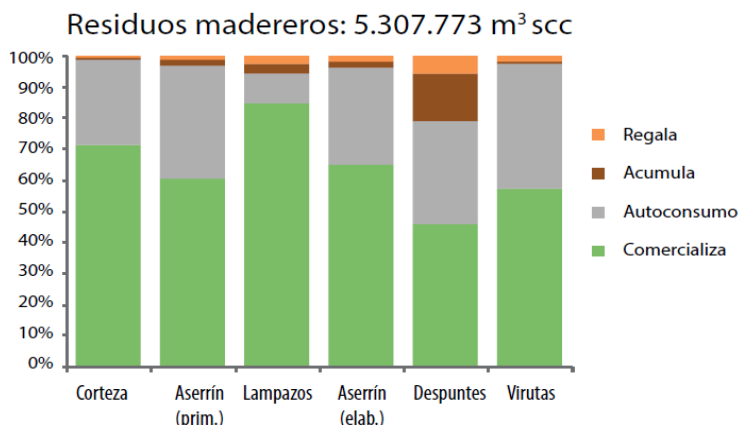


Gráfico 3.17 Destino de los residuos madereros 2015.

Fuente: *Industria Forestal Primaria en Chile, Periodo 2006-2015* (Gysling y Soto, 2015).

3.5.2.1 Pino radiata

El pino radiata (*Pinus radiata* D.Don), también llamado pino insigne o pino de Monterey, es una especie originaria del suroeste de los EE. UU principalmente del sector de California, la cual fue introducida intencionalmente en Chile en el año 1885 (Fuentes et al., 2014). Este árbol es una especie resinosa perenne de fuste recto que alcanza alturas entre 30 – 50 [m] y su tronco puede llegar a medir alrededor de 1,5 [m] de diámetro. Posee una copa aplanada en su madurez, con ramas inferiores extendidas. Sus hojas en forma de aguja miden entre 8 – 20 [cm]. Presenta conos masculinos con forma elipsoide-cilíndrica de color pardo-anaranjados, con un tamaño promedio entre 10 – 15 [mm]. El cono femenino es leñoso y con una rápida dispersión de sus semillas (Ministerio de Salud del Gobierno de Chile, 2010). Esta especie soporta



Fuente: *Pinus radiata*. Curso de Botánica Sistemática
Profesor: Sebastián Teillier, 2010.

temperaturas entre 1,5 – 30 [°C] y requiere de lluvias distribuidas en invierno y primavera. Tiene capacidad de adaptarse a diversos tipos suelos de distinta naturaleza y crece en profundidades de al menos 25 [cm] (García, Sotomayor, Silva, y Valdebenito, 2001).

El pino radiata presenta una gran diversidad del uso de su madera, lo cual ha dado origen a un amplio desarrollo de la actividad forestal en Chile, participando en la industria de la pulpa, del papel, de la madera aserrada, de muebles, de diversos tableros, embalajes y otros productos (Fuentealba, 2008).

Según Gysling et al. (2019) en la información entregada en el Anuario Forestal 2019, actualmente las plantaciones forestales en Chile cubren una superficie aproximada de 2,29 millones de hectáreas, de las cuales 1,28 millones (55,8%) corresponden a plantaciones de pino radiata, especie que se distribuye desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Ríos, como se aprecia en el Gráfico 3.18, donde se distingue que las plantaciones se concentran principalmente en la Región del Biobío, con más de 500.000 hectáreas, seguidas de la Región del Maule con alrededor de 300.000 hectáreas, destacando también la Región de La Araucanía, con un total aproximado de 250.000 hectáreas plantadas de pino radiata.

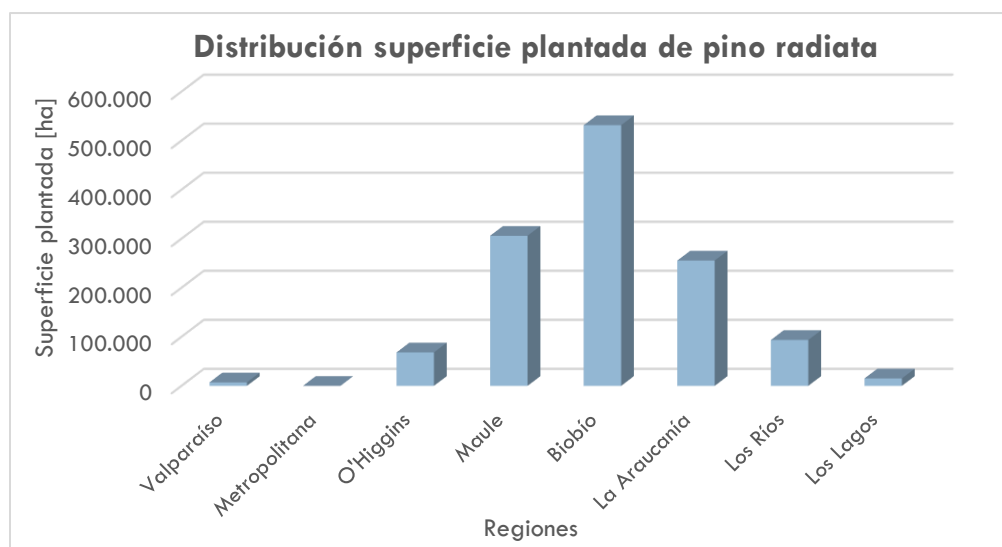


Gráfico 3.18 Distribución de la superficie de pino radiata 2017.

Fuente: Elaboración propia con información de Anuario Forestal (Gysling et al., 2019).

Se estima que alrededor de 3.253.724 toneladas de residuos son generadas anualmente por la industria forestal del aserrío en Chile. Ahora bien, teniendo en consideración específicamente los residuos generados por la transformación de pino radiata, se elaboró a continuación, en el Gráfico 3.19, una estimación de la cantidad de residuos totales y de aserrín emitidos a partir del procesamiento primario y secundario de esta madera, se logra apreciar que en los últimos seis años la producción de estos residuos oscila en torno a 300.000 toneladas, de las cuales aproximadamente 150.000 toneladas corresponden a aserrín de pino, se observa que también que desde el 2013 en adelante, estas cantidades han presentado un ligero aumento, pero sin mayores fluctuaciones a través del tiempo (Gysling y Soto, 2015; Gysling et al., 2019).

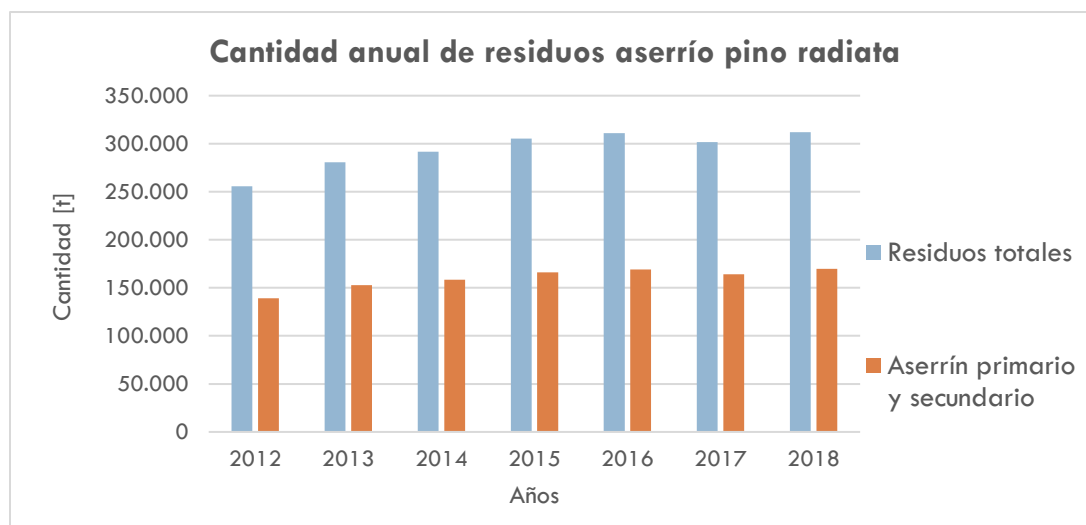


Gráfico 3.19 Cantidad anual emitida de aserrín primario y secundario de pino radiata.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Anuario Forestal (Gysling et al., 2019) y de informe Industria Forestal Primaria en Chile, Periodo 2006-2015 (Gysling y Soto, 2015).

3.6 Contaminación atmosférica en Chile

3.6.1 Contaminantes atmosféricos

El aire es un recurso natural que está originalmente compuesto por un conjunto de gases, donde el 78,09% corresponde a nitrógeno (N_2), el 20,95% al oxígeno (O_2) y el 0,9% a argón (Ar), presentando además otros gases en pequeñas proporciones como el dióxido de carbono (CO_2) en un 0,033% (Rodríguez, 2009). La atmósfera se ve afectada diariamente por emisiones contaminantes de diversos orígenes lo cual ocasiona una alteración en su composición natural, constituyendo entonces la contaminación atmosférica, la cual es definida por Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile (2018) como “la presencia de contaminantes en la atmósfera, tales como polvo, gases o humo en cantidades y durante períodos de tiempo tales que resultan dañinos para los seres humanos, la vida silvestre y la propiedad. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o producidos por el hombre directa o indirectamente”. De manera que, la legislación chilena actual ha establecido normas de calidad primaria para los siguientes tipos de contaminantes atmosféricos (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire [SINCA], 2018):

➤ **Material particulado (PM):**

Se denomina material particulado al conjunto de partículas líquidas y sólidas, de origen y composición variada, que se encuentran suspendidas en la atmósfera, exceptuando el agua pura (Mészáros, 1999). Su naturaleza es compleja debido a las propiedades físicas y químicas que presenta, se genera a partir de emisiones directas hacia la atmósfera (PM primario), como también puede originarse a partir del proceso de conversión de algunos gases (PM secundario) (Vargas, 2011). El comportamiento de estas partículas en el ambiente se encuentra determinado por sus dimensiones, sobre aquellas de mayor tamaño actúan principalmente fuerzas inerciales y gravitacionales, y con respecto a las de menor tamaño, actúan mayoritariamente movimientos del tipo browniano (Lazar, Reilly, Whitten y Ramsey, 1999). El material particulado proviene tanto de fuentes naturales continentales como de fuentes antropogénicas, dentro de las fuentes naturales que lo originan destacan: el polvo natural del suelo, polen levantado por el viento, evaporación del agua de mar (aerosoles marinos), erupciones volcánicas, etc. (Cereceda et al., 2001). Este material se clasifica en función de su tamaño, dado que esta característica es un factor clave para determinar la zona y la probabilidad de que el PM, al ser inhalado, se deposite en el tracto respiratorio, sin embargo, las partículas no presentan igual densidad ni tampoco una forma esférica exacta, sino que exhiben anisotropía y variabilidad de tamaños, por lo que para fines comparativos se les asigna un diámetro aerodinámico equivalente (Bird, Lightfoot y Stewart, 1982), concepto definido en el Decreto Supremo N°12 (2011) como: “tamaño de una partícula esférica de densidad unitaria, que presenta igual velocidad de sedimentación que la partícula de interés” (Decreto Supremo N°1, 2011). En la legislación chilena se distinguen dos tamaños significativos de partículas, el $PM_{2,5}$ y el PM_{10} :

- Material particulado respirable fino PM_{2,5}: presenta un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5[μm], donde se distingue una fracción ultrafina que reúne partículas con diámetros menores o iguales a 0,1[μm]. Este material es generado a partir de diversas fuentes primarias como: la condensación de gases, la combustión de biomasa y combustibles fósiles, diversas actividades industriales como plantas termoeléctricas, calderas, hornos, fundiciones, procesos metalúrgicos, quemas agrícolas e incendios forestales, como también puede provenir de gases precursores como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles (COVs), entre otros gases, constituyendo así material particulado secundario (Decreto Supremo N°12, 2011). El PM_{2,5} suele estar compuesto generalmente de nitratos, amonio, sulfatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), carbono elemental, y también de ciertos metales como plomo, níquel, cobre, zinc, cadmio, vanadio, hierro, entre otros (Wilson y Suh, 1997).

El tiempo de residencia de estas partículas en la atmósfera es prolongado y puede llegar a extenderse por varios días e incluso semanas, existiendo la posibilidad además de ser transportadas miles de kilómetros impactando a escala regional (Sosaky et al., 1988).

El PM_{2,5} también es reconocido como la fracción respirable del material particulado ya que, al ser inhalado, posee la capacidad de alcanzar los alveolos pulmonares y eventualmente entrar en el torrente sanguíneo, pudiendo llegar a depositarse en otros órganos incluyendo el sistema nervioso central (Vargas, 2011). La Organización Mundial de la Salud [OMS] (2006) señala que el material particulado es el causante del incremento de mortalidad y morbilidad en la población debido a su toxicidad, lo cual se aprecia en los siguientes efectos documentados: admisiones hospitalarias en pacientes con enfermedad cardiovascular y con enfermedad pulmonar obstructiva crónica, incremento en el riesgo de infartos al miocardio, aumento de los casos de asma, inflamación sistémica, inflamación pulmonar, disfunciones endoteliales y vasculares, desarrollo de aterosclerosis, mayor incidencia de infecciones y cáncer respiratorio (Decreto Supremo N°12, 2011). Pope y Dockery (2006) estiman que un incremento de 10 [g/m³] en los niveles de PM_{2,5}, ocasiona un aumento de un 1% en la mortalidad de la población. Además de las consecuencias para la salud, el material particulado fino genera otros efectos adicionales, debido a su capacidad para dispersar y absorber radiación puede influir en el balance radiativo del planeta (Aldabe, 2011), y por otra parte, al sedimentar en cuerpos de agua o en el suelo, puede contribuir en la acidificación de lagos y arroyos, reducir los nutrientes en la tierra, causar daño en bosques y cultivos agrícolas, contribuir en la formación de lluvia ácida, además de incidir en la visibilidad de la atmósfera (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2018a).

- **Material particulado respirable PM10:** comprende partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual que 10 [μm], dentro del cual se distingue una fracción gruesa, entre 2,5 y 10 [μm] de diámetro, y una fracción fina, que considera las partículas de tamaño menor o igual a 2,5 [μm], de manera que el PM_{2,5} se encuentra contenido en el PM10 (Decreto Supremo N°12, 2011). La fracción gruesa de este material se origina a partir de procesos mecánicos de ruptura de sólidos como fraccionamiento mecánico, molienda y abrasión, a nivel urbano resulta del desgaste de frenos, neumáticos y pavimento, construcción y demolición, como también a partir de la resuspensión de polvo en carreteras, calles y caminos sin pavimentar. Igualmente puede provenir de diversas actividades industriales y de la combustión de carbón y petróleo (Wilson y Suh, 1997; Wilson y Spengler, 1996). La fracción gruesa de este material suele estar compuesta generalmente de polvo natural del suelo, óxidos de sílice, aluminio, titanio y hierro, además de cloruro de sodio, carbonato de calcio, materia orgánica u otros compuestos de diverso origen (Wilson y Suh, 1997). Por otra parte, el nitrato y el potasio pueden encontrarse presentes tanto en el PM10 como en el PM_{2,5} (EPA, 2004).

Las partículas de la fracción gruesa, en comparación con las partículas finas, presentan tiempos de residencia en la atmósfera del orden de minutos y horas, teniendo la capacidad de ser transportadas por el viento solamente unos pocos centenares de kilómetros, presentando además una velocidad de sedimentación mayor que la fracción fina, por lo tanto, permanecen menor tiempo suspendidas en la atmósfera y su impacto es principalmente a nivel local (Vana et al., 1999).

La fracción del PM comprendida entre 2,5 –10 [μm] corresponden partículas inhalables que tienen la facultad de penetrar las vías respiratorias y depositarse en alguna zona de la región torácica como en la tráquea, los bronquios y los bronquiolos, las que además pueden irse acumulando en el sistema respiratorio y producir numerosos efectos negativos en la salud, expresados en el aumento de enfermedades respiratorias como la bronquitis, así como incrementar los efectos de otras enfermedades cardiovasculares (Díaz y Páez, 2006). La exposición repetida y prolongada a este contaminante en el tiempo genera efectos persistentes y acumulativos en comparación con la exposición transitoria a corto plazo. Joya (2007) estima que un aumento de 10 [g/m^3] en la concentración de PM10 en el ambiente, incrementa la tasa de mortalidad en un 1,4%. El material particulado grueso (fracción gruesa) también afecta el ecosistema, debido a que puede sedimentar sobre las hojas de las plantas y reducir su capacidad de intercambio gaseoso, afectando así el proceso de fotosíntesis, además, considerando la insolubilidad de estas partículas, pueden también perjudicar la absorción de nutrientes al sedimentar en altas concentraciones sobre la superficie terrestre (Grantz, Garner y Johnson, 2003).

A continuación, en la Figura 3.9 se aprecia la comparación entre los tamaños de las partículas PM₁₀ y PM_{2,5} en contraste con un grano de arena y cabello humano para dimensionar gráficamente el tamaño de este material (Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, 2018).

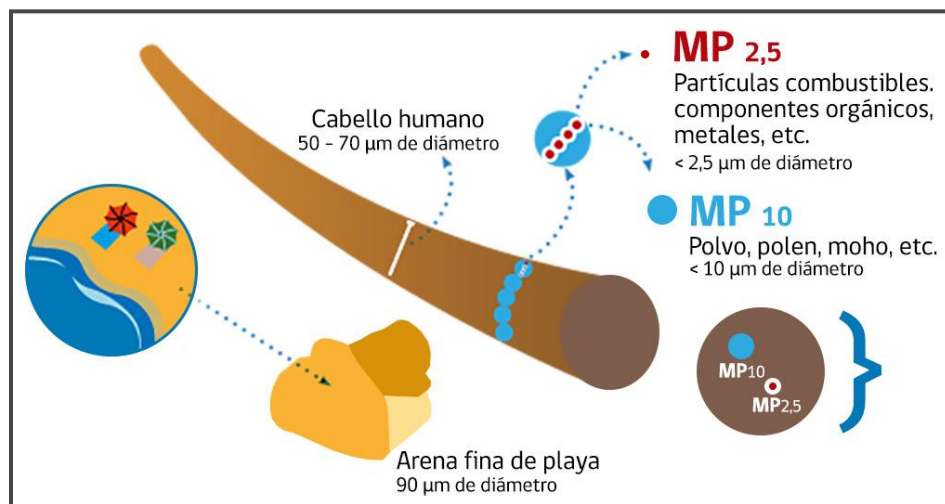


Figura 3.9 Comparación tamaño del material particulado.

Fuente: Aire Chile, Preguntas Frecuentes (Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, 2018b).

Distribución granulométrica del PM:

Si bien la legislación chilena distingue dos tamaños críticos de PM (PM₁₀ y PM_{2,5}), el diámetro original de estas partículas atmosféricas en suspensión puede variar desde unos pocos nanómetros [nm] hasta decenas de micrómetros [μm] (Viana, 2003), información importante a considerar, ya que en este estudio se midieron alrededor de 41 tamaños diferentes de PM con un espectrómetro láser de aerosoles. Whitby (1978) realizó una investigación logrando reunir más de 1000 distribuciones de tamaño de partículas obtenidas en base a mediciones en distintas localidades de Estados Unidos, donde observó que los tamaños se distribuyen típicamente en cuatro rangos, los que denominó “modas”, relacionados con el mecanismo de formación de las partículas. La estructura observada de estas modas se aproxima en varias distribuciones del tipo lognormal, las cuales son: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa, como se aprecia en la Figura 3.10, que representa la distribución del número de partículas para cada moda en función de su diámetro aerodinámico (EPA, 1996).

El crecimiento de las partículas de PM puede generarse mediante dos procesos: coagulación o condensación. El fenómeno de coagulación ocurre al colisionar entre sí dos o más partículas para formar solamente una, lo cual mantiene la masa total, mientras que disminuye el número de partículas, en este proceso intervienen fuerzas hidrodinámicas y fuerzas de Coulomb. Por otra parte, la condensación sucede cuando gases con baja presión de vapor,

cambian su estado a líquido y se depositan sobre la superficie de partículas preexistentes, aumentando así el tamaño de estas (Limbeck, Kulmala y Puxbaum, 2003). En la Figura 3.10 se representan estos procesos como aquellos mecanismos en que las partículas se trasladan de una moda a otra (EPA, 2004), las cuales se describen a continuación:

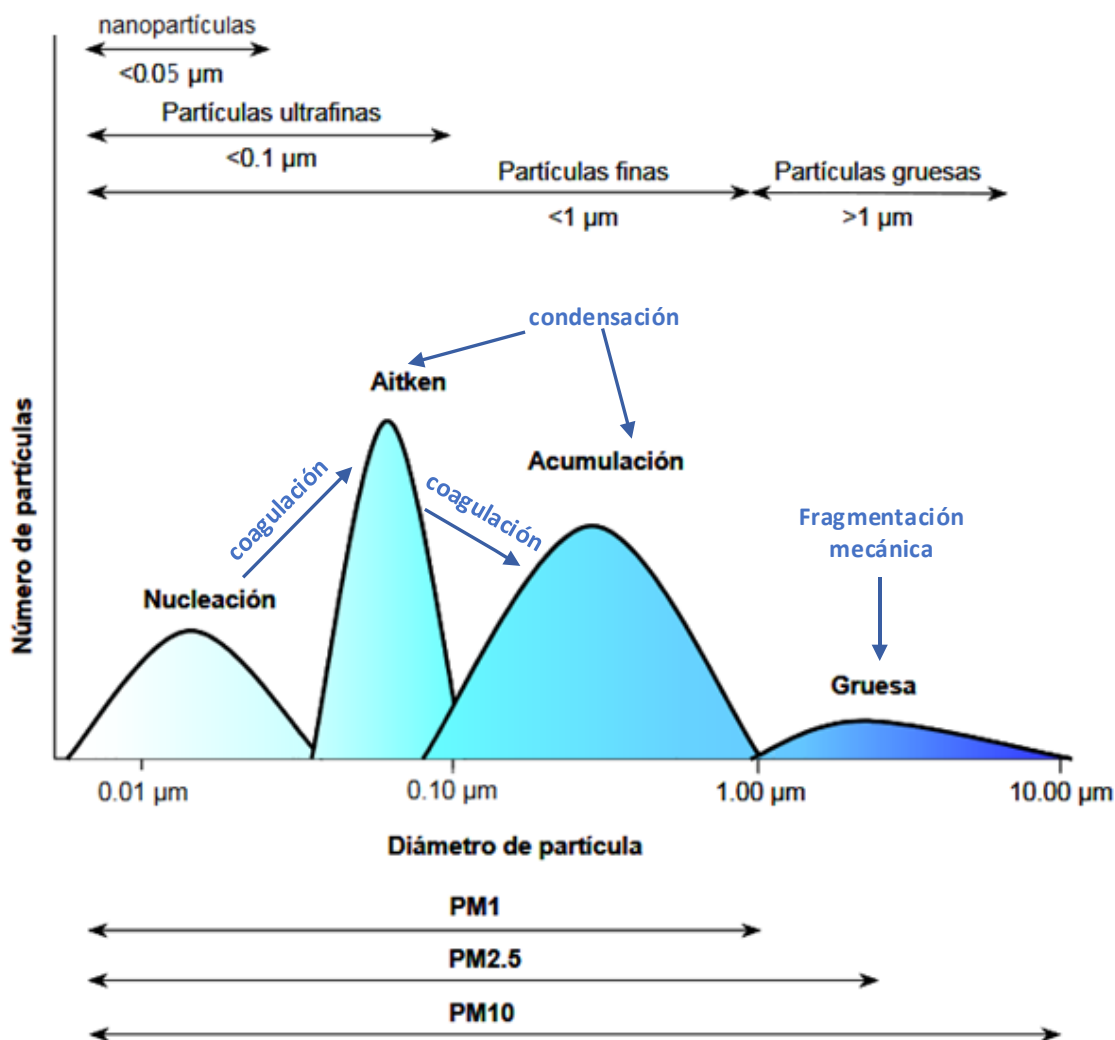


Figura 3.10 Distribución del número de partículas en función del diámetro.

Fuente: Air Quality Criteria for Particulate Matter (EPA, 1996).

- Moda de nucleación (<0,02 [µm]): Comprende nanopartículas con diámetros inferiores a 0,02 [µm]. La nucleación corresponde al proceso de formación de una nueva partícula, habitualmente generada a partir de compuestos en fase gaseosa (H_2SO_4 , NH_3 , etc.) o de COVs. En general su vida media es corta, ya que presenta la tendencia a crecer rápidamente mediante el proceso de coagulación al unirse con otras partículas (Kulmala et al., 2001). El mecanismo de la nucleación considera diversos factores como: la temperatura, la humedad relativa de la atmósfera, la concentración de los gases precursores, la presión

de vapor de saturación, las cargas eléctricas, entre otros factores. La teoría clásica de la nucleación postula que este proceso se favorece tanto al descender la temperatura, como también al incrementar la humedad relativa (Curtius, 2006 y Holmes, 2007).

- **Moda Aitken (0,02 – 0,1[μm]):** Comprende partículas ultrafinas, en el rango 0,02 – 0,1[μm]. Las partículas Aitken pueden tener tanto un origen primario como secundario. Las de origen primario son características de zonas urbanas donde abunda material carbonoso en suspensión originado en procesos de combustión, mayoritariamente de vehículos con motores a diésel (Matter, Siegmann y Burtcher, 1999). Las de origen secundario se forman mediante coagulación o condensación de partículas presentes en la moda de nucleación, o también mediante reacciones en fase líquida con compuestos inorgánicos (Pakkanen et al., 2001).

- **Moda de acumulación (0,1 – 1[μm]):** Contempla aproximadamente partículas de diámetro entre 0,1 – 1[μm]. La moda de acumulación se forma en la atmósfera como consecuencia del crecimiento de partículas presentes en la moda Aitken, mediante reacciones en fase líquida dentro de las nubes, por condensación de COVs, por coagulación de partículas más pequeñas y en menor medida por partículas de polvo finamente divididas. Las partículas de esta moda constituyen la fracción de PM que presenta un mayor tiempo de residencia en la atmósfera (Mészáros, 1993).

- **Moda gruesa (>1[μm]):** Contempla partículas mayores a 1[μm]. En esta moda reside la mayoría de la masa del PM, pero presenta un reducido número de partículas. Dentro de la moda gruesa predominan las partículas de origen primario formadas en procesos de fragmentación mecánica del suelo o diversos materiales, partículas biológicas, ruptura de burbujas de aire en la superficie del mar (aerosol marino), etc. En general, aquellos procesos mecánicos no forman partículas de diámetro menor a 1[μm] debido a limitaciones energéticas, por lo que, considerando su gran tamaño, estas partículas tienden a desaparecer rápidamente de la atmósfera por medio de la sedimentación (Harrison y Pio, 1983; Querol et al., 2003).

➤ **Dióxido de azufre (SO₂):**

El dióxido de azufre corresponde a una molécula constituida por un átomo de azufre y dos átomos de nitrógeno. A temperatura ambiente es un gas incoloro, no inflamable ni explosivo, que presenta un característico olor intenso. Es altamente soluble en agua y en solventes orgánicos (MMA, 2018c; Gangolli, 1999). El SO₂ es un compuesto estable y reductor, que es capaz de desplazarse grandes distancias rápidamente en la atmósfera, su vida media oscila entre 2 a 4 días, y por efecto de la humedad y el tiempo de residencia puede llegar a oxidarse para formar trióxido de azufre (SO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra [CRANA], 2018a).

Las principales fuentes que originan la presencia de dióxido de azufre en la atmósfera son antropogénicas y corresponden a la quema de combustibles fósiles en plantas de generación de energía, fundiciones de minerales que contienen azufre como es el caso de las fundiciones de cobre en Chile u otras instalaciones industriales. Dentro de las fuentes que generan SO₂ en menor volumen se encuentran: fuentes naturales como la actividad volcánica, medios de transporte como barcos y vehículos cuyos motores funcionan con combustibles fósiles, entre otros (EPA, 2018b).

La exposición al SO₂ genera irritación en las membranas mucosas, ojos, piel y tracto respiratorio, donde puede ser absorbido debido a su alta solubilidad. Concentraciones elevadas de este contaminante pueden generar enfermedades respiratorias y aumentar las enfermedades cardiovasculares. Por otra parte, el dióxido de azufre genera efectos adicionales al ambiente debido a que es precursor del material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y por lo tanto, incide en los efectos perniciosos que estas partículas causan sobre la salud, además al transformarse en ácido sulfúrico da lugar a la lluvia ácida, causando efectos sobre la vegetación, alteración de los suelos, acidificación de cuerpos de agua y pérdida de biodiversidad (Department for Environment, Food and Rural Affairs [DEFRA], 2014).

➤ **Dióxido de nitrógeno (NO₂):**

El dióxido de nitrógeno es un agente muy oxidante, soluble en agua y en compuestos orgánicos, que presenta en su estructura molecular un átomo de nitrógeno y dos átomos de oxígeno, constituyendo un gas tóxico e irritante (Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra, 2018). Se conocen actualmente ocho óxidos de nitrógeno distintos, pero solo generan interés como contaminantes dos de ellos, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), ya que los demás óxidos se encuentran en equilibrio con estos dos en concentraciones muy bajas que resultan despreciables (Carnicer, 2008). En la atmósfera el NO se oxida transformándose en NO₂ mediante reacciones fotoquímicas, el cual puede combinarse con COVs, en presencia de luz solar, formando ozono (O₃), así como también

puede reaccionar con agua para formar ácido nítrico y nitrato, lo cual contribuye a la producción de lluvia ácida. Estos contaminantes resultan además ser precursores del PM10 y PM2,5 (Decreto Supremo N°114, 2003).

Dentro de las fuentes naturales que contribuyen a la emisión de óxidos de nitrógeno hacia la atmósfera se encuentran: la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, las tormentas eléctricas, los incendios forestales, las erupciones volcánicas, etc. Con respecto a las fuentes antropogénicas destacan: la quema de combustible a altas temperaturas, el escape de emisiones de vehículos motorizados, procesos como la soldadura al arco, grabado de metales, galvanoplastia y detonación de dinamita (Fundación CRANA, 2018b).

Este contaminante tiene asociado diversos efectos adversos a la salud humana, en altas concentraciones causa inflamación de las vías respiratorias, mientras que la exposición a largo plazo puede afectar la función pulmonar y desencadenar enfermedades relacionadas, además el NO₂ incrementa los síntomas en personas con susceptibilidad a sufrir alergias. Con respecto al ambiente, altos niveles de NO₂ pueden tener un efecto negativo sobre la vegetación mermando su crecimiento, además de contribuir a la acidificación y eutrofización de hábitats, conduciendo a la pérdida de biodiversidad (DEFRA, 2014).

➤ **Monóxido de carbono (CO):**

El monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido, conformado por un átomo de carbono y uno de oxígeno. El CO se genera por la combustión incompleta de diversos combustibles como gas natural, kerosene, petróleo, carbón, gasolina e incluso madera. Cuando las calderas, los calentadores de agua, calefones, estufas, hornillas u otros aparatos domésticos que queman combustible, no están operando adecuadamente, pueden producir CO. Otra fuente de emisión de este contaminante la constituyen los automóviles que se encuentran detenidos con el motor encendido (EPA, 1997).

Al inhalarse, el CO reduce considerablemente la capacidad de la sangre para transportar oxígeno hacia los tejidos del cuerpo, impidiendo su llegada al cerebro y los músculos, incluyendo el corazón, bloqueando además las reacciones bioquímicas relevantes en las células, pudiendo causar la muerte. Las personas con enfermedades preexistentes que afecten el suministro de oxígeno al corazón o al cerebro, presentan especial riesgo de exposición con respecto a este contaminante (DEFRA, 2014).

➤ **Plomo (Pb):**

El plomo (Pb) es un elemento químico considerado como un metal pesado, el cual se presenta en la atmosfera tanto en estado gaseoso como en forma de material particulado proveniente principalmente de fuentes antropogénicas como vehículos con motor a gasolina con aditivos derivados del plomo, emisiones generadas por ciertas industrias químicas (pinturas, esmaltes, etc.), procesos de fundición y recuperación de metales, industrias mineras, incineración de residuos, combustión de carbón, fabricación de baterías, fangos de depuración, entre otros. El Pb se considera un contaminante muy peligroso debido a su alta toxicidad y a su extensa permanencia en el ambiente, ya que no sufre degradación química ni biológica. (Tropósfera, 2005).

Al ingresar al organismo, el plomo circula por la sangre depositándose en tejidos blandos, principalmente en los huesos en un 94%, así como también en el cerebro y en los glóbulos rojos. Los efectos tóxicos del plomo se expresan en particular sobre el sistema nervioso central, siendo los lactantes especialmente susceptibles a su toxicidad. Los efectos en la salud causados por la inhalación de plomo dependen principalmente del tamaño de las partículas inhaladas, aquellas menor a 2,5[μm] se depositan en los alvéolos pulmonares, desde donde se difunden casi en un 100% hacia el torrente sanguíneo. El plomo puede afectar también gravemente las cadenas tróficas, debido a su acumulación dentro de los seres vivos (Decreto Supremo N°136, 2001).

➤ **Ozono (O₃):**

El ozono (O₃) es un gas incoloro e inodoro de bajo peso molecular, formado por tres átomos de oxígeno. Este contaminante no es emitido directamente hacia la atmósfera por alguna fuente antropogénica, sino que surge mediante reacciones químicas fotooxidantes de gases precursores, como el monóxido de carbono y COVs, en presencia de NO_x y luz solar. La formación del O₃ puede llevarse a cabo a muchos cientos o miles de kilómetros de distancia de la fuente emisora, extendiéndose durante varias horas o días (DEFRA, 2014; Decreto Supremo N°112, 2003).

Debido a su gran capacidad oxidante, el ozono presenta características perjudiciales para la salud de la población. La exposición a altas concentraciones de O₃ causa irritación de los ojos y de las vías respiratorias, además del aumento en las admisiones hospitalarias e inflamaciones pulmonares, alteraciones estructurales del pulmón e incluso mortalidad (Decreto Supremo N°112, 2003). El ozono es el principal componente del smog fotoquímico, y a nivel del suelo puede causar daños a las plantas, incidir en la pérdida de rendimiento y calidad de los cultivos, causar daños a los bosques e impactar en la biodiversidad (DEFRA, 2014).

Si bien los contaminantes atmosféricos detallados anteriormente están presentes en las normativas nacionales de calidad ambiental, también resulta relevante la existencia de otros contaminantes presentes en el aire, los cuales tienen especial importancia dentro de este estudio ya que fueron parámetros medidos en el laboratorio, los cuales son:

➤ **Dióxido de carbono (CO₂):**

El dióxido de carbono (CO₂) es un compuesto inorgánico constituido por la unión simétrica de dos átomos de oxígeno y un átomo de carbono, dispuestos espacialmente para formar una molécula triatómica lineal. En condiciones normales, el CO₂ es un gas incoloro, inodoro e inerte (Medina, 2010; Berenguer y Bernal, 2010).

El ciclo del carbono corresponde a un ciclo biogeoquímico que desempeña un rol importante en la regulación del clima del planeta. El carbono se encuentra presente en diferentes formas dentro de la biósfera, la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera, circulando y sufriendo distintas transformaciones en escalas de tiempo variables, que van desde horas, días, meses o estaciones, hasta procesos que tardan largos periodos geológicos. El CO₂ es una de las diversas formas que adopta el carbono dentro del ciclo natural, estando presente tanto en estado gaseoso en la atmósfera, como también disuelto en cuerpos de agua (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN], 2018). Sin embargo, este ciclo se ve alterado como consecuencia de las actividades humanas, ya sea influyendo en la disminución de la capacidad de la naturaleza para transformar el CO₂, como también aumentando la cantidad emitida hacia el ambiente. Dentro de las principales causas antrópicas del incremento de CO₂ se encuentran: la quema los combustibles fósiles, quema de biomasa, cambios en uso de suelo, principalmente deforestación, entre otros (Carnicer, 2008; Cambio Climático Global, 2001).

En los estudios realizador por el NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS), Lacis, Schmidt, Rind, y Ruedy (2010) señalan que la temperatura del planeta depende en última instancia del nivel atmosférico de dióxido de carbono, además Schmidt et al. (2010) plantea que el CO₂ es el responsable del 25% del forzamiento radiativo que sostiene el efecto invernadero de la Tierra, de manera que el dióxido de carbono se perfila como uno de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo cual causa consecuencias tales como olas de calor, sequía, incendios forestales, tormentas, aumento del nivel del mar, erosión, inundaciones, afectando así la salud de las persona, la agricultura, el transporte y la calidad del aire y del agua (Wuebbles et al., 2017).

➤ PM carbonoso:

Cuando combustonan materiales que contienen carbono, se emite una mezcla compleja de material particulado en base a este elemento, dentro de la fracción fina se reconoce al PM carbonoso, también llamado hollín, el cual puede variar en composición y generalmente incluye materiales inorgánicos como metales y sulfatos (EPA, 2012). Según sus propiedades termoquímicas, el hollín se subdivide en carbono elemental (CE), carbono orgánico (OC) y carbono orgánico refractario, mientras que según sus propiedades ópticas, este material se clasifica en carbono negro (BC), carbono orgánico (OC) y carbono orgánico coloreado, como se aprecia en la Figura 3.11 (Laskin, Laskin y Nizkorodov, 2015; Pöschl, 2005; Satheesh y Moorthy, 2005). Dentro de estos materiales, existen dos de ellos que presentan especial relevancia ya que influyen en la propagación de la radiación a través de la atmósfera, el más conocido de ellos es el *Black Carbon* (BC), que puede absorber radiación solar en un amplio rango espectral, desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR), además también se reconoce un tipo de carbono orgánico (OC) coloreado que absorbe radiación de manera eficiente en el espectro ultravioleta cercano (NUV) (300–400 [nm]) y en el espectro visible, conocido como *Brown Carbon* (BrC) (Bond et al., 2013; Andreae y Gelencsér, 2006), a continuación, se describe más en profundidad sobre ambos contaminantes:

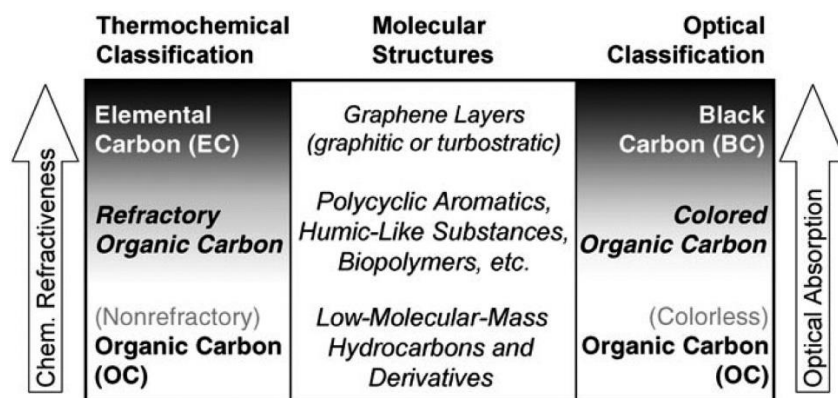


Figura 3.11 Clasificación óptica y termoquímica de los componentes carbonosos del PM.

Fuente: *Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects* (Pöschl, 2005).

-Black Carbon:

El *Black Carbon* (BC) o carbono negro, es un material conformado por carbono elemental (EC), y corresponde a un tipo de material particulado, componente del PM ultrafino, cuyo diámetro oscila entre 0,1 a 0,5 [µm], formando parte de los Contaminantes Climáticos de Vida Media Corta (CCVMC), los cuales presentan gran importancia en el calentamiento global y un tiempo de residencia corto en la atmósfera, que puede extenderse durante horas o días, en comparación con el tiempo de vida del CO₂, que permanece entre 5 a 200 años (Solaun, Sopelana, Arraibi y Pérez, 2014). El *Black Carbon* es insoluble en agua y en

solventes orgánicos, además no presenta la tendencia a reaccionar químicamente con otros elementos de la atmósfera, de manera que su proceso de remoción primario se lleva a cabo mediante deposición húmeda o seca en la superficie terrestre (Bond et al., 2013).

El BC se emite principalmente como resultado de la combustión incompleta de combustibles basados en carbono, cuando el oxígeno en la reacción es insuficiente, ocasionando que parte del carbono contenido en el combustible se convierta en *Black Carbon*, incluso si la cantidad de oxígeno es la adecuada, siempre existen zonas donde es insuficiente y no se genera una óptima mezcla de combustible y comburente. (Bond y Sun, 2005; Atlanting Consulting, 2009). Las principales fuentes de emisión de este contaminante son la quema de biomasa, la quema de biodiésel y carbón, los vehículos con motores a diésel, procesos industriales de generación de energía, quemas intencionales en la agricultura, incendios forestales, entre otros (Bond, 2007).

Los procesos naturales y antropogénicos que alteran el balance energético de la Tierra son impulsores físicos del cambio climático. El forzamiento radiativo cuantifica la perturbación de energía generada por esos impulsores dentro del sistema terrestre. Cuando el forzamiento radiativo presenta valores mayores a cero, significa que se está provocando un calentamiento cerca de la superficie terrestre, mientras que cuando es inferior a cero, se está generando un enfriamiento. Como se presenta en el Gráfico 3.20, según información proporcionada en el “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”, el CO₂ es el gas que más ha contribuido al forzamiento radiativo entre los años 1750 – 2011, además de otros gases que también han generado un efecto positivo en este balance, como el metano (CH₄), el óxido nítrico (N₂O), los COVs y el CO. Por otra parte, el forzamiento provocado por los aerosoles (material particulado), presenta dos componentes opuestos: el efecto de enfriamiento por parte de aerosoles indirectos y de carbón orgánico, y el efecto de calentamiento por parte del *Black Carbon*, lo cual contribuye a un forzamiento radiativo neto negativo de 0,9[W/m²], valor que presentan una gran variabilidad (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014; Myhre et al., 2014). El BC posee gran capacidad para absorber luz en todas las longitudes de onda del espectro, lo cual determina su influencia en la transferencia radiativa del planeta. Pese a su corta permanencia en la atmósfera, estas partículas impactan en la temperatura global al ser capaz de absorber la radiación solar, para después volver a emitirla en la atmósfera en forma de calor (Bond et al., 2013). Según estimaciones realizadas por Bond et al. (2013), el BC presenta efecto positivo en el forzamiento radiativo con valores que fluctúan entre 0,17 – 1,48 [W/m²]. Si bien, el efecto de calentamiento generado por el BC se ve compensado por el efecto de enfriamiento que provocan los demás aerosoles, existen evidencias de que el BC representa un papel importante en el calentamiento global. De acuerdo con el Instituto de Gobernanza y Desarrollo Sostenible (IGSD) dentro de los agentes de efecto invernadero, las emisiones de *Black Carbon* constituyen la segunda mayor contribución al cambio climático después del CO₂ (IGSD, 2008), y según las estimaciones de Jacobson (2007), de la Universidad de

Stanford, el carbono negro es responsable en un 16 % del calentamiento global, solo por detrás del dióxido de carbono.

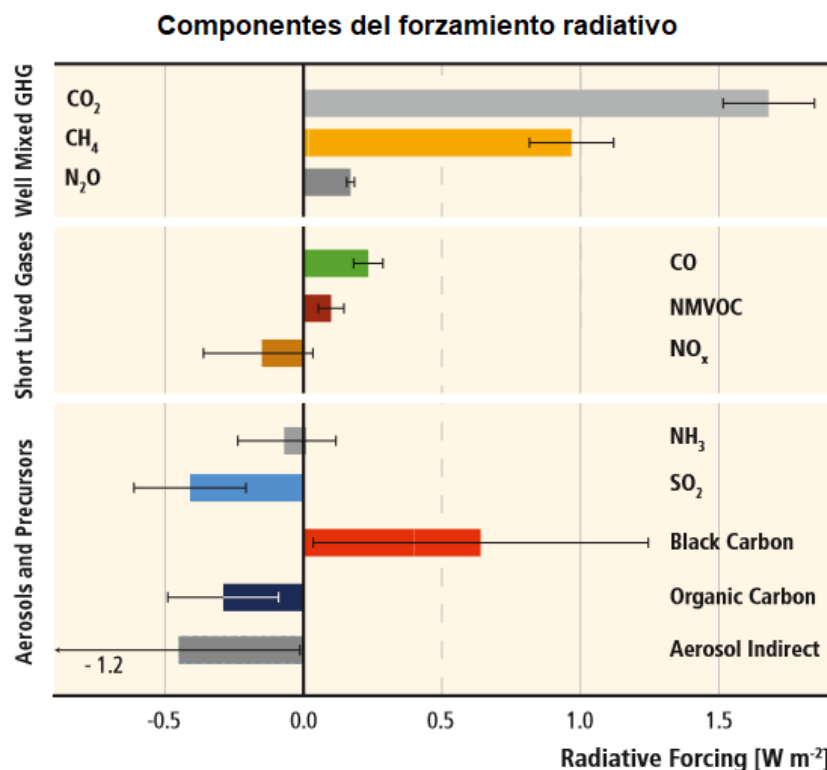


Gráfico 3.20 Componentes del forzamiento radiativo 1750-2011.

Fuente: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. (IPCC, 2014).

El BC afecta también la formación de nubes y los patrones de pluviosidad, y además cuando se deposita sobre nieve o hielo causa el oscurecimiento de estas superficies, disminuyendo así su reflectividad y aumentando la absorción de calor, de manera que acelera el proceso de fusión (Solaun et al., 2014). Las investigaciones realizadas por Ramanathan y Carmichael (2009), plantean que el CO₂ y el *Black Carbon* presentan igual importancia en la pérdida primaveral de la capa de nieve en Eurasia. De la misma forma, debido a que el BC es clasificado como material particulado fino, supone los mismos riesgos de inhalación que el PM 2,5, afectando los pulmones y alveolos, y aumentando el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Solaun et al., 2014).

-Brown Carbon:

El Brown Carbon (BrC) o carbono marrón, corresponde a una variedad de carbono orgánico coloreado, que puede absorber la radiación solar de manera eficiente en el espectro ultravioleta cercano y en menor medida en el espectro visible. Este material presenta propiedades físicas específicas, pero su composición química detallada es difícil de caracterizar (Andreae y Gelencsér, 2006; Patterson y McMahon, 1984). El BrC aparece típicamente acompañando al BC en las partículas de hollín, sin embargo, también pueden formarse partículas independientes de BrC con diámetros que oscilan entre 0,03 y 0,5 μm (Pósfai et al., 2004; Chakrabarty et al., 2010).

El BrC se genera a partir de emisiones primarias antropogénicas relacionadas con la quema de biomasa y de combustible fósiles, y también en un proceso conocido como combustión lenta, que ocurre cuando el oxígeno actúa sobre la superficie de un combustible sólido calentado, generando humo de color claro, donde se forma BrC, pero no se forma BC debido a que la temperatura resulta demasiado baja para mantener la combustión en llamas (EPA, 2012). Por otra parte, el BrC proviene también de emisiones biogénicas, como residuos de plantas, hongos y sustancias húmicas del suelo, además puede formarse mediante la oxidación de COVs, constituyendo aerosoles orgánicos secundarios (Lack et al., 2012; Andreae y Gelencsér, 2006). Aunque las fuentes de BrC pueden variar de acuerdo con los diferentes entornos (urbano, rural, bosque, océano, etc.) a nivel mundial la quema de biomasa se identificó como la principal fuente de emisión de BrC (Laskin et al., 2015; Chung et al., 2012).

Con respecto a los efectos que genera en el ambiente, el *Brown Carbon* puede afectar la capacidad de oxidación atmosférica, al restringir las tasas de fotólisis de los gases que son fotoquímicamente activos (Laskin et al., 2015). Además, también tiene incidencia en el forzamiento radiativo, según las simulaciones realizadas por Feng, Ramanathan, y Kotamarthi (2013), se sugiere que el BrC contribuye con +0,25 $[\text{W}/\text{m}^2]$ en este balance, lo que equivale aproximadamente al 19% del total provocado por la emisión de material particulado antropogénico, mientras que el 72% se atribuye al BC, de manera que el BrC puede desempeñar un papel importante en la fotoquímica y el ciclo hidrológico. Además, este material puede depositarse sobre nieve y glaciares, al igual que el BC, mediante procesos de deposición seca o húmeda, reduciendo el albedo de estas superficies, acelerando así su derretimiento (Flanner et al., 2007; Yang et al., 2015).

3.6.2 Aspectos legislativos

Considerando el contexto nacional sobre la contaminación atmosférica, es que a través de los años se han ido estableciendo diversas normativas legales para determinar y regular la calidad ambiental del país, la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente establece la existencia de normas primarias y secundarias para este propósito. A continuación, se detalla específicamente sobre cada una de ellas:

- **Norma Primaria de Calidad Ambiental:** “establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población” (Ley N°19300, 1994). A continuación, se presenta un listado de las normas primarias de calidad del aire actualmente vigentes:
 - Norma de calidad del aire para material particulado fino respirable PM_{2,5}, Ministerio del Medio Ambiente (Decreto Supremo N°12, 2011).
 - Norma de calidad del aire para material particulado respirable PM₁₀, Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°59, 1998 y Decreto Supremo N°45, 2001).
 - Norma de calidad del aire para dióxido de azufre (SO₂), Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°113, 2003).
 - Norma de calidad del aire para dióxido de nitrógeno (NO₂), Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°114, 2003).
 - Norma de calidad del aire para monóxido de carbono (CO), Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°115, 2002).
 - Norma de calidad para plomo en el aire, Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°136, 2001).
 - Norma de calidad de aire para ozono (O₃), Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°112, 2003).
- **Norma Secundaria de Calidad Ambiental:** “establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza” (Ley N°19300, 1994). Las normas secundarias de calidad del aire vigentes en el país son las siguientes:
 - Norma de calidad del aire para anhídrido sulfuroso (SO₂), Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Decreto Supremo N°22, 2010).

- Norma de calidad del aire para material particulado sedimentable (MPS) en la cuenca del río Huasco, Ministerio de Agricultura (Decreto Exento N°4, 1992).

A continuación, en la Tabla 3.12 se informan los niveles de concentraciones promedios máximos permitidas en el ambiente para los contaminantes identificados en las normas primarias de calidad ambiental y en la Tabla 3.13 se resumen los valores de para declarar distintos niveles de emergencia en relación a estos contaminantes según lo informado por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire [SINCA] (SINCA, 2018):

Tabla 3.12 Concentraciones permitidas en Norma de Calidad Primaria.

Contaminante	Concentración máxima promedio [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]			
	1[h]	8[h]	24[h]	Anual
PM_{2,5}	-	-	50	20
PM₁₀	-	-	120	50
SO₂	-	-	250	80
NO₂	400	-	-	100
CO	30.000	10.000	-	-
Plomo	-	-	-	0,5
O₃	-	120	-	-

Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema d Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA, 2018).

Tabla 3.13 Niveles de emergencia para según Norma de Calidad Primaria.

Contaminante	Niveles de emergencia [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]			
	Período	Nivel 1 (Alerta)	Nivel 2 (Preemergencia)	Nivel 3 (Emergencia)
PM_{2,5}	24 [h]	80 – 109	110 - 169	170 o superior
PM₁₀	24 [h]	195 – 239	240 – 329	330 o superior
SO₂	1 [h]	1.962 – 2.615	2.616 – 3.923	3.924 o superior
NO₂	1 [h]	1.130 – 2.259	2.260 – 2.999	3.000 o superior
CO	8 [h]	17.000 – 33.000	34.000-39.000	40.000 o superior
Plomo	-	-	-	-
O₃	1 [h]	400 – 799	800 – 999	1.000 o superior

Fuente: Elaboración propia en base a información del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA, 2018).

Por otra parte, debido a que la utilización de leña para calefacción es de carácter masivo en la zona centro-sur del país, como se mencionó anteriormente en la Tabla 3.3, y considerando además que se han visto intensificados los problemas de contaminación atmosférica en numerosas ciudades, el Gobierno de Chile decidió implementar diversas políticas para actuar de manera preventiva y correctiva frente a estas problemáticas:

- **Norma de emisión de material particulado para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera (DS N°39/2012):**

Normativa publicada en el año 2012, cuyo objetivo es proteger la salud de las personas estableciendo límites de emisión de material particulado para los artefactos nuevos que combustionen o puedan combustionar leña o pellet de madera y que presenten una potencia térmica nominal menor o igual a 25 [kW]. Esta norma se aplica en todo el territorio nacional, exceptuando a las zonas declaradas latentes o saturadas, donde esté vigente un plan de prevención o descontaminación con diferentes exigencias en este ámbito (Decreto Supremo N°39, 2012). Los calefactores nuevos que combustionen leña o pellet de madera deben cumplir con los siguientes límites máximos de emisión de material particulado:

Tabla 3.14 Límites de emisión de PM según potencia del calefactor.

Potencia Térmica Nominal [kW]	Emisión de PM [g/h]
Menor o igual a 8	2,5
Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5
Mayor a 14 y menor o igual a 25	4,5

Fuente: Norma de emisión de material particulado para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera (Decreto Supremo N°39, 2012).

- **Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción:**

Creada a fines del año 2015 por el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015), esta política busca contribuir al uso eficiente y sostenible de la leña en el país, teniendo como prioridad disminuir la contaminación atmosférica y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos en los espacios urbanos y rurales. Dentro del documento el Ministerio de energía (2015) define las líneas de trabajo a corto, mediano y largo plazo para los ejes principales en los que está basada esta política, los cuales son:

- Edificaciones más recientes: principalmente se impulsarán estándares de Eficiencia Energética, tanto para edificaciones nuevas como existentes, actualizando la

reglamentación térmica y favoreciendo la incorporación de nuevas tecnologías para este ámbito en el mercado nacional.

- Leña sustentable y de calidad: se busca impulsar la sostenibilidad del recurso forestal desarrollando un marco regulatorio para la leña y sus derivados, poniendo énfasis en aumentar la productividad del rubro y en la creación de centros de acopio y secado de leña.
- Hacia otros energéticos derivados de la madera para calefacción: pretende fomentar el desarrollo e innovación en el mercado, apoyando la investigación y la creación de centros logísticos de biomasa, como también se busca promover la producción y consumo de otros combustibles sólidos derivados de la madera.
- Tecnologías más eficientes para calefacción: se busca incentivar el recambio tecnológico de calefactores y proveer información respecto de la eficiencia de los equipos, como también se pretende fomentar la investigación y el desarrollo de mejores tecnologías para calefacción con energías renovables.
- Institucionalidad: se pretende contar con un organismo especializado con capacidades técnicas para el desarrollo de otros energéticos derivados de la madera, promoviendo las instancias de coordinación multisectorial permanente que aborde las problemáticas.
- Educación: se busca incorporar las temáticas de edificación eficiente, leña sustentable, combustibles derivados de la madera y tecnologías para calefacción, tanto en la educación formal y como en la no formal.

- **Planes de Descontaminación Atmosférica 2014 – 2018:**

Los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica son instrumentos de gestión ambiental establecido en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, que pretenden evitar que se supere una o más normas de calidad ambiental primaria o secundaria en una zona latente (Ley N°19.300, 1994). Si bien existen Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) nacionales previos al año 2014, en esta nueva política se establecieron 14 nuevos PDA, con medidas efectivas para la reducción de emisiones en las zonas declaradas como saturadas o latentes en Chile, y se implementaron además medidas de corto plazo en zonas donde no hay planes y existen datos de monitoreo con altas concentraciones de material particulado, cubriendo una totalidad de 77 comunas a lo largo del país (MMA, 2014).

- **Programa de recambio de calefactores:**

Programa implementado por el Ministerio del Medio Ambiente cuyo objetivo consiste en disminuir las emisiones de contaminantes generados a partir de la combustión residencial de leña en condiciones poco eficientes. Los beneficiarios acceden a un nuevo calefactor, que funciona con *pellet*, parafina, gas o leña, entregando previamente el antiguo calefactor utilizado. Se han publicado resoluciones exentas para llevar a cabo este programa en las siguientes regiones del país: O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén (MMA, 2018a). En el Gráfico 3.21 se aprecia el constante aumento a través de los años que ha tenido a nivel nacional la cantidad de equipos cambiados por calefactores a leña, *pellet* y parafina en las viviendas del país, de acuerdo con el Programa de Recambio de Calefactores, los cuales alcanzan aproximadamente una cantidad acumulada hasta el 2017 de 10.000 equipos a leña, 9.000 calefactores a *pellet* y 700 a parafina (Escobar y Weil, 2018).

Unidades acumuladas según Programa de Recambio de Calefactores

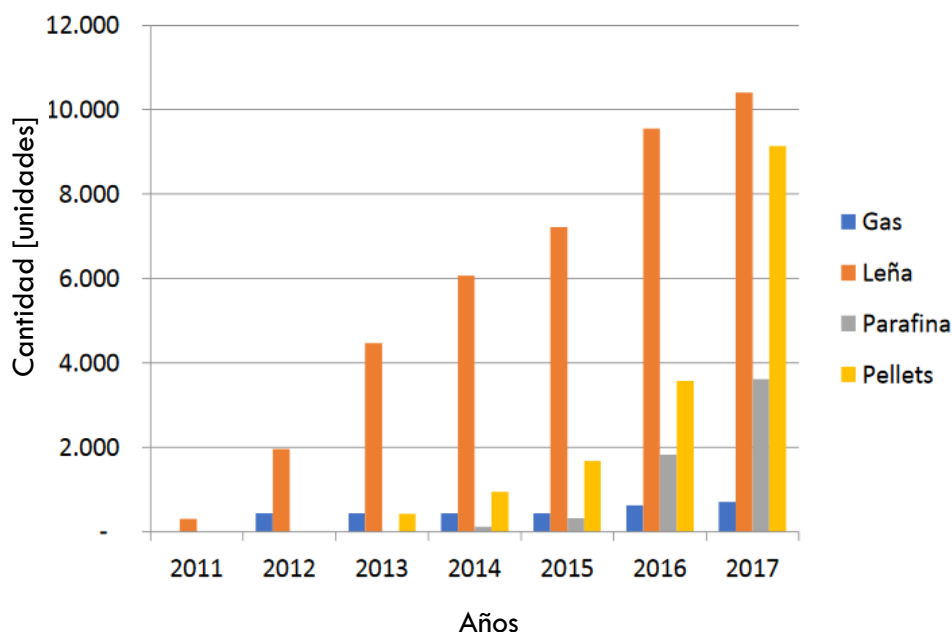


Gráfico 3.21 Unidades acumuladas según Programa de Recambio de Calefactores

Fuente: Identificación de la Cadena Productiva de Elaboración de Pellets de Madera (Escobar y Weil, 2018).

3.6.3 Niveles de contaminación atmosférica en Chile

En Chile la calidad del aire representa uno de los principales desafíos para la autoridad ambiental y se ha convertido en un problema prioritario de salud pública (MMA, 2018d). Según el último reporte “WHO Global Ambient Air Quality” publicado por la OMS, donde se analizaron los niveles de contaminación atmosférica con respecto a PM_{2,5} en 108 países desde el año 2010 hasta 2016, existen 6 ciudades de Chile que perfilan en el ranking como las 20 más contaminadas de América, donde destacan: Coyhaique en 1° lugar, Padre las Casas en 10° lugar, Osorno en 11° lugar, Temuco en 17° lugar, Andacollo en 18° lugar y Rancagua en 20° lugar (OMS, 2018). Por otra parte, en un estudio más reciente publicado por IQAir (2019) sobre los niveles de contaminación atmosférica durante el año 2018 en Latino América y el Caribe, se determinó que dentro de las 15 ciudades con mayor concentración anual de PM_{2,5}, pertenecen a Chile 9 de estas ciudades, donde destacan principalmente Padre Las Casas, Osorno, Coyhaique, Valdivia y Temuco, siendo las 5 más contaminadas como se aprecia en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Promedio anual de PM_{2.5} [µg/m³] en Latino América y el Caribe 2018.

Fuente: 2018 World Air Quality Report (IQAir, 2019).

Chile cuenta con una red de Estaciones de Monitoreo de calidad del aire con Representatividad Poblacional (EMRP), orientada principalmente a la medición de PM₁₀ y PM_{2,5}. Como se expresa en el “Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente 2018”, donde se señala que en el año 2017, 22 estaciones de monitoreo (69% del total) presentaron concentraciones superiores al valor límite según la norma primaria de calidad anual para PM_{2,5}, que exige 20 [µg/m³], según se aprecia en el Gráfico 3.22, el cual representa los niveles de contaminación promedio trianual con PM para las diferentes estaciones a lo largo del país. Además, se observa también que las estaciones que presentan mayores concentraciones de PM_{2,5} fueron las que se localizan en la zona sur del país, donde el valor más alto se registró en la estación Coyhaique II, con un promedio 57 [µg/m³] trianual, igualmente desatacan las estaciones de Coyhaique I, Padre Las Casas, Osorno y Valdivia (MMA, 2018d).

Dada esta información, el Ministerio del Medio Ambiente (2018d) establece que alrededor de 10.790.000 de personas dentro del territorio nacional, están expuestas anualmente a concentraciones de PM_{2,5} que superan la normativa vigente. Con respecto a los valores de PM₁₀, se aprecia en el Gráfico 3.22, que 20 de las estaciones de monitoreo (57% del total) superaron el límite normativo anual para concentraciones de PM₁₀, que exige 50 [µg/m³]. Los niveles más altos de contaminación se observaron y en las estaciones del extremo sur, Coyhaique I y Coyhaique, como también en el valle central, en las estaciones de Santiago, Pudahuel, El Bosque, Quilicura y Rancagua (MMA, 2018d).

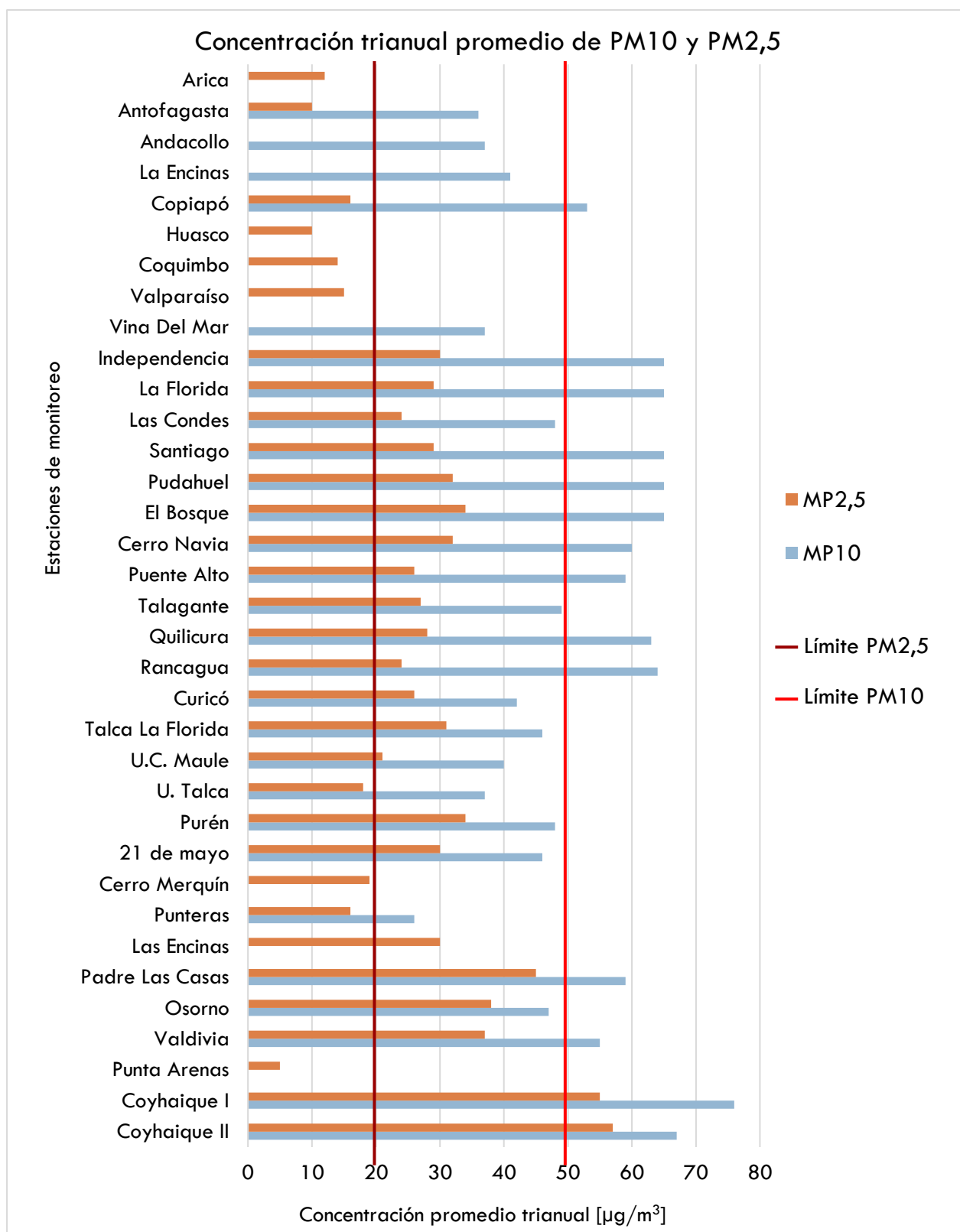


Gráfico 3.22 Concentración trianual promedio PM10 y PM 2,5 año 2017.

Fuente: Elaboración propia con información del Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2018d).

Nota: En los casos del gráfico donde las estaciones no presentan valores para PM10 o PM2,5 significa que estos contaminantes no fueron medidos en la respectiva estación, no es porque la concentración sea cero.

La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en su artículo 2, define a las zonas donde existen altos índices de contaminación como:

- Zona Latente: “aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo, se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental” (Ley N°19.300, 1994).
- Zona Saturada: “aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas” (Ley N°19.300, 1994).

La declaración de una zona saturada o latente se asocia posteriormente a un respectivo Plan de Descontaminación Atmosférica. Desde el año 1992 se han establecido procedimientos para declarar estas zonas con el objetivo de reducir la concentración de emisiones y cumplir así con la normativa de calidad ambiental. Las localidades que han sido declaradas a través de los años por el Ministerio del Medio Ambiente como zonas saturadas en PM10 son las siguientes: comunas de Calama, Andacollo, Tocopilla, Talca, Maule, Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén, Talcahuano, Los Ángeles, Valdivia, Osorno, Chillán y Chillán Viejo, ciudad de Coyhaique y su zona circundante, localidad de Huasco y su zona circundante (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN], 2018). Por otra parte, aquellos lugares que han sido declarados como zonas saturadas con respecto al PM2,5 corresponden a: valle central de la provincia de Curicó, comunas de Concón, Quintero, Puchuncaví, Región Metropolitana, comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén, Talcahuano, Los Ángeles, Chillán y Chillán Viejo, Osorno, Valdivia, Temuco, Padre Las Casas, ciudad de Coyhaique y su zona circundante (BCN, 2018). Cabe destacar, que numerosas de estos lugares aún continúan presentado altos niveles de concentración de PM que superan las normativas vigentes según lo expuesto en el Gráfico 3.22, sobre los niveles de concentración trianual promedio de PM10 y PM2,5, como las ciudades de Andacollo, Santiago, Curicó, Maule, Talca, Osorno, Valdivia, Padre Las Casas, Coyhaique, entre otras, (MMA, 2018).

Las principales fuentes emisoras de contaminantes se clasifican, según el Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile (2012), en fuentes fijas, móviles y fugitivas de acuerdo con las características que presentan:

- Fuentes fijas: son aquellas que fueron diseñadas para operar en un lugar fijo mientras descargan sus emisiones a través de un ducto o chimenea (Decreto Supremo N° 4, 1992).
- Fuentes móviles: son las cuales se desplazan de manera autónoma mientras emiten contaminantes a través de su trayectoria (MMA, 2012).
- Fuentes fugitivas: son aquellas emisiones que se canalizan mediante ductos, chimeneas u otros sistemas hacia el exterior (MMA, 2012).

En el “Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente 2018” se analizaron también las principales fuentes de emisión de NO_x, SO₂ y PM_{2,5} dentro el país. A continuación, en el Gráfico 3.23 se presentan los niveles de NO_x generados en todo el territorio nacional durante el año 2016, clasificados según región y fuente de emisión, de acuerdo con los últimos datos publicados por el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC). Se aprecia que existen 3 regiones (Región de Antofagasta, Metropolitana y Biobío) donde se emiten cantidades considerables de NO_x, valores que superan las 30.000 [t/año], los cuales provienen principalmente del transporte en ruta y de las industrias termoeléctricas, que equivalen a fuentes difusas y fijas respectivamente. Considerando los niveles de emisión de NO_x en todas las regiones del país, se calcula que aproximadamente el 15% proviene de combustión de leña residencial, el 1% de fundiciones, el 10% de la industria del papel y celulosa y el 26% de termoeléctricas, el 30% de transporte en ruta y el 18% de otros rubros industriales (MMA, 2018d).

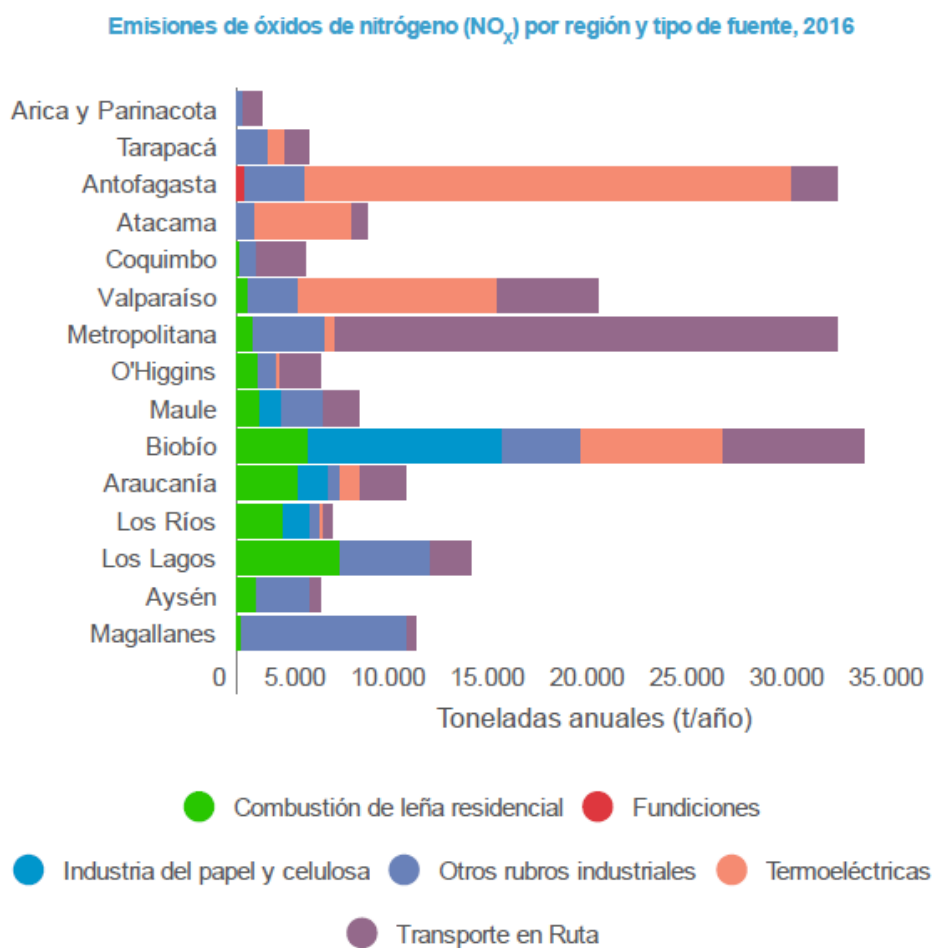


Gráfico 3.23 Emisiones de NO_x 2016.

Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2018d).

Con respecto a las emisiones de SO₂ durante el año 2016, se observa en el Gráfico 3.24 que fueron generadas preferentemente en las regiones de Atacama, Antofagasta y O'Higgins en orden decreciente, donde se emiten cantidades que sobrepasan las 70.000 [t/año], destacando en particular la Región de Antofagasta con valores que superan las 120.000 [t/año] de SO₂. Estas emisiones provienen de fuentes fijas, principalmente de fundiciones y en menor medida de termoeléctricas. Considerando las cantidades de SO₂ generadas en todas las regiones del país, se establece que alrededor del 80% proviene de fundiciones, el 15% de termoeléctricas, el 3% de la industria del papel y celulosa y finalmente el 2% de otros rubros industriales (MMA, 2018d).

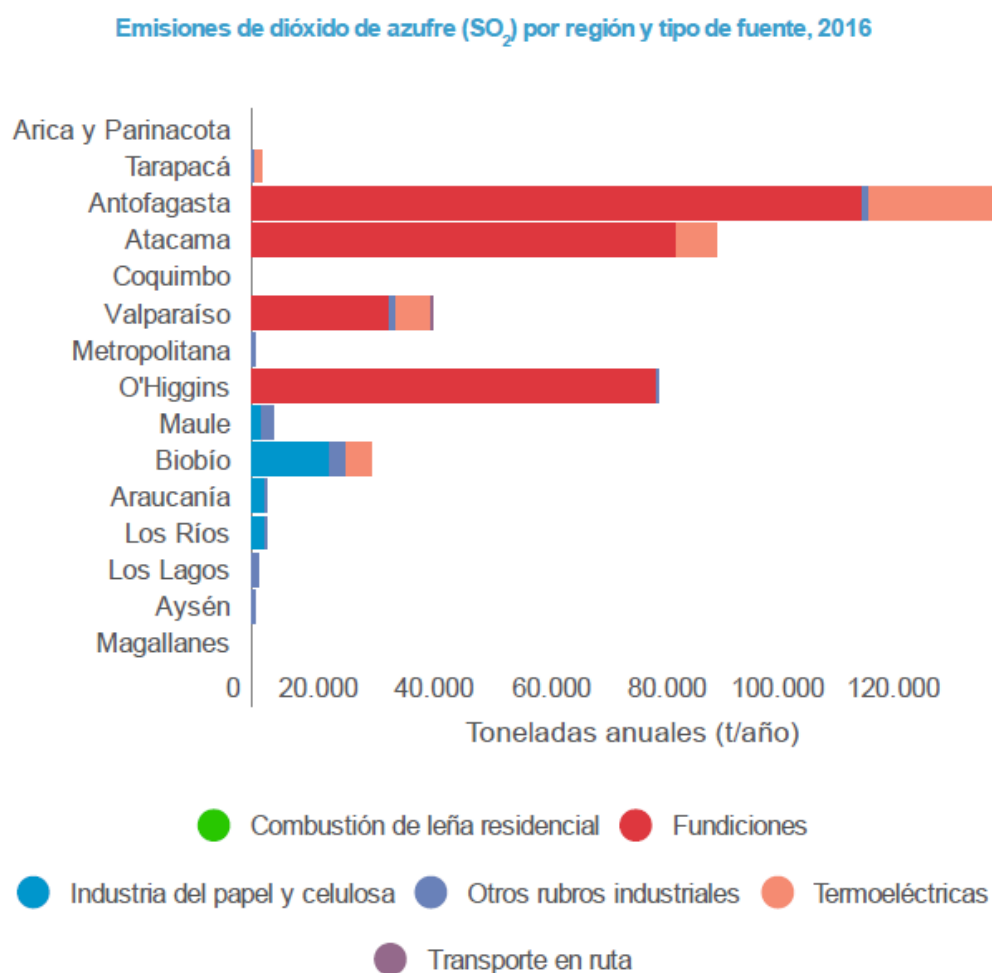


Gráfico 3.24 Emisiones de SO₂ 2016.

Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2018d).

Respecto a las emisiones de PM_{2,5} generadas en todo el país durante el año 2016, el MMA (2018d) establece que las regiones del Biobío, Araucanía y Los Lagos presentaron altos niveles de emisión de PM_{2,5}, los cuales superan la 20.000 [t/año] en cada zona, y provienen mayoritariamente de una fuente fija en específico, la combustión de leña residencial, como se aprecia en el Gráfico 3.25. Considerando entonces las cantidades de PM_{2,5} emitidas en todas las regiones del país, se establece que aproximadamente el 86% proviene de combustión residencial de leña, el 6% de transporte en ruta, el 3% de termoeléctricas, el 2% de la industria del papel y celulosa, el 2% proviene de otros rubros industriales y el 1% restante del transporte en ruta (MMA, 2018d).

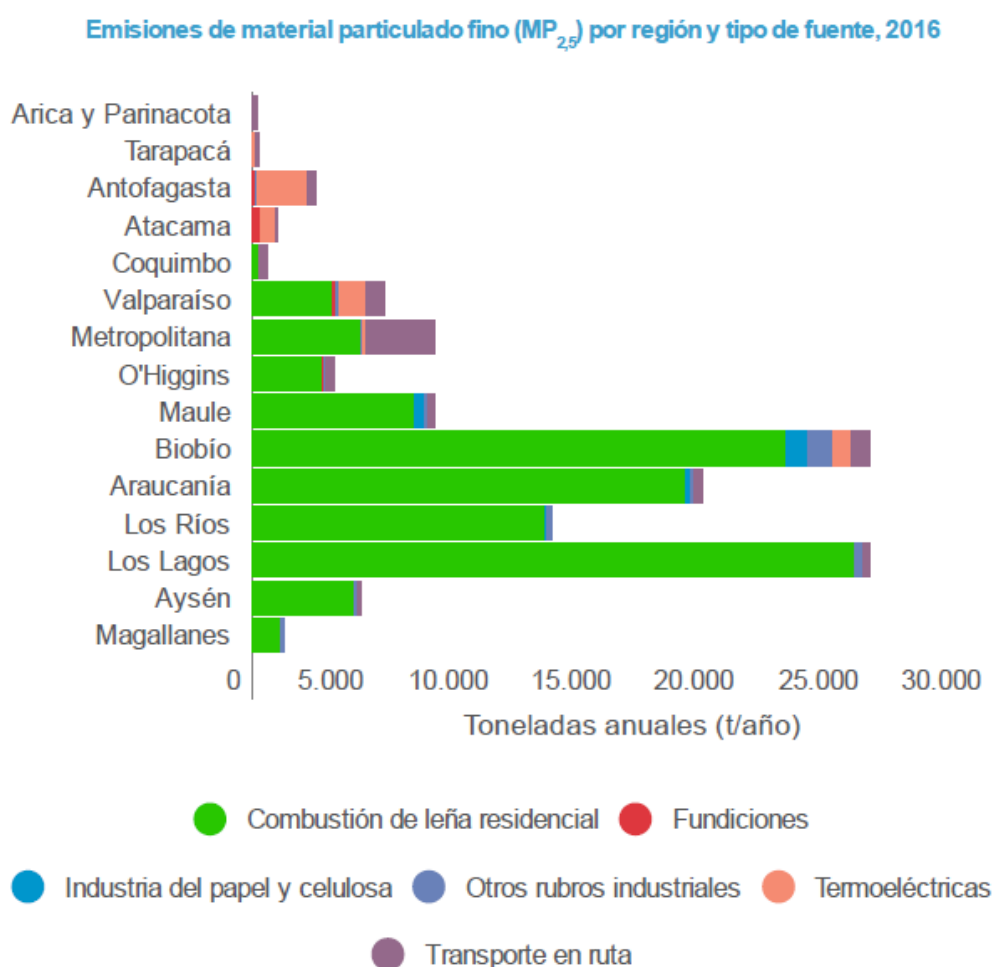


Gráfico 3.25 Emisiones de PM_{2,5} año 2016.

Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2018d).

El Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA] (2018d) publicó recientemente el “Tercer Informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018” donde se reportan las emisiones anuales de todos los Gases de Efecto Invernadero (GEI), de los gases precursores y de *Black Carbon*. Los últimos datos informados corresponden al año 2016 donde se contabilizó un total de 22.186.400 [t] de emisiones netas de CO₂, un total de 562.600 [t] de emisiones netas de CH₄, 22.800 [t] netas de N₂O y para el caso de los gases fluorados un total de 2.869.500 [tCO₂ eq.]. Respecto a los niveles históricos de emisiones de GEI, se establece que han ido aumentando considerablemente a través de los años, estableciéndose que desde 1990 hasta 2016 las emisiones de GEI totales se incrementaron en un 114,7 %, y entre 2013 y 2016 aumentaron en un 7,1 % (MMA, 2018e).

Respecto a la participación de cada sector en las emisiones de GEI totales, en el Gráfico 3.26 se aprecia que el sector Energía originó un 78,0 % de las emisiones, seguido del sector Agricultura con un 10,6 %, del sector IPPU (procesos industriales) con un 6,2 % y finalmente del sector Residuos con 5,2 %. Se establece entonces que en el balance de GEI las emisiones del sector Energía son las que presentan mayor relevancia, lo cual se atribuye principalmente a la quema de combustibles fósiles. Cabe destacar que en 2016 las emisiones de GEI estuvieron encabezadas por el CO₂, representando un 78,7 % del total, seguido del CH₄ con un 12,5% (MMA, 2018d).

Emisiones de GEI total (kt CO₂ eq.) por sector 1990-2016

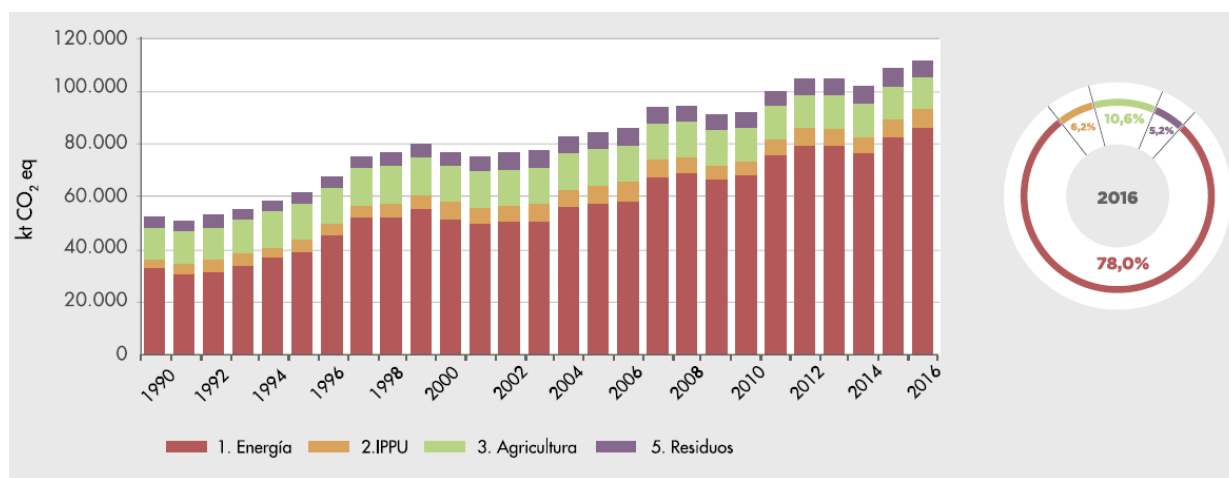


Gráfico 3.26 Emisiones de GEI anuales.

Fuente: Tercer Informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018. (MMA, 2018e).

Por otra parte, se estima que las emisiones totales de *Black Carbon* durante el año 2016 fueron 19.500 [t] para todo el país. Estos niveles de emisión se han ido incrementado a través de los años, presentado un 71,8% de aumento desde 1990 y un 0,8% desde 2013. En el Gráfico 3.27 se aprecian las emisiones anuales de BC clasificadas según la fuente que

las originó, donde destaca principalmente el sector Energía con un 90,7%, seguido del sector UTCUTS (actividad silvícolas y cambio de uso de la tierra) con un 7,5 %, del sector Agricultura con un 1,7 %, del sector IPPU (procesos industriales) con un 0,1% y finalmente del sector Residuos con un porcentaje marginal de participación. Se considera que en el Gráfico 3.25 la principal causa de la relevancia del sector Energía corresponde a las emisiones asociadas a la quema de biomasa con fines energéticos. Por otra parte, los notables aumentos de emisiones de BC en los años 1998, 2002, 2007, 2014 y 2015 dentro del Gráfico 3.27, se explican debido a las emisiones de carbono negro asociadas a los incendios forestales (MMA, 2018d).

Emisiones de Black Carbon (kt) por sector, serie 1990-2016

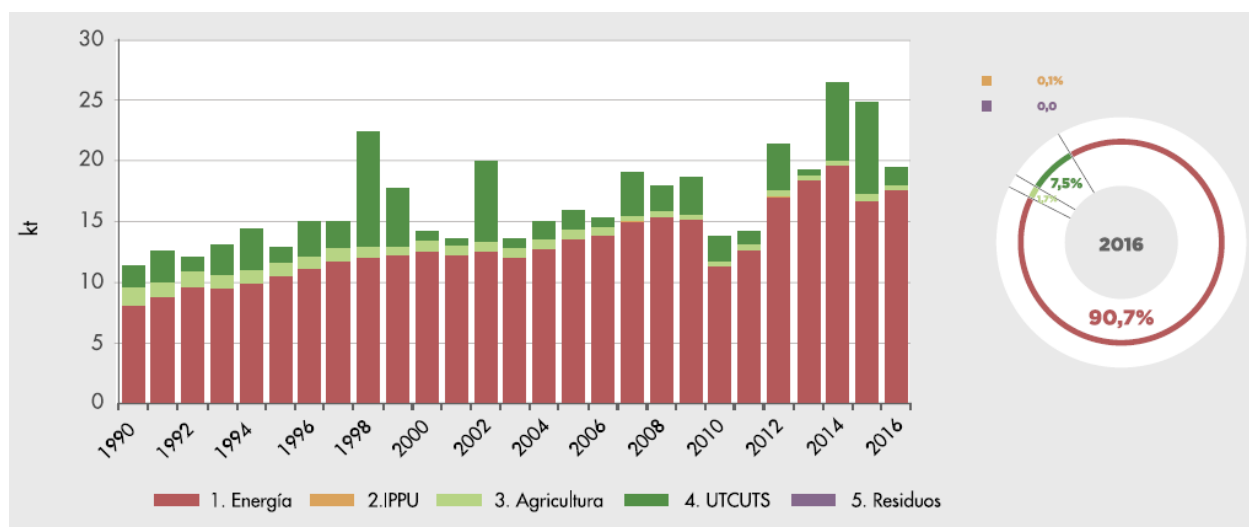


Gráfico 3.27 Emisiones de Black Carbon por sector.

Fuente: Tercer Informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018. (MMA, 2018e).

Con respecto a los niveles de contaminación en la atmósfera, los episodios críticos corresponden a la cantidad de alertas, preemergencias y emergencias declaradas según lo presentado en la Tabla 3.13, en el capítulo anterior, que da a conocer los rangos específicos de concentraciones donde cada contaminante considerado en las normas primarias de calidad del aire, presenta niveles riesgosos para la salud de las personas (SINCA, 2018; Decreto Supremo N°12, 2011). Henríquez y Santana (2018), con base a información del SINCA, señalan que los episodios críticos totales se han visto aumentados en el periodo 2017-2018 desde las regiones de O'Higgins hasta Los Lagos, solamente la Región de Aysén presentó una disminución de estos episodios en un 4,1%, como se observa en la Figura 3.13. Las ciudades que presentaron mayores niveles de episodios críticos fueron Temuco y Padres Las Casas, con un total de 111 episodios en el año 2018, seguida por la ciudad de Osorno con 93 episodios, destacan también Coyhaique y Valdivia, con 93 y 80 episodios críticos respectivamente. Cabe destacar que las ciudades que presentaron un mayor porcentaje de variación respecto a la cantidad de estos episodios fueron: Talca y Maule, con un 81,5% de aumento, seguida de Temuco y Padre las Casas, con un 50% (Henríquez y Santana, 2018).

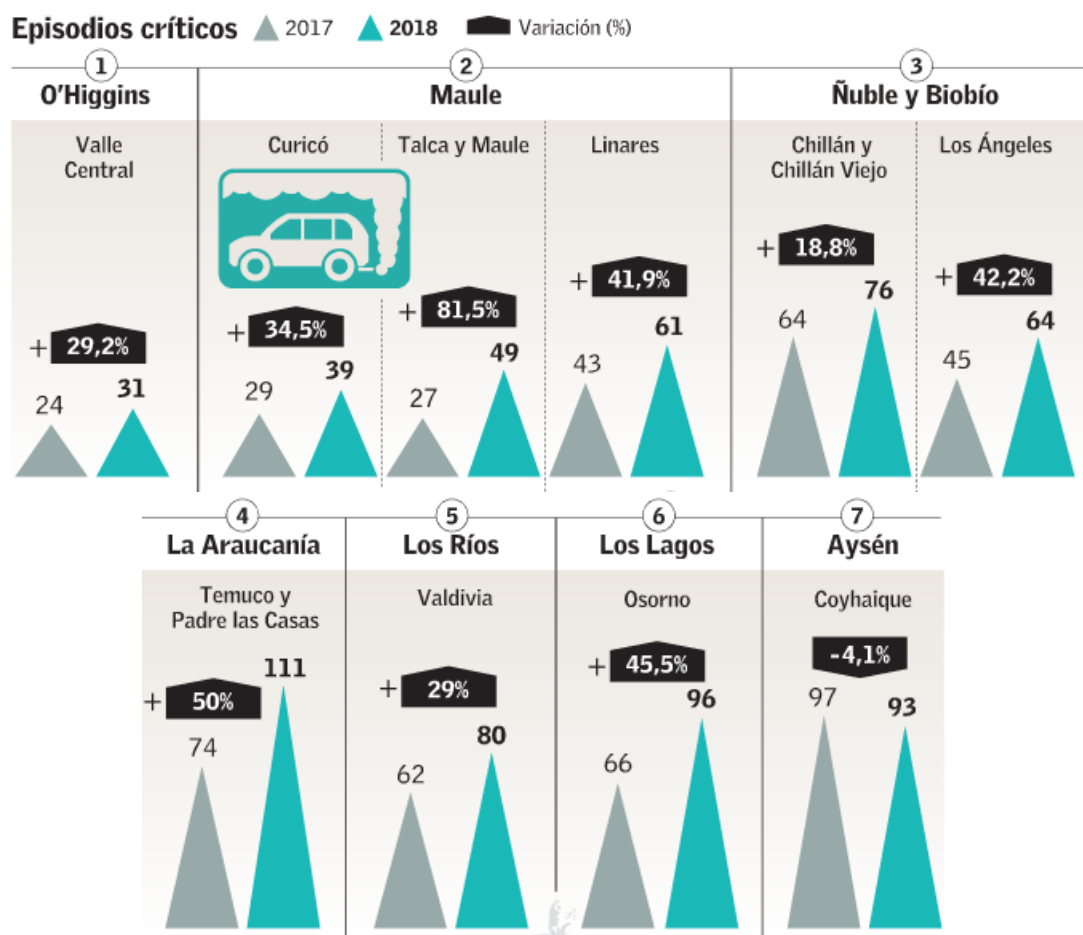


Figura 3.13 Episodios críticos de calidad del aire 2017-2018.

Fuente: El Mercurio, con información de SINCA (Henríquez y Santana, 2018).

Respecto a las consecuencias negativas que los contaminantes han ocasionado en la población, el informe “State of Global Air 2019” señala que las muertes ocurridas en Chile debido a la inhalación de PM_{2,5} han ido en aumento a través de los años, llegando a alcanzar un total de 4.760 en el año 2017, además también se establece que las muertes causadas por la inhalación de ozono fueron de 285 personas en el mismo año (Institute for Health Metrics and Evaluation [IHME], Evaluation’s Global Burden of Disease Project [GBD] y Health Effects Institute [HEI], 2017). Asimismo, el Ministerio del Medio Ambiente (2018d) indica que la mortalidad prematura en el año 2017 debido a problemas cardiopulmonares ocasionados por inhalación de PM_{2,5}, fueron de 3.494 personas adultas sobre los 30 años, además se contabilizó un total de 2.785 admisiones hospitalarias para el mismo año dentro de un amplio rango etario, desde lactantes hasta adultos mayores, debido a problemas cardiovasculares pulmonares y ataques de asma, como se indica en la Tabla 3.15. Por otra parte, las visitas a salas de emergencia durante el 2017, asociadas a la inhalación de PM_{2,5}, ascienden a 90.001 casos debido a episodios de bronquitis aguda, en personas desde 0 a 17 años, y por último, las restricciones de actividad generadas por la contaminación de PM_{2,5} alcanzaron un total de 3.958.215. Se estima que estas situaciones han ocasionado costos sociales en el país equivalentes a 2.493 [MM USD] durante el año 2017 (MMA, 2018d).

Tabla 3.15 Mortalidad y morbilidad asociada a la exposición de PM_{2,5} año 2017.

Tipo de efecto	Causa	Grupo de edad	N° casos	Costos sociales (MM USD)
Mortalidad prematura	Cardiopulmonar	Mayores de 30 años	3.494	2.417
Admisiones hospitalarias	Ataques de asma	Entre 0 y 64 años	130	0,16
	Cardiovasculares	Mayores de 18 años	1.503	3,9
	Pulmonar crónica	Mayores de 18 años	211	0,35
	Neumonía	Mayores de 65 años	941	1,7
Visita a la sala de emergencias	Bronquitis aguda	Entre 0 y 17	90.001	5,2
Restricción de actividad	Días de pérdida de trabajo	Entre 18 y 64	731.613	28
	Días de actividad restringida	Entre 18 y 65	3.226.602	37

Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (MMA, 2018d).

4. Definición del problema y propuesta de solución

Según lo señalado en los Antecedentes Generales, la contaminación atmosférica en zonas urbanas es uno de los principales problemas ambientales del centro-sur del país, cuyo origen corresponde principalmente a las emisiones generadas por la combustión de diversos materiales para calefaccionar las viviendas (MMA, 2018d), lo cual genera anualmente entre 3.400 – 4.700 muertes, además de numerosas urgencias y admisiones hospitalarias en toda la población del país (IHME, GBD y HEI, 2017; MMA 2018d).

Específicamente en el sector Residencial, la Región del Biobío, de la Araucanía, de Los Ríos y de Aysén dependen en más de un 90% de la biomasa tipo leña para calefaccionar las viviendas, según datos del año 2015 (MMA, 2016). Si bien frente a esta problemática el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Energía han impulsado diversos Planes de Descontaminación Atmosférica y Programas de Recambio de Calefactores, con el objetivo de reducir el consumo de leña paulatinamente (MMA, 2018a; Ministerio de Energía, 2015a), aún continúa existiendo un gran número de equipos a leña, considerando que el recambio de calefactores acumula hasta el 2017 un total de 2.300 recambios, valor que resulta significativamente inferior en relación con el número total de equipos a leña estimados en el año 2015, con una cantidad total aproximada de 1.800.000, de los cuales solo el 0,13% ha sido cubierto por el Programas de Recambio de Calefactores hasta el año 2017 (Escobar y Weil, 2018; Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Teniendo en consideración también que Chile es un país con amplios recursos forestales y una industria agrícola y maderera de escala considerable, existe una enorme cantidad de residuos que son generados anualmente por parte de estas industrias, los cuales superan las 5.000.000[t] anuales por parte de la industria agrícola, y las 300.000[t] por parte de la industria forestal, materiales que en muchos casos terminan en rellenos sanitarios, siendo foco de incendios forestales o en quemas autorizadas o no autorizadas, concentradas principalmente en las regiones del Biobío, de la Araucanía y del Maule (ODEPA, 2017; Gysling y Soto, 2015).

Contemplando entonces los elevados índices de contaminación atmosférica en la zona centro-sur de Chile, principalmente con PM10 y PM2.5 (MMA,2018d) y la necesidad de diversificar la matriz energética nacional, es que el proyecto FONDEF ID15I10580 pretende dar solución a esta problemática investigando un procedimiento para aprovechar la enorme disponibilidad de residuos de la industria agrícola y forestal con el objetivo de otorgarle valor agregado a estos desechos y transformarlos en biomasa útil, por lo que se investigará y optimizará la producción de *pellets* que serán quemados en una cámara de combustión en condiciones controladas y monitoreadas, para diferentes formulaciones de biomasa residual de relevancia nacional, evaluando sus emisiones, poder calorífico y rendimiento de combustión.

5. Procedimiento experimental

El procedimiento llevado a cabo en esta experimentación requirió de tres fases. Primero se realizó la peletización del material crudo proveniente de los residuos agroforestales, luego se procedió con la etapa de quemado en la Cámara de Combustión Controlada de Emisiones (3CE), para finalmente efectuar el análisis de las cenizas que permanecieron luego de la combustión.

5.1 PARTE 1. Proceso de peletizado

5.1.1 *Pellet* de biomasa residual

El procedimiento de peletizado corresponde a la formación de la estructura física del *pellet* a partir de la biomasa cruda, el cual se llevó a cabo en la Universidad de Santiago de Chile. En el caso específico de esta experimentación la industria agrícola aportó con biomasa correspondiente a residuos de cáscara y paja de avena, además de residuos de orujos de uva prensados. Por su parte, la industria forestal aportó con biomasa proveniente de aserrín de pino radiata.

Para asegurar la reproducibilidad del procedimiento y para evitar la contaminación cruzada entre los distintos tipos de biomasa, primeramente fue necesario realizar entre cada proceso de peletizado, una correcta limpieza de la máquina utilizada, además de la generación de una partida inicial de *pellets* que fue descartada, con el fin ambientar la maquinaria al nuevo material. Posteriormente fueron confeccionados los *pellets* definitivos mediante una máquina peletizadora que le proporcionó la estructura final, utilizando una presión de consolidación de 70 [bar].

Posteriormente, la biomasa ya peletizada requirió de un análisis elemental con el objetivo de tener información para calcular el flujo de aire teórico y el exceso de oxígeno del proceso de combustión, los cuales se detallarán en el Capítulo 5.2.1.1. Para ello, todas las variedades de *pellet* fueron enviadas a la Universidad de Castilla La Mancha para ser caracterizadas. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Análisis elemental pellet avena, uva y pino.

Biomasa	Análisis elemental						Composición lignocelulósica		
	% C	%H	%N	% S	%Cl	%O	% Lignina	% Celulosa	% Hemicelulosa
Avena	46,77	7,25	0,49	0,05	0,24	40,77	12,9	37,6	23,3
Uva	59,44	7,78	0,08	0,04	0,04	31,73	56,7	17,9	8,0
Pino	51,91	6,89	0,07	0,08	0,02	40,82	30,0	42,0	25,0

Fuente: Datos proporcionados por Universidad de Castilla La Mancha, España (2017).

5.1.2 Pellet comercial

Por otra parte, en esta experimentación también se utilizará como combustible *pellet* proveniente del comercio nacional, con el objetivo de comparar sus resultados con los obtenidos a partir de las otras variedades de biomasa. En la Figura 5.1 se aprecia la estructura del *pellet* comercial con el que se trabajará.



Figura 5.1 Pellet comercial.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

Este tipo de biomasa es fabricada por la empresa Ecomas y está confeccionada 100% con pino radiata proveniente de cultivos energéticos de esta especie y no contiene aditivos ni aglomerantes, además presenta sello de calidad internacional FSC, el cual certifica que su materia prima proviene de bosques manejados de manera sustentable, de la misma manera Ecomas tiene adjudicado un certificado ENplusA1, garantizando su alta calidad según lo expuesto anteriormente en la Tabla 3.6 (Ecomas, 2018). Las características de este *pellet* informadas por el fabricante se resumen en la Tabla 5.2, asimismo en el Apéndice A1 se adjunta una ficha con los resultados del análisis de laboratorio que realiza periódicamente Ecomas a su biomasa.

Tabla 5.2 Análisis de calidad pellet comercial Ecomas.

Parámetro	Resultado Ecomas	Norma EnPlusA1
Durabilidad mecánica	98,5 (%)	$\geq 98,0$
Densidad Granel	670 (kg/m ³)	$750 \geq DG \geq 600$
Humedad	6,3 (%)	≤ 10
Contenido Cenizas 550°C	0,16 (%)	$\leq 0,7$
Poder calorífico inf.	5,01 (kWh/kg)	$\geq 4,6$
Finos (<3,15mm)	0,2 (%)	$\leq 0,5$
Largo (3,15 ≤ L ≤ 40 mm)	99 (%)	$\geq 98,5$
Largo (40 ≤ L ≤ 45 mm)	0,8 (%)	≤ 1
Diámetro	6,0 (mm)	6 +/- 1

Fuente: Certificaciones Ecomas (Ecomas,2018).

Finalmente, en la Tabla 5.3 se detalla la clasificación de todas las variedades de *pellets* con las que se trabajará, según lo expuesto anteriormente en la Figura 3.3 sobre la clasificación de la biomasa.

Tabla 5.3 Clasificación de la biomasa en estudio.

Biomasa	Clasificación		
	Según composición	Según origen	Según estado
Pellet avena	Amilácea	Residual	Sólido
Pellet uva	Alcoholígena	Residual	Sólido
Pellet pino	Lignocelulósica	Residual	Sólido
Pellet comercial	Lignocelulósica	Cultivo energético	Sólido

Fuente: Elaboración propia.

5.2 PARTE 2. Proceso de combustión de la biomasa

A continuación, se detalla el funcionamiento de la Cámara de Combustión Controlada de Emisiones (3CE) donde se llevaron a cabo las quemas de biomasa, además de las pruebas preliminares y las respectivas adaptaciones realizadas para la correcta operación con biomasa del tipo *pellet*. Por último, se especificará el procedimiento experimental realizado en el Laboratorio de Combustión del Centro de Tecnologías Ambientales de la Universidad Técnica Federico Santa María.

5.2.1 Cámara de combustión Controlada de Emisiones (3CE)

La 3CE fue desarrollada y patentada por el Centro de Tecnologías Ambientales de la Universidad Técnica Federico Santa María, la cual posee una patente nacional N°843-2008, 2010, una patente otorgada en EE.UU, US009791151B2, 2017, además de un proceso pendiente para una patente internacional PCT-CL00058, 2010, en los países adscritos al Tratado de Cooperación en materia de Patentes.

El equipo 3CE es un sistema diseñado con el objetivo de realizar ensayos experimentales de combustión de manera controlada y reproducible utilizando diferentes tipos de biomasa, con el fin de generar resultados confiables respecto al proceso de combustión y sus emisiones, transformándose en un equipamiento de laboratorio estandarizado para este propósito.

Inicialmente este equipo fue utilizado para quemar biomasa del tipo leña, por lo tanto, en el pasado sus características fueron optimizadas para tal efecto, sin embargo, debido a que en esta experimentación se trabajará con *pellets*, será necesario adaptar la 3CE para este nuevo tipo de biomasa.

El sistema completo está conformado por 3 unidades funcionales construidas en acero inoxidable tipo 316, que presenta alta resistencia mecánica y térmica. Las unidades se ensamblan entre sí mediante abrazaderas de fácil armado (uniones tipo clamp) construidas del mismo material, facilitando así el montaje y desmontaje del equipo.

A continuación, en la Figura 5.2 se ilustra el esquema general de cada una de las unidades que constituyen la 3CE, las cuales son: pre-cámara, horno de combustión y cámara de recolección de emisiones (post-cámara), donde se aprecia también el sistema de alimentación, las zonas de inyección de aire, además de los puertos y *cartridges* de muestreo, los cuales serán especificados más adelante.

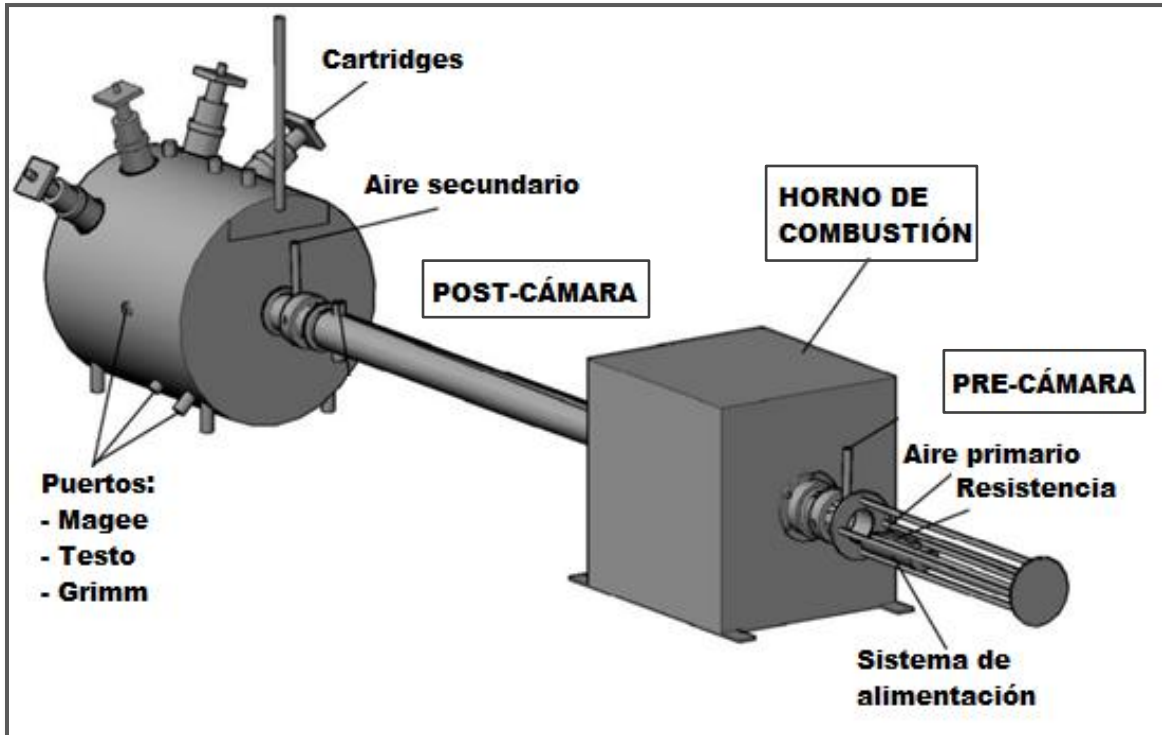


Figura 5.2 Esquema de 3CE.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

Para comprender el funcionamiento del equipo 3CE, es importante considerar primero aquellas variables del proceso que serán controlados durante la experimentación en las distintas zonas de la 3CE:

- Encendido y posicionamiento del combustible (biomasa).
- Flujo de comburente (aire).
- Flujo de salida de las emisiones de la combustión.
- Temperatura del horno de combustión.

Para ello, se llevará a cabo un control operativo del sistema mediante un dispositivo electrónico de control automático, además del monitoreo de diversos parámetros de interés en cada zona de la 3CE, orientados a realizar una quema adecuada de la biomasa y un correcto monitoreo de los gases resultantes.

A continuación, en la Figura 5.3 se aprecia el diagrama P&ID del equipo 3CE, que representa el esquema de su funcionamiento general.

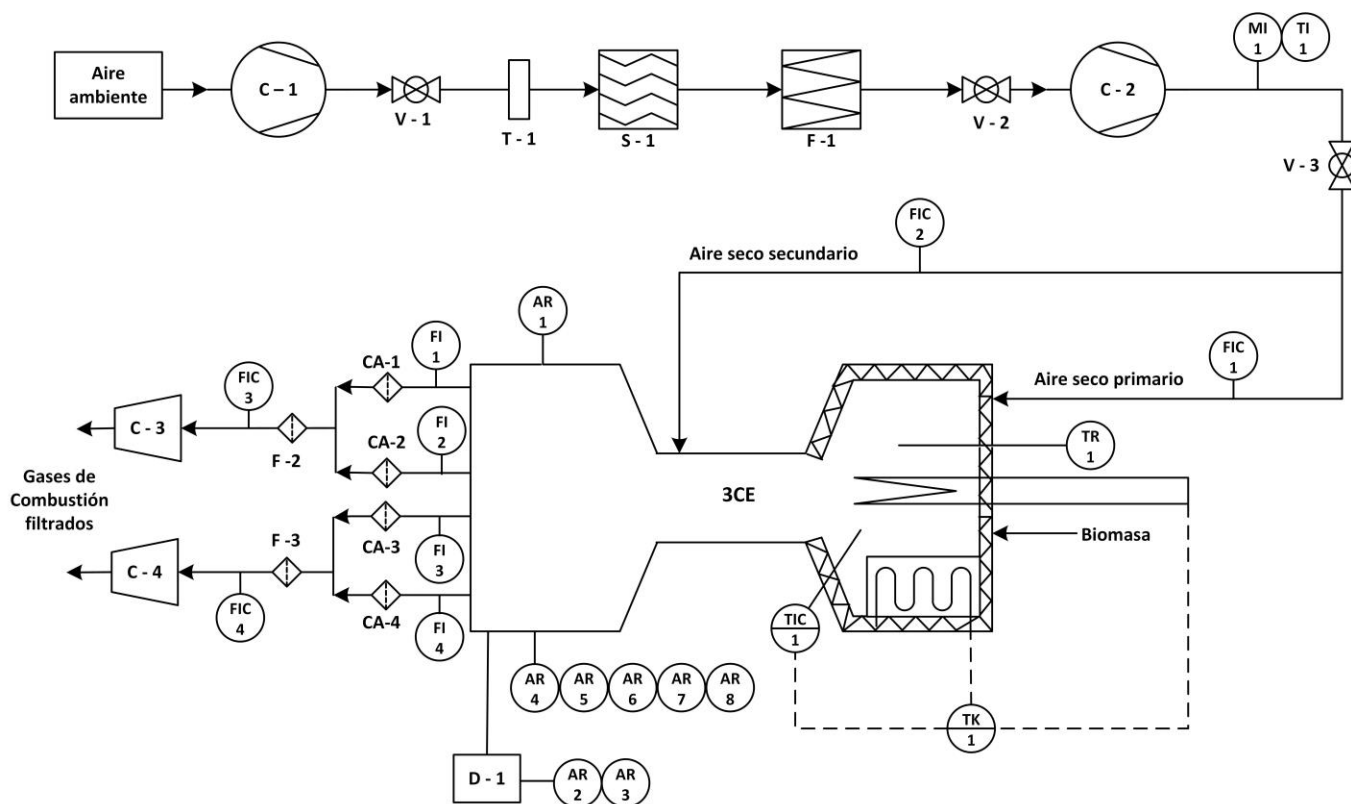


Figura 5.3 Diagrama P&ID de 3CE.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema contempla una línea de aire comprimido que pasa por un completo sistema de eliminación de humedad con el objetivo de proveer oxígeno para la combustión (aire primario seco). La biomasa ingresa directamente al horno, el cual presenta un control de temperatura (TK-1) y una resistencia eléctrica para facilitar la ignición del material. Posteriormente los gases resultantes son monitoreados por diversos instrumentos de medición (AR-1 – AR-7) y son filtrados (FI-1, FI-2 y CA-1 – CA-4) para minimizar las emisiones al ambiente y proteger los equipos de succión (C-3 y C-4). Posteriormente se explicará en detalle cada una de estas conexiones.

A continuación, en la

Tabla 5.4 se detallan todos los controladores automáticos presentes en la operación final de la 3CE que fueron representados en la Figura 5.3, con sus respectivos objetivos, recursos administrados y *setpoints*, además en la Tabla 5.5 se especifican todos los equipo de monitoreo en línea dentro del proceso, los que en conjunto permiten versatilidad de operación además de un alto grado de reproducibilidad entre cada ensayo realizado en iguales condiciones dentro del equipo, permitiendo compararlos posteriormente entre sí.

Tabla 5.4 Lazos de control en 3CE.

Controlador	Objetivo	Recurso administrado	Setpoint	Equipo
FIC – 1	Asegurar oxígeno suficiente para la correcta combustión de la biomasa.	Flujo másico de aire primario mediante válvula solenoide interna.	35,4 [L/min]	Controlador FMA 5400/5500 Omega
FIC – 2	Completar el flujo de gases entrantes para que exista un equilibrio con el flujo de gases salientes.	Flujo másico de aire secundario mediante válvula solenoide interna.	0 [L/min]*	Controlador FMA 5400/5500 Omega
FIC – 3	Asegurar que el flujo de gases salientes de la 3CE sea igual al flujo entrante.	Flujo másico de aire que llega a compresor C – 3, mediante válvula solenoide interna.	Variable 16 – 19 [L/min]	Controlador FMA 5400/5500 Omega
FIC – 4	Asegurar que el flujo de gases salientes de la 3CE sea igual al flujo entrante.	Flujo másico de aire que llega a compresor C – 4, mediante válvula solenoide interna.	Variable 16 – 19 [L/min]	Controlador FMA 5400/5500 Omega
TIC – 1	Mantener la temperatura del horno de combustión.	Temperatura del serpentín eléctrico interno del horno adiabático.	120 [°C]	Controlador PID TC4S Autonics

Nota: Los controladores de flujo FMA Omega funcionan controlando el flujo másico que pasa a través de ellos, sin embargo, su sistema de ajuste presenta unidades de flujo volumétrico, ya que realizan una conversión interna de unidades.

* En el capítulo siguiente se explicará la razón por la que el controlador FIC-2 presenta un setpoint de 0 [L/min].

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 Equipos de monitoreo en 3CE.

Indicador	Objetivo	Medición	Equipo
TI – 1	Medir temperatura del aire seco antes del entrar al horno.	Temperatura (°C) en la línea del aire primario seco y comprimido.	Datalogger HD2817T.DR DeltaOhm

MI – 1	Asegurar un bajo porcentaje de humedad relativa del aire que ingresa al horno.	Humedad relativa (%) en la línea del aire primario seco y comprimido.	Datalogger HD2817T.DR DeltaOhm
---------------	--	---	-----------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 Equipos de monitoreo en 3CE (Continuación).

Indicador	Objetivo	Medición	Equipo
TR – 1	Indicar y registrar la temperatura de ignición de la biomasa además de la temperatura de llama durante el ensayo.	Temperatura (°C) de la termocupla tipo K.	Termocupla tipo K SS316 Veto conectada a Termómetro EasyView EA10 Extech
AR – 1	Monitorear y registrar las emisiones de material particulado carbonoso generadas por la combustión para su posterior análisis.	Concentración de <i>Black Carbon</i> y <i>Brown Carbon</i> [ng/m ³] en los gases de combustión.	Aetalómetro AE33 Magee Scientific
AR – 2	Monitorear y registrar las emisiones de material particulado generadas por la combustión para su posterior análisis.	Concentración de PM10, PM2,5 y PM1 [µg/m ³] y cantidad de partículas micrométricas [N° de partículas] en los gases de combustión.	Espectrómetro láser de aerosoles 1.109 Grimm
AR – 3	Monitorear y registrar las emisiones de material particulado generadas por la combustión para su posterior análisis.	Cantidad de partículas nanométricas [N° de partículas] en los gases de combustión.	Espectrómetro Nanocheck 1.320 Grimm
AR – 4	Monitorear y registrar las emisiones de gases combustión para su posterior análisis.	Concentración de CO ₂ [%] en los gases de combustión.	Analizador de gases Testo 350XL
AR – 5	Monitorear y registrar las emisiones de gases combustión para su posterior análisis.	Concentración de CO y H ₂ [ppm] en los gases de combustión.	Analizador de gases Testo 350XL.

AR – 6	Monitorear y registrar las emisiones de gases combustión para su posterior análisis.	Concentración de NO _x [ppm] en los gases de combustión.	Analizador de gases Testo 350XL
---------------	--	--	------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 Equipos de monitoreo en 3CE (Continuación).

Indicador	Objetivo	Medición	Equipo
AR – 7	Monitorear y registrar las emisiones de gases combustión para su posterior análisis.	Concentración de O ₂ [ppm] en los gases de combustión.	Analizador de gases Testo 350XL
AR – 8	Monitorear y registrar las emisiones de gases combustión para su posterior análisis.	Concentración de SO ₂ [ppm] en los gases de combustión.	Analizador de gases Testo 350XL
FI-1, FI-2, FI-3, FI-4	Mantener un flujo, uniforme y similar de los gases que circulan a través de cada cartridge: CA-1, CA-2, CA-3, CA-4.	Flujo volumétrico en los gases de salida [L/min].	Flujómetro 4043 TSI

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Funcionamiento, adaptaciones y pruebas preliminares en la 3CE

5.2.2.1 Pre-cámara

En la pre-cámara serán controladas dos de las variables del proceso nombradas anteriormente, el flujo del comburente y el encendido del combustible. En la Figura 5.4 se ilustran detalladamente todas las conexiones presentes en la pre-cámara que participarán en el control de ambas variables: la conexión de la resistencia eléctrica, conexión de la termocupla y la inyección de aire necesario para la combustión.

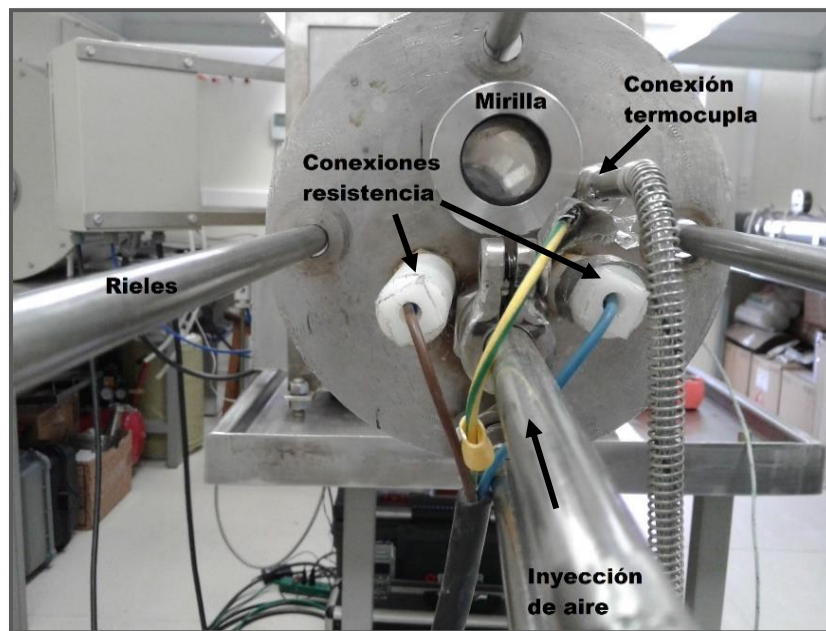


Figura 5.4 Conexiones pre-cámara.

Fuente: Elaboración propia.

La mirilla tiene como objetivo permitir la observación directa de lo que ocurre dentro del horno mientras se combustiona la biomasa, permitiendo conocer el tiempo de llama.

➤ Sistema de alimentación de biomasa:

En la pre-cámara, detrás de las conexiones mostradas en la Figura 5.4, se encuentra el sistema de alimentación de biomasa, el cual consiste en un soporte curvo que se desplaza

en forma manual a través de 4 rieles equidistantes, con el objetivo de transportar la biomasa hacia la zona de combustión al interior del horno.

Como fuente de ignición del material se utilizará energía térmica proveniente de una resistencia de acero, con forma de serpentín, que se calentará eléctricamente para llegar a la temperatura requerida y se posicionará por encima de la biomasa ubicada en el soporte, quedando en contacto directo con ella. La resistencia se encuentra conectada a un panel de control (TK – 1), sin embargo, no presenta un ajuste automático, solamente se encuentra unida al panel con el fin de poder accionar manualmente el encendido y apagado de ella, por lo tanto, el control manual es establecido mediante el periodo de tiempo en que se encuentre encendida la resistencia y su potencia fija, la cual está determinada por el tipo de material de la resistencia.

Para tener un control aproximado de la temperatura de ignición de la biomasa y un registro de la temperatura de llama, se utilizará un termómetro conectado a una termocupla tipo K con vaina de acero (TR – 1), ubicada cerca de la resistencia, pero sin tocarla directamente. El protocolo de los ensayos de combustión establece que es necesario esperar a que el termómetro marque 200 [°C] para iniciar la quema posicionando la resistencia en contacto con la biomasa.

En la Figura 5.5 se puede apreciar la resistencia y la estructura del soporte de alimentación, el cual inicialmente fue diseñado para contener y combustionar biomasa del tipo leña, sin embargo, para esta experimentación requirió ciertas modificaciones.

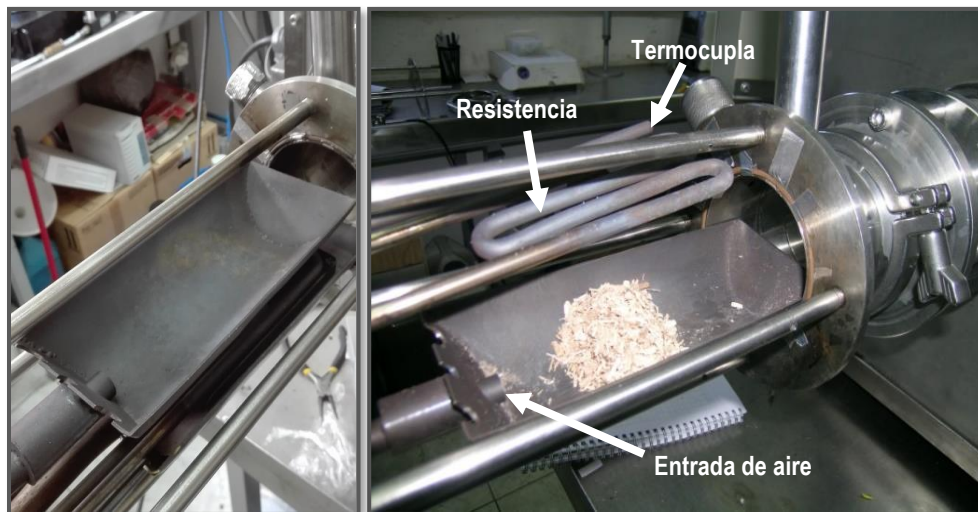


Figura 5.5 Soporte curvo para biomasa (leña).
Fuente: Elaboración propia.

El soporte curvo plantea ciertas problemáticas de diseño, debido a que la masa del *pellet* se encuentra comprimida, esta logra ocupar menor espacio dentro del soporte en

comparación con la leña, lo que genera una menor superficie de contacto entre la resistencia y los *pellets* a quemar, conllevando mala circulación de aire, combustión incompleta y en consecuencia emisiones que no reflejan un óptimo proceso.

Surgió entonces la necesidad de modificar este contenedor para que la masa de los *pellets* quede distribuida de manera más homogénea y en contacto completo con la resistencia, con



el fin de provocar una correcta ignición de la biomasa. Esto fue logrado mediante la construcción de un soporte recto de acero, el cual se ensambla por encima del soporte curvo como se puede apreciar en la Figura 5.6, quedando en un nivel más alto.

Figura 5.6 Soporte recto para biomasa tipo pellet.

Fuente: Elaboración propia.

➤ Sistema de alimentación de aire:

Con respecto al otro parámetro controlado en la pre-cámara, que corresponde al flujo de comburente, es decir, al flujo de aire necesario para la combustión, también se necesitó realizar un cambio en este aspecto, específicamente en lo que respecta a la forma de la tubería de entrada del aire, la cual anteriormente se encontraba posicionada en la parte inferior del soporte curvo (Figura 5.5) y no lograba alcanzar a la biomasa posicionada en el nuevo soporte recto, por lo tanto, fue necesario cambiar su forma logrando que ascienda de manera curva hasta alcanzar el nuevo contenedor, como se aprecia en la Figura 5.6.

Para la introducción de aire seco y limpio a la 3CE se ocupa un sistema de inyección de aire que contempla varias etapas de compresión y deshumidificación, con el propósito de acumular finalmente aire seco para alimentar con oxígeno al proceso directamente en el horno. En la Figura 5.7 y en la Tabla 5.6 se detalla cada equipo que participa en este sistema y las funciones que cumple cada uno para lograr el objetivo final.

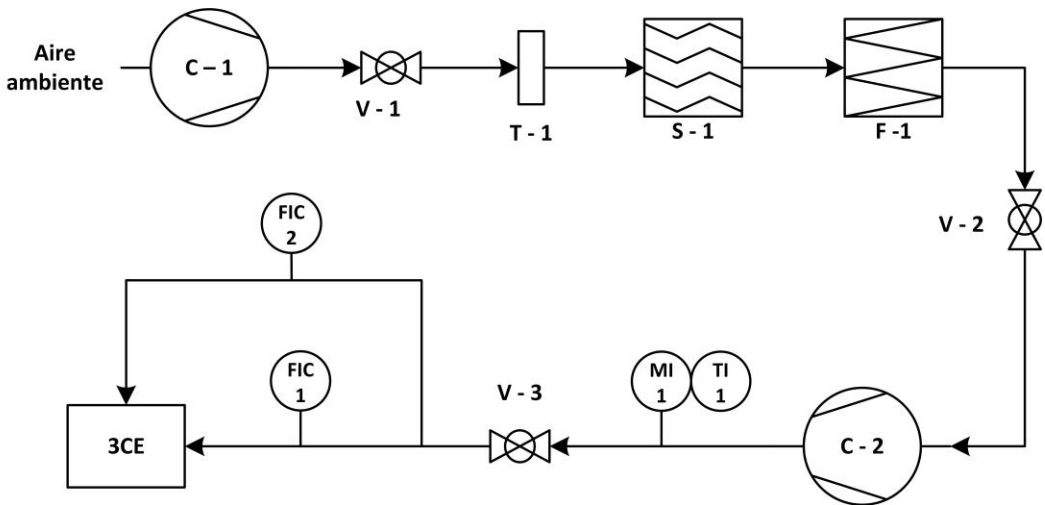


Figura 5.7 Diagrama P&ID sistema de inyección de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Equipos del sistema de inyección de aire.

Equipo	Sigla	Modelo	Función
	C – 1	Compresor Schulz MSV 12 HP	Captar y acumular aire ambiente para iniciar la primera etapa de compresión y facilitar el posterior secado.
	V – 1	Válvula de bola Swagelok SS – 43GS4	Permitir el paso del aire comprimido hacia la trampa de agua T-1 y al deshumidificador S-1.
	T – 1	Trampa de agua SMC AMG150C-02D	Eliminar agua condensada presente en el aire ambiente comprimido en C-1.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Equipos del sistema de inyección de aire (Continuación).

Equipo	Sigla	Modelo	Función
 Figura 5.10 Deshumidificador S-1.	S – 1	Secador de aire comprimido TitanPlus 040 con pre y post filtros coalescentes integrados	Filtrar y eliminar toda la humedad presente en el aire ambiente comprimido.
 Figura 5.11 Filtro F-1 y llave de paso V-2.	F – 1	Purificador de aire comprimido Dominick Hunter CO2RP140	Filtrar la humedad y las moléculas de presentes en el aire comprimido. El CO ₂ se elimina a niveles por debajo de 1 [ppm] y el vapor de agua se elimina a un punto de rocío de presión de -70 [°C] o superior (Dominick Hunter Scientific, 2016).
	V – 2	Válvula de bola Swagelok SS – 42GS4	Permitir el paso del aire filtrado hacia el acumulador C-2.
 Figura 5.12 Acumulador C-2 de aire seco.	C – 2	Compresor Schulz AP 2025	Acumular y comprimir el aire seco y filtrado para lograr un suministro constante de aire hacia el horno.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Equipos del sistema de inyección de aire (Continuación).

Equipo	Sigla	Modelo	Función
 <i>Figura 5.13 Datalogger de humedad MI-1 y temperatura TI-1.</i>	MI – 1 TI – 1	Datalogger DeltaOhm HD2817T.DR	Medir temperatura (°C) y humedad relativa (%) del aire seco que ingresará al horno. Para las condiciones finales de operación la humedad relativa del aire debe ser menor al 1%.
 <i>Figura 5.14 Válvula de paso V-3.</i>	V – 3	Válvula de bola Swagelok SS – 42GS4	Permitir el paso del aire seco y purificado al horno de combustión.
 <i>Figura 5.15 Flujómetro FIC-1.</i>	FIC – 1	Controlador de flujo Omega FMA 5400/5500	Asegurar aire primario suficiente para la correcta combustión de la biomasa accionando la válvula solenoide interna para alcanzar el <i>setpoint</i> requerido.
 <i>Figura 5.16 Flujómetro FIC-2.</i>	FIC – 2	Controlador de flujo Omega FMA 5400/5500	Controlar el flujo de aire secundario para mantener un equilibrio constante de gases de entrada, para que coincida con el flujo de gases de salida circulando a través de la 3CE.

Fuente: Elaboración propia.

➤ Flujo de aire primario y secundario:

El *setpoint* al que se ajustarán los flujos de aire primario y secundario dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto. En la Figura 5.17 se aprecia la ubicación y conexión de los flujómetros que controlarán el aire primario y secundario en esta experimentación.

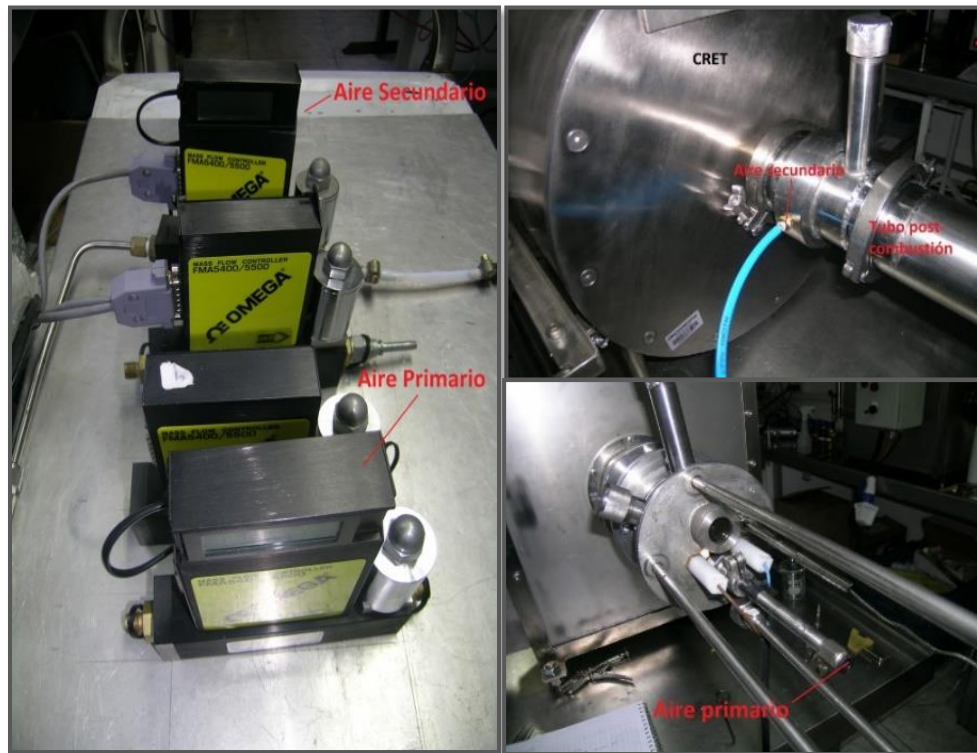


Figura 5.17 Conexión de aire primario y secundario.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

El *setpoint* del aire primario (SP1) corresponde a un valor variable que está condicionado por el tipo de biomasa que será combustionada y el contenido de carbono que presente, por otra parte, el *setpoint* del aire secundario (SP2) variará de acuerdo a los instrumentos de medición conectados en el ensayo, correspondiente a los equipos Analizador de gases Testo, Aetalómetro Magee Scientific y Espectrómetro de aerosoles Grimm, ya que cada uno presenta por defecto un flujo específico de absorción de muestra, como se aprecia en la Figura 5.18.

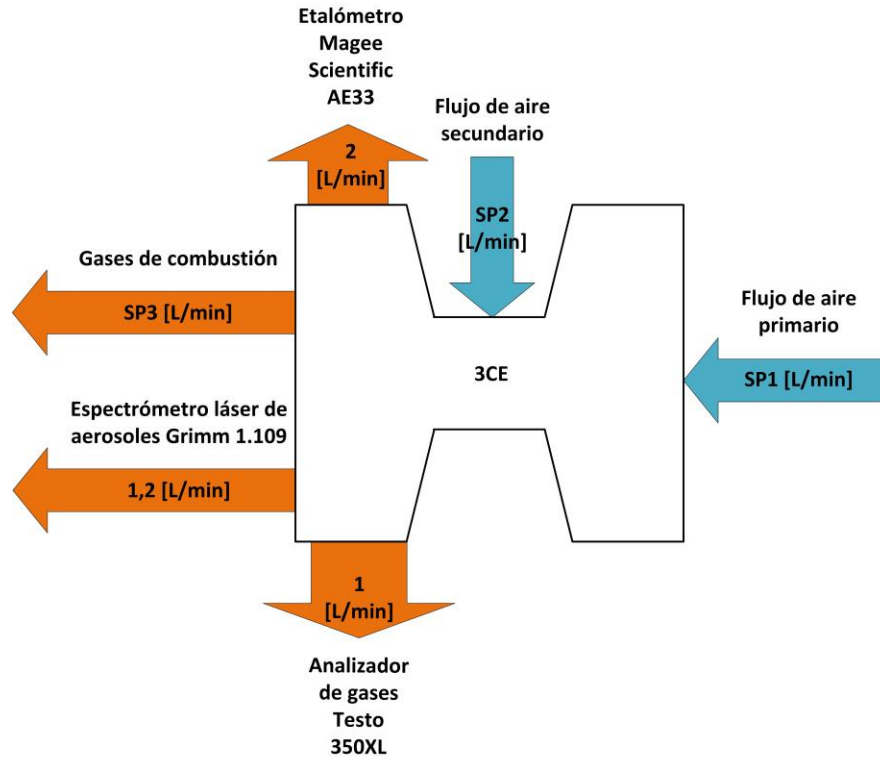


Figura 5.18 Flujo de gases entrantes y salientes en 3CE.

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo, al controlar todos los *setpoints*, es lograr que circule un flujo de aire constante a través de la 3CE, para evitar que los gases se vayan acumulando dentro de ella y así mantener aproximadamente un equilibrio entre el flujo de gases entrantes y salientes, simulando la salida de gases de una típica estufa a *pellets*, sin sobre presiones producidas por acumulaciones de gases y/o partículas al interior de la 3CE.

La siguiente ecuación ilustra el equilibrio que se pretende lograr al ajustar los flujos de entrada y salida:

$$SP1 \left[\frac{L}{min} \right] + SP2 \left[\frac{L}{min} \right] = 2 \left[\frac{L}{min} \right] + 1,2 \left[\frac{L}{min} \right] + 1 \left[\frac{L}{min} \right] + SP3 \left[\frac{L}{min} \right] \quad (5.1)$$

El proceso estaba inicialmente dispuesto para realizar la circulación de los gases de combustión mediante un equipo llamado “Speciation Sampler Partisol 2300”, conectado en el extremo final de la post-cámara, el cual estaba configurado por defecto para succionar 40 [L/min] (SP3), sin embargo, en las pruebas preliminares este equipo dejó de funcionar, por lo tanto, se requirió considerar la utilización de otros instrumentos y por consiguiente, la

modificación del flujo de aire primario y secundario (SP1 y SP2), como se explicará a continuación.

Debido a que en el Proyecto FONDEF ID15110580 además de los *pellets* estudiados en esta memoria (avena, uva y pino) también están contempladas otras variedades de *pellets*, es que se buscó realizar la optimización del flujo de aire y del exceso de oxígeno en la combustión para el tipo de *pellet* con mayor contenido de carbono considerado dentro del proyecto, con el propósito de posteriormente mantener las condiciones de combustión para la totalidad de las variedades de *pellets*.

El ajuste requiere primeramente estudiar las reacciones estequiométricas que ocurrirán en el proceso de combustión de los distintos *pellets*, por lo que previamente fue necesario realizar un análisis elemental de todos los materiales a combustionar, como se mencionó anteriormente, con el objetivo de conocer su composición química y poder determinar los requerimientos de oxígeno propios de cada uno. En la Tabla 5.7 se detallan los resultados del análisis elemental proporcionados por la Universidad de Castilla La Mancha para los 14 tipos de biomasa consideradas dentro del proyecto.

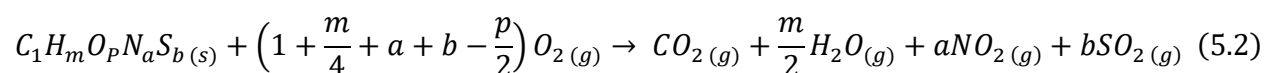
Tabla 5.7 Análisis elemental variedades pellets.

Biomasa	Análisis elemental					
	% C	% H	% N	% S	% Cl	% O
100% Raps	51,68	6,97	4,97	0,67	0,03	29,43
100% Avena	46,77	7,25	0,49	0,05	0,24	40,77
100% Orujo de olivo	57,38	7,58	1,20	0,08	0,10	24,03
100% Orujo de uva	59,44	7,78	0,08	0,04	0,04	31,72
100% Aserrín de pino	51,91	6,90	0,06	0,08	0,02	40,81
100% Maíz	49,88	6,62	1,22	0,09	0,37	37,95
HTC MB 1 -100% Aserrín	57,22	6,08	0,05	0,02	0,00	36,60
HTC MB 2- 100% Raps	64,00	6,76	3,54	0,43	0,03	21,21
HTC MB 3- 100% C. Avena	60,95	6,21	0,61	0,05	0,07	28,62
HTC MB 4 - 100% P. Trigo	51,67	5,93	0,64	0,07	0,43	37,19
HTC MB 5 - 100% Orujo Olivo	58,91	6,00	1,28	0,08	0,03	21,66
HTC MB 6 - 100% Maiz	63,12	6,80	1,70	0,00	0,02	27,99
HTC MB 7 - 100% Orujo Uva	69,51	6,12	1,56	0,00	0,01	20,93
HTC-A- 0.75 - Aserrín - 0.75 [g MgCl2 / g Biomasa]	75,25	6,17	0,03	0,04	1,13	16,21

Fuente: Datos proporcionados por Universidad de Castilla La Mancha, España (2017).

Para definir el flujo de aire primario (SP1) que será configurado, primero se seleccionó la variedad de *pellet* que presenta mayor cantidad de carbono en su composición, siendo en este caso el *pellet* denominado “HTC Aserrín – 0.75 [g MgCl₂ /g biomasa]”, que ha sido confeccionado con aserrín de pino sometido al proceso de Carbonización Hidrotérmica, el cual presenta un 75,25% de carbono, como se aprecia en la Tabla 5.7, de manera que la optimización se realizará en base a este *pellet*, debido a que este tipo de biomasa presentará mayores consumos de oxígeno y generará por consiguiente mayor cantidad de emisiones, teniendo en consideración su alto contenido de carbono.

Mediante la Ecuación 5.2 que representa el balance estequiométrico del proceso de combustión para combustibles sólidos, donde la biomasa es oxidada para generar dióxido de carbono y vapor de agua, es posible determinar la fórmula empírica de cada material y por lo tanto, es factible calcular la proporción de comburente teórico necesario para quemar completamente el combustible en base a la cantidad elemental de carbono, hidrógeno y oxígeno que contenga.



Este balance refleja el proceso llevado a cabo con un coeficiente de exceso de oxígeno igual a 1 ($\lambda=1$), es decir, la razón que existe entre la masa de oxígeno real aplicada a la combustión y la masa de oxígeno teórico resulta 1, ya que se está representando la condición estequiométrica de combustión, la Ecuación 3.2 presente en el Capítulo 3.4 de este informe ilustra dicha relación.

Como resultado se obtuvo un valor de 23,36 [g] de O₂ necesario y un flujo de 28,31 [L/min] de aire estequiométrico para el *pellet* HTC-A-0.75, el detalle de este cálculo se encuentra en el Anexo A.

Debido a que en condiciones reales de combustión se emplea una cantidad de comburente por encima del valor teórico, con un factor de exceso de oxígeno mayor a 1 ($\lambda>1$), se requiere definir experimentalmente un punto de operación óptimo al que serán sometidos todos los tipos de biomasa. Para ello, es necesario realizar ensayos a diferentes valores de λ con el propósito de lograr una combustión más eficiente, que ocasione una mayor temperatura de llama y menor cantidad de emisiones de monóxido de carbono y material particulado, para así evitar también la saturación de los equipos de monitoreo.

En primera instancia fue realizado un ensayo preliminar para evaluar el comportamiento de los equipos, donde se combustionó el *pellet* HTC-A-0.75 bajo un flujo de 28,31 [L/min], correspondiente a un exceso de oxígeno teórico igual a 1 ($\lambda=1$). La prueba realizada con este *pellet* finalmente no pudo completarse debido a que el equipo de succión “Speciaton

Sampler Partisol 2300” dejó de funcionar repentinamente durante el ensayo, al recibir los gases de combustión con una alta carga de contaminantes, por consiguiente, este ensayo también resultó poco favorable para los diversos equipos de medición, como se puede apreciar en la Figura 5.19, los cuales se observan saturados con una gran cantidad de material particulado grueso, resultando perjudicial para su vida útil. A causa de esta situación no se pudo completar finalmente el proceso de optimización.

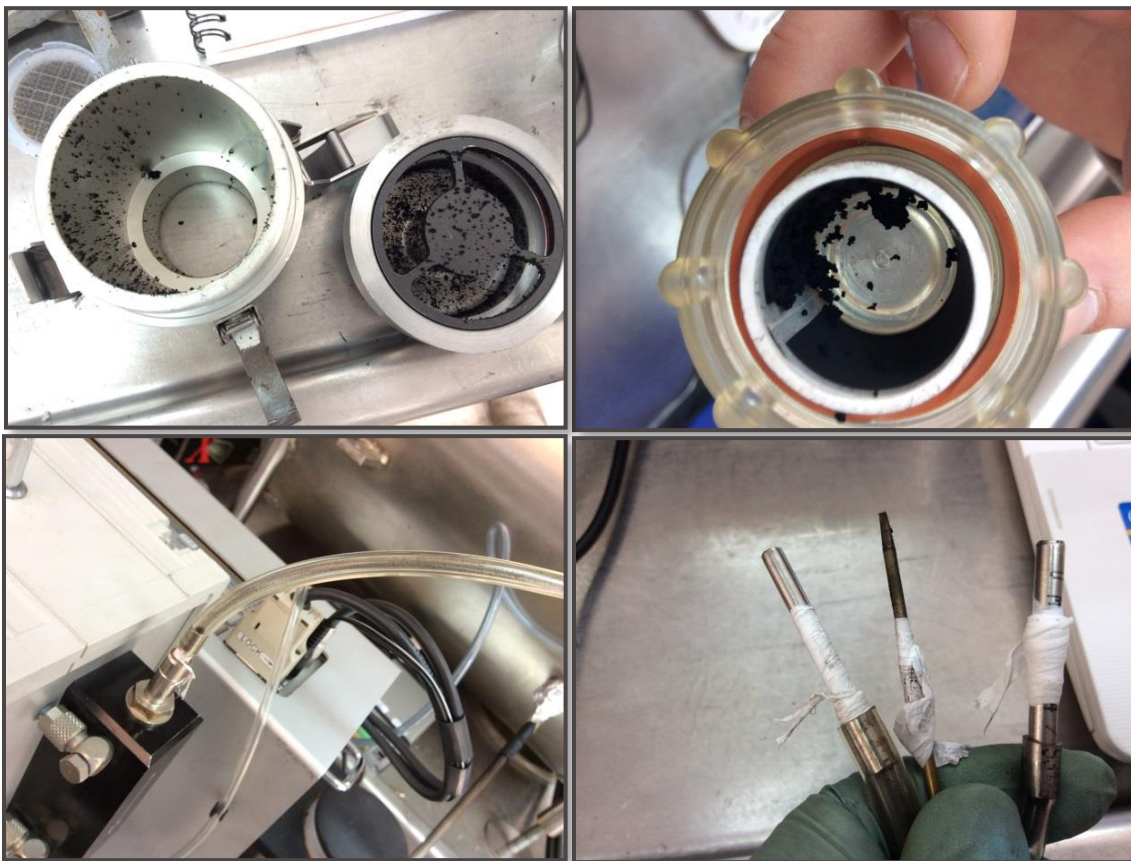


Figura 5.19 Equipos saturados con material particulado grueso.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al equipo de succión de gases, debido a su desperfecto repentino, fue necesario implementar un nuevo sistema de succión el cual será detallado en el Capítulo 5.2.2.3 de este informe, lo que permitió prescindir del equipo anterior y poder proteger con filtros el nuevo sistema, con el objetivo de que este no se sature y deje de funcionar.

Con respecto al flujo de aire, al no poder llevar a cabo la optimización y considerando además que cada *pellet* presenta un contenido de carbono característico y que se requiere poder combustionar todos los *pellets* en las mismas condiciones, asegurando que en el proceso exista oxígeno suficiente para combustionar la totalidad del carbono presente en la biomasa y así evaluar de manera comparativa las emisiones asociadas a la combustión, se decidió finalmente fijar un flujo de aire primario de acuerdo a las condiciones de

combustión típicas de una estufa a *pellet*, en cuya operación habitualmente se combustiona con un exceso de aire entre 20% - 30 %, es decir, con un coeficiente λ entre 2 y 3, según lo recomendado por la “European Biomass Industry Association (EBIA)” en el libro “English Handbook for Wood Pellet Combustion” (Tony, Rosentoft, Hayes y Bateman, 2009), y considerando también las recomendaciones de la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS), que establece un porcentaje de exceso de aire adecuado entre un 15% - 40% dependiendo del tipo de combustible y quemador a utilizar (Abarca, 2012).

Por otra parte, para la elección del flujo de aire primario también deben considerarse las restricciones que presentan los equipos que suministrarán el aire para la combustión, en este caso el controlador FIC-1 conlleva una limitación, ya que mientras más alto sea el flujo al cual se fije, más inestable se vuelve el equipo para controlar este valor. Se comprobó que con flujos cercanos a 40 [L/min] el controlador se vuelve inestable y con flujos por debajo de este valor el equipo opera adecuadamente.

De manera que, considerando las recomendaciones de ACHS y EBIA, además de las limitaciones del controlador FIC-1, se decide finalmente operar con un exceso de aire del 25% con respecto al *pellet* con mayor contenido de carbono ($\lambda = 1,25$), lo que equivale a un flujo de aire de 35,4 [L/min], cuyo valor se mantendrá fijo para la totalidad de los ensayos. Esto ocasionará que cada *pellet* presente un coeficiente de exceso de aire diferente, sin embargo, como se describió en el Capítulo 3.4 sobre la combustión de los *pellets*, el exceso de aire es un parámetro que depende de muchos factores, como las características y diseño del horno, el tipo y preparación del combustible, etc. (ATECYR, 2007; Testo A.G, 2003), por lo que para lograr combustionar de manera ideal cada variedad de biomasa en el horno específico, se requiere realizar un proceso de optimización a cada biomasa por separado, evaluando diferentes flujos de aire, lo cual en estas circunstancias no es posible llevar esto a cabo debido a la cantidad limitada de *pellets* con la que se dispone, los que solamente alcanzan para realizar aproximadamente entre 3 a 6 ensayos de combustión para cada variedad de *pellet*. Por ende, para homogenizar todos estos factores el proyecto consideró quemar todos los *pellets* bajo el mismo flujo de aire, asegurándose que cada *pellet* presente oxígeno suficiente para combustionarse completamente, es decir utilizando un factor lambda mayor al estequiométrico ($\lambda > 1$).

En el Anexo A se especifican los cálculos realizados para obtener el flujo de aire primario (SP1), donde además también son detallados los cálculos para obtener los diferentes excesos de oxígeno al que serán sometidas cada una de las variedades de *pellets* bajo el flujo de aire SP1, los cuales se resumen en la Tabla 5.8

Tabla 5.8 Lambdas de combustión.

Biomasa	λ
100% Raps	1,66
100% Avena	2,05
100% Orujo de olivo	1,52
100% Orujo de uva	1,55
100% Aserrín de pino	1,91
100% Maíz	1,94
HTC-A 0.75 Aserrín - 0.75 [g MgCl₂ / g Biomass]	1,25
HTC MB 1 -100% Aserrín	1,78
HTC MB 2- 100% Raps	1,38
HTC MB 3- 100% C. Avena	1,58
HTC MB 4 - 100% P. Trigo	1,96
HTC MB 5 - 100% Orujo Olivo	1,57
HTC MB 6 - 100% Maiz	2,02
HTC MB 7 - 100% Orujo Uva	1,35

Fuente: Elaboración propia.

En relación al valor de los demás flujos de aire, se decidió prescindir completamente del flujo aportado por el aire secundario ($SP_2 = 0$ [L/min]), sin que esto afecte el proceso de combustión ni de muestreo, ya que con el nuevo sistema de succión es posible ajustar fácilmente el flujo SP_3 para lograr la adecuada circulación de gases en la 3CE.

En la Ecuación 5.3 se aprecia el balance final de los flujos de gases entrantes y salientes en la 3CE, por otra parte, en la Ecuación 5.4 se detalla el valor final del flujo de succión SP_3 .

$$35,4 \left[\frac{L}{min} \right] (\text{flujo aire } 1^\circ) = 4,2 \left[\frac{L}{min} \right] (\text{flujo muestreo}) + SP_3 \left[\frac{L}{min} \right] (\text{succión}) \quad (5.3)$$

$$SP_3 (\text{succión}) = 35,4 - 4,2 = 31,2 \left[\frac{L}{min} \right] \quad (5.4)$$

5.2.2.2 Horno de combustión

El horno de combustión es la segunda zona relevante de la 3CE. Presenta externamente una forma correspondiente a un cubo de acero que contiene en su interior un cilindro del mismo material, donde es llevada a cabo la transferencia de calor y se efectúa la combustión de la biomasa que ha ingresado por un extremo de este, luego de ser posicionada en el soporte de la pre-cámara, como se puede observar en la Figura 5.20.

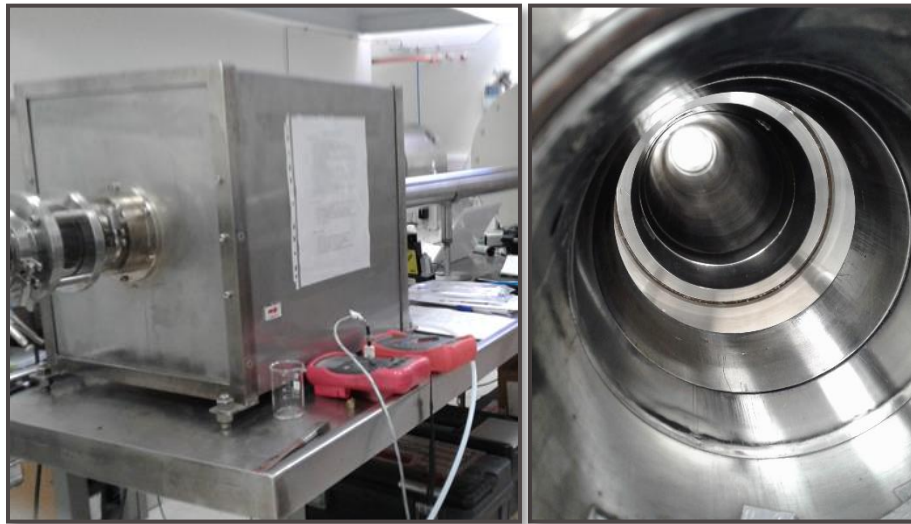


Figura 5.20 Exterior e interior horno de combustión.
Fuente: Elaboración propia.

El horno está equipado internamente con cerámica refractaria y material aislante, además de un sistema de serpentines eléctricos para poder mantener la temperatura adecuada durante los ensayos con biomasa, como se logra apreciar en la Figura 5.21, esto le confiere la característica de adiabático, permitiendo minimizar las pérdidas de calor hacia el ambiente.



Figura 5.21 Estructura interna horno.
Fuente: Elaboración propia.

➤ Sistema de control de temperatura:

El único parámetro que es controlado dentro del horno de combustión es la temperatura, la cual opera mediante un controlador PID TC4S Autonics (TIC-1), el que se encuentra en un panel de control (TK-1) adosado a uno de los costados del horno, como se aprecia en la Figura 5.22. Este equipo se encarga de regular automáticamente la temperatura del serpentín interno del horno para alcanzar el *setpoint* requerido de 120 [°C]. En este panel también puede ser encendida la resistencia eléctrica que provoca la ignición de la biomasa, pero aquel parámetro no presenta control automático, como se explicó anteriormente, sino que presenta control manual.



Figura 5.22 Panel de control temperatura horno.
Fuente: Elaboración propia.

El siguiente diagrama de la Figura 5.23 y en la Tabla 5.9, se especifica en detalle las funciones que cumple cada equipo presente en el sistema de control de temperatura del horno de combustión.

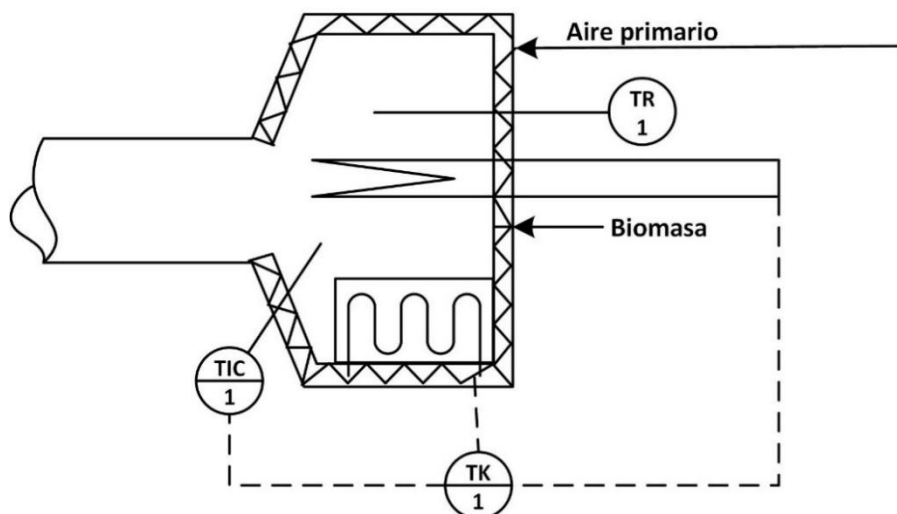


Figura 5.23 Diagrama P&ID Horno de combustión.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.9 Especificación instrumentos horno de combustión.

Equipo	Sigla	Modelo	Función
 Figura 5.24 Panel de control horno.	TK - 1	Panel eléctrico Toten	Ser soporte para las conexiones eléctricas que controlan la temperatura dentro del horno y además para el encendido de la resistencia eléctrica que provoca la ignición de la biomasa.
 Figura 5.25 Controlador PID.	TIC - 1	Controlador PID TC4S Autonics	Controlar que la temperatura en el horno de combustión sea de 120 [°C] durante los ensayos de combustión.
 Figura 5.26 Termómetro Exttech EA10.	TR - 1	Termómetro Exttech EasyView EA10	Medir y registrar la temperatura de ignición de la biomasa, además de la temperatura de llama mientras se desarrolla la combustión, mediante una termocupla tipo K. Posee adquisición de datos mediante el registro en tiempo real de la temperatura en un computador cada 2 [s]. Resolución: 0,1 [°C].

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.3 Post – cámara

La post-cámara corresponde a la tercera unidad funcional de la 3CE. Está conformada por el Tubo de Post-Combustión (TPC) y por la Cámara de Recolección de Emisiones Termostatzada (CRET), los que se aprecian en la Figura 5.27. En esta zona también se encuentran el sistema de muestreo, el sistema de inyección de aire secundario y el sistema de succión, donde es controlado el flujo de salida de las emisiones de combustión.

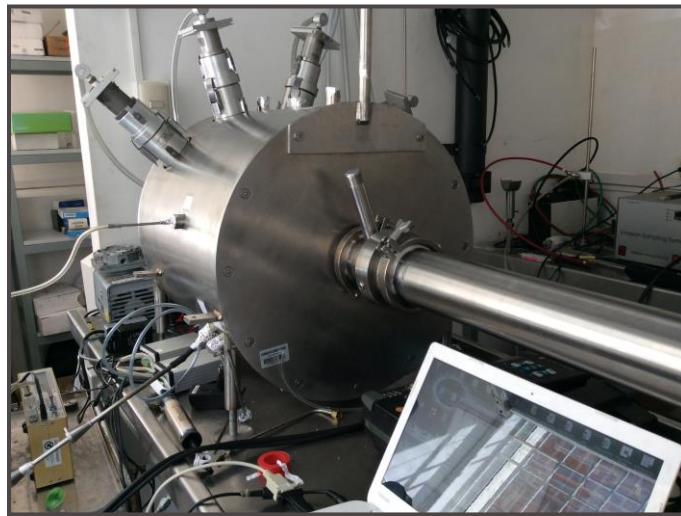


Figura 5.27 Post-cámara con cartridges ensamblados.
Fuente: Elaboración propia.

En el extremo final del TPC y antes de la CRET, se ubica la boquilla de inyección de aire secundario, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se prescindirá de utilizar aquel flujo (SP 2), por lo que fue necesario desconectar y cerrar dicha entrada para que no ocurra una fuga de emisiones durante los ensayos.

El TPC corresponde a un cilindro de acero que simula las típicas chimeneas de las estufas para quemar biomasa, donde se reciben las emisiones de la combustión y son transportadas hacia el ambiente. La CRET en cambio, corresponde a un cilindro de mayor diámetro que cumple la función de simular la salida a la atmósfera de las emisiones de la combustión, por lo tanto, requiere estar en constante flujo de gases, como ocurre habitualmente en el ambiente. En esta zona serán recolectados y cuantificados los gases y partículas generados en la combustión mediante el sistema de muestreo, con el fin de caracterizar las emisiones y analizarlas posteriormente.

La CRET posee el potencial de ser termostatzada, sin embargo, para efectos de esta experimentación no se ocupará el sistema de refrigeración y se operará a temperatura ambiente.

➤ Sistema de succión:

El sistema de succión de emisiones fue diseñado con el objetivo de mantener un equilibrio de flujo entre los gases de entrada y salida de la 3CE, evitando así que se vayan acumulando emisiones dentro de la CRET. Inicialmente, como se explicó en capítulos anteriores, esta labor era cumplida por el equipo “Speciaton Sampler Partisol 2300”, sin embargo, debido a problemas de funcionamiento se decidió prescindir de él y reemplazarlo por dos bombas de vacío: C-3 y C-4, y diversos filtros con el fin de proteger los equipos, como se puede apreciar en la Figura 5.28 y en la Figura 5.29 que ilustra el diagrama P&ID de este sistema.



Figura 5.28 Sistema de succión.

Fuente: Elaboración propia.

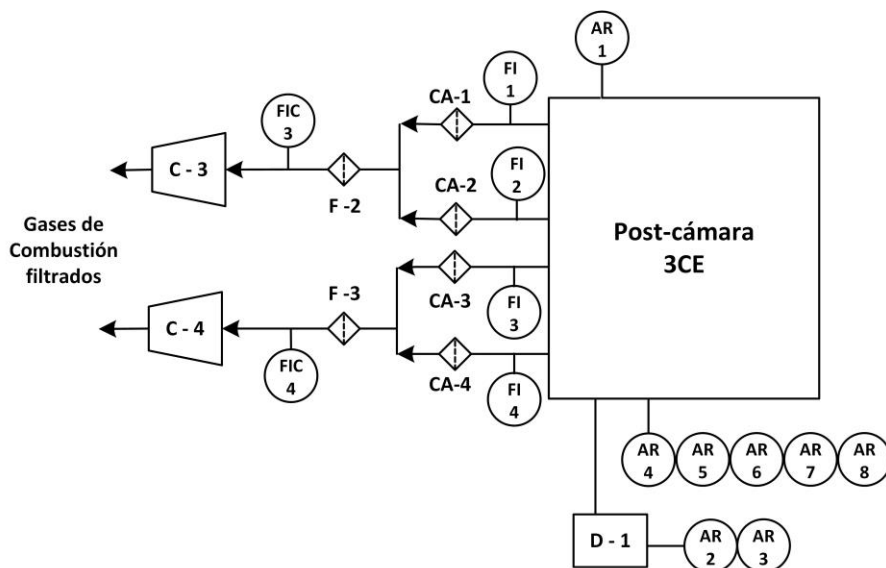


Figura 5.29 P&ID Sistema de succión.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema consiste en un arreglo en paralelo de dos bombas de vacío: C-3 y C-4, que se encargan de succionar las emisiones de la combustión que llegan a la CRET, consiguiendo la circulación de flujos requerida. Para la conexión entre los equipos se utilizaron mangueras de plástico de igual longitud y espesor. Para la combinación de los flujos de los *cartridges* CA-1 con CA-2 y la combinación de CA-3 con CA-4, fueron utilizadas conexiones con forma de “Y”.

Los *cartridges* originalmente se diseñaron para contener filtros de cuarzo con el objetivo de realizar ensayos gravimétricos de PM_{2,5} y además, contener filtros de poliuretano para realizar análisis de HAPs, sin embargo, el proyecto FONDEF ID15I10580 no contempla estos ensayos, por lo tanto, se prescindirá de utilizar filtros de cuarzo para PM fino debido a su alto valor monetario, en sustitución serán ocupados filtros de fibra de cerámica. En el caso de los filtros de poliuretano (PUF) estos sí serán ocupados, pero serán reciclados y limpiados de un ensayo a otro. En la Figura 5.30 y en la Tabla 5.10 se detallan los componentes internos de cada *cartridge*, los que contemplan un cabezal de corte, un impactador, un portafiltro y un contenedor de filtros de poliuretano. Para los ensayos de combustión cada impactador lleva impregnada silicona de alto vacío con el fin de retener el material particulado grueso.

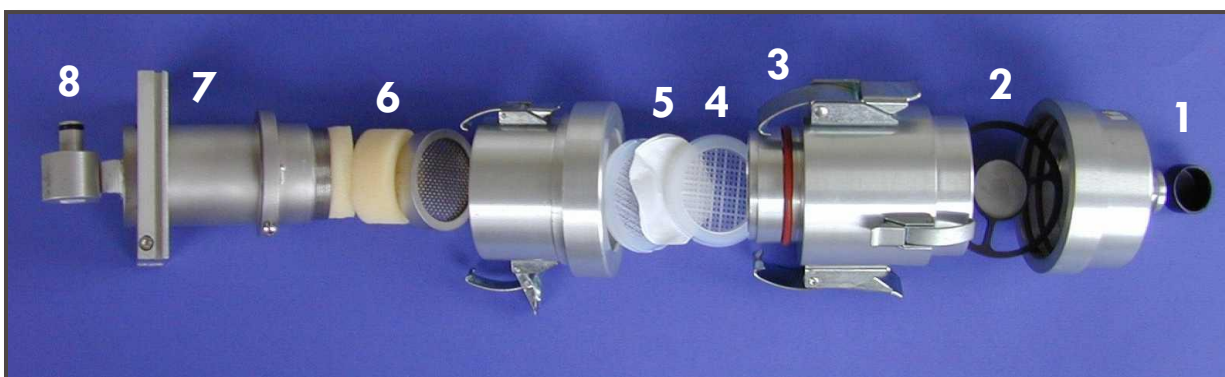


Figura 5.30 Componentes internos *cartridge*.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

Tabla 5.10 Descripción partes *cartridge*.

N°	Descripción
1	Entrada de muestra con cabezal de corte
2	Impactador con silicona de alto vacío
3	Adaptadores
4	Portafiltro
5	Filtro de fibra de cerámica
6	Filtro de poliuretano (PUF)
7	Contenedor PUF
8	Salida de gases hacia F-2 y F-3

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los equipos C-3 y C-4, debido a que el flujo de succión que presenta cada bomba de vacío corresponde a un valor fijo y no puede ser modificado mediante el mismo equipo, fue necesaria la instalación de dos controladores de flujo FIC-3 y FIC-4 conectados antes de cada bomba de vacío respectivamente. El *setpoint* de cada controlador corresponde a un valor variable y depende de la pérdida de carga que causan los instrumentos conectados en la línea previamente a estos controladores, en este caso la pérdida de carga es generada por los filtros de material particulado (F-2 y F-3) y por los *cartridges* (CA-1, CA-2, CA-3 y CA-4), los cuales al presentar una geometría sutilmente variable entre sí, ocasionan que el flujo que atraviesa cada uno de ellos presente diferentes resistencias y por lo tanto diferentes valores. La medición del flujo que traspasa cada *cartridge* es realizada a través de los caudalímetros FI-1, FI-2, FI-3 y FI-4, de esta medición es utilizada para definir en cada ensayo el valor del *setpoint* de los controladores FIC-3 y FIC-4, ajustándolos por tanteo hasta conseguir que cada caudalímetro marque aproximadamente 7,8 [L/min], lo que equivale a la cuarta parte del valor del flujo total de succión (31,2 [L/min]), como se muestra en la Ecuación 5.5 y Ecuación 5.6. Habitualmente el valor de los *setpoints* obtenidos para FIC-3 y FIC-4 (SP3 y SP4), obtenidos por prueba y error, oscilaron entre 16 – 19 [L/min].

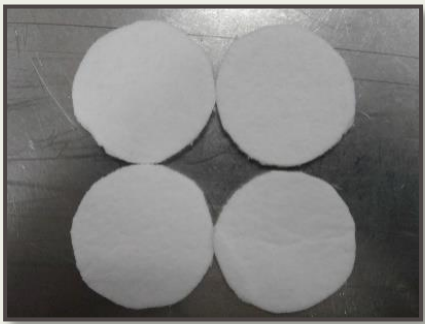
$$SP FI1 + SP FI2 + SP FI3 + SP FI4 = SP3 + SP4 = 31,2 \left[\frac{L}{min} \right] \quad (5.5)$$

$$7,8 + 7,8 + 7,8 + 7,8 = SP3 + SP4 (Flujo succión) = 31,2 [L/min] \quad (5.6)$$

Al implementar este sistema se logró una mayor precisión del control del flujo de succión en comparación con el equipo anterior “Speciaton Partisol 2300”, el cual succionaba en total 40 [L/min] sin considerar las pérdidas de carga generadas por los *cartridges* conectados en la CRET.

A continuación, en la Tabla 5.11 se especifica detalladamente cada equipo ilustrado en la Figura 5.29 que participa en el sistema de succión, además de las funciones que cumple cada uno dentro del proceso.

Tabla 5.11 Especificación de equipos y materiales en sistema de succión.

Equipo o material	Sigla	Modelo	Función
 Figura 5.31 Caudalímetro.	FI – 1 FI – 2 FI – 3 FI – 4	Caudalímetro másico TSI 4043	Medir el flujo que circula a través de los cartridges CA-1, CA-2, CA-3 y CA-4) con el fin de ajustar con precisión el <i>setpoint</i> de los flujómetros FIC-3 y FIC-4.
 Figura 5.32 silicona de alto vacío.	CA – 1 CA – 2 CA – 3 CA – 4	Silicona de alto vacío Dow Corning	La silicona va impregnada en los impactadores y cumple la función de filtrar en primera instancia las emisiones recibidas en la CRET, al tener la capacidad de retener el material particulado grueso.
 Figura 5.33 Filtros de fibra cerámica.	CA – 1 CA – 2 CA – 3 CA – 4	Filtros fibra de cerámica Isoter 3[mm] espesor	Los 4 cartridges proveen soporte para 4 filtros de fibra de cerámica, que reciben y filtran en segunda instancia las emisiones de la combustión.
 Figura 5.34 PUFs.	CA – 1 CA – 2 CA – 3 CA – 4	Filtros de espuma de poliuretano (PUF)	Cada cartridge lleva montado 3 PUFs, los que cumplen la función de filtrar en tercera instancia las emisiones, con la intención de recolectar los HAPs de la fase gaseosa.

+Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.11 Especificación de equipos y materiales en sistema de succión (Continuación).

Equipo	Sigla	Modelo	Función
 Figura 5.35 Filtros de cuarzo.	F – 2 F – 3	Filtros de cuarzo 225-0827 SKC, con soporte de plástico	Filtrar el material particulado proveniente del flujo combinado de dos <i>cartridges</i> para proteger los controladores de flujo FIC-1 y FIC-2, además de los compresores CA-1 y CA-2 posteriores en la línea.
 Figura 5.36 Controladores flujo succión.	FIC – 3 FIC – 4	Controlador de flujo Omega FMA 5400/5500	Ajustar con precisión el <i>setpoint</i> del flujo de succión de emisiones.
 Figura 5.37 Compresor C-3.	C – 3	Bomba de vacío Rocker 600	Succionar el flujo de emisiones a través de los <i>cartridges</i> CA-1 y CA-2.
 Figura 5.38 Compresor C-4.	C – 4	Bomba de vacío DOA-V112-BN Gast	Succionar flujo de emisiones a través de los <i>cartridges</i> CA-3 y CA-4.

Fuente: Elaboración propia.

➤ Sistema de muestreo:

Este sistema está compuesto por diversos equipos conectados directamente a CRET, los cuales mediante la recolección de un flujo de muestreo, son capaces de medir y registrar en tiempo real las propiedades físicas, ópticas y gaseosas de las emisiones generadas en el proceso de combustión.

-Muestreo de gases:

Para monitorear las emisiones gaseosas se utiliza un analizador de gases modelo Testo 350XL, el cual presenta dos clases de sensores, infrarrojo y electroquímico. Por otra parte, debido a que durante algunos ensayos el sensor infrarrojo de este equipo presentó problemas, se utilizó en sustitución un sensor de CO₂ externo modelo SBA-5 4028. A continuación, se describen los principios de funcionamiento para estos sensores:

- **Sensor infrarrojo:**

Con el objetivo de detectar el dióxido de carbono, el equipo Testo 350XL utiliza un sensor infrarrojo de CO₂ (AR-4) del tipo no dispersivo (NDIR), al igual que el equipo SBA-5 4028, los cuales se encargan de recolectar una muestra de gas para ser incidida con radiación infrarroja, y debido el CO₂ es capaz de absorber radiación con una longitud de onda típica, la concentración de este gas resulta directamente proporcional a la cantidad de energía absorbida, la cual se determina por la ley de Lambert-Beer, de manera que su presencia se verifica por medio de un detector de radiación IR, según se aprecia en la Figura 5.39 (Testo Argentina S.A, 2019a; Praxair, 2015).

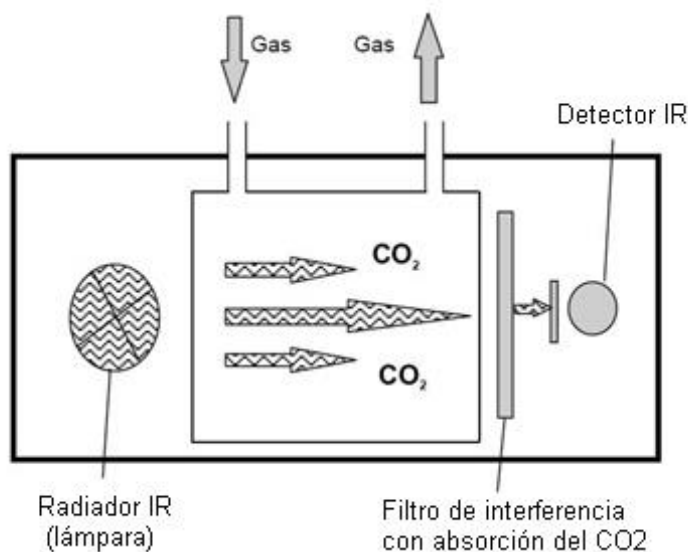


Figura 5.39 Esquema sensor IR para medir CO₂.

Fuente: Testo Argentina S.A (2019a).

- **Sensores electroquímicos:**

Por otra parte, el equipo Testo 350XL cuenta además con sensores electroquímicos que detectan la concentración de monóxido de carbono e hidrógeno (AR-5), óxidos de nitrógeno (AR-6), oxígeno molecular (AR-7) y dióxido de azufre (AR-8). Estos sensores operan basándose en el principio de la valoración potenciométrica sensible a los iones, para ello se encuentran rellenos con un electrolito acuoso específico para para cada gas a medir. Por ejemplo, en el caso del sensor de CO, los gases de combustión ingresan a través de una membrana permeable hasta el electrodo de trabajo donde se generan iones H^+ , como consecuencia de una reacción química, según se indica en la Figura 5.40. Posteriormente, estos iones migran en el campo eléctrico hacia el contraelectrodo, generándose un flujo de corriente en el circuito externo, el cual resulta proporcional a la cantidad de moléculas de CO que reaccionaron. El tercer electrodo, correspondiente al electrodo de referencia, sirve para estabilizar la señal del sensor (Testo Argentina S.A, 2019b). Debido al efecto de sensibilidad cruzada que se genera en las mediciones de CO con respecto al H_2 , el sensor AR-5 presenta un electrodo adicional de H_2 con el objetivo de medir las concentraciones de este gas y compensar las mediciones de CO (Testo Inc., 2014).

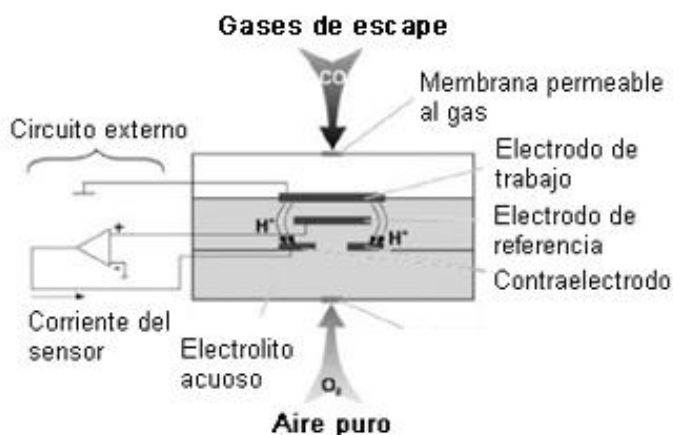


Figura 5.40 Esquema sensor electroquímico.

Fuente: Testo Argentina S.A (2019b).

- **-Muestreo de partículas:**

Para el análisis del material particulado generado en los ensayos de combustión se utilizan los siguientes equipos:

- **Espectrómetro láser de aerosoles:**

Este equipo corresponde al espectrómetro modelo 1.109 de la marca Grimm (AR-2), el cual realiza mediciones de la distribución del tamaño de partículas para 31 canales diferentes, dentro del rango $0,265 - 34 [\mu m]$, lo cual proporciona la base para

determinar la concentración de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀. Como se aprecia en la Figura 5.41, el equipo opera recolectando una muestra para conducirla directamente a una celda de medición, donde es sometida a un rayo láser semiconductor como fuente de luz, generando que cada partícula presente en la muestra ocasione un pulso de dispersión, los cuales son dirigidos hacia un diodo receptor a través de un espejo de gran angular. La intensidad de cada pulso de luz se clasifica de acuerdo con un determinado tamaño de partícula. El diodo detector es colocado en un ángulo de 90° con el rayo láser incidente, aumentando la luz de dispersión recogida y optimizando la relación señal/ruido (Grimm Aerosol, 2016).

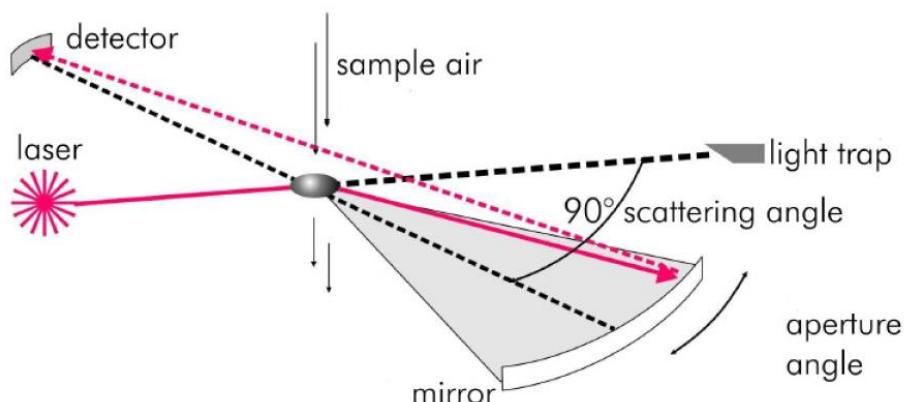


Figura 5.41 Principio de detección Espectrómetro 1.109 Grimm.

Fuente: Grimm Aerosol (2016).

Con el objetivo de proteger este equipo de las altas cargas contaminantes, se instala previamente un dilutor de aerosoles modelo Grimm 1159-100, el cual diluye 100 veces la muestra obtenida por el espectrómetro.

- **Espectrómetro láser de aerosoles nanométricos:**

Este equipo corresponde al modelo Nanosizer 1.320 marca Grimm, y se encuentra acoplado al Espectrómetro 1.109. Su objetivo consiste en medir la cantidad de partículas nanométricas en 10 canales diferentes, dentro del rango 13 – 180 [nm]. Como se aprecia en la

Figura 5.42, la muestra de aerosol ingresa al equipo hacia un difusor de carga unipolar, el cual mediante la aplicación de alto voltaje genera iones negativos de gas, los que son capaces de cargar las partículas de la muestra, las cuales dependiendo de su diámetro y carga, se depositan posteriormente en un electrodo que opera a diferentes

voltajes. Aquellas partículas con una movilidad eléctrica menor que cierto límite rebasarán el electrodo y se depositarán en un filtro para ser detectadas por un electrómetro de Faraday (Grimm Aerosol Technik, 2013).

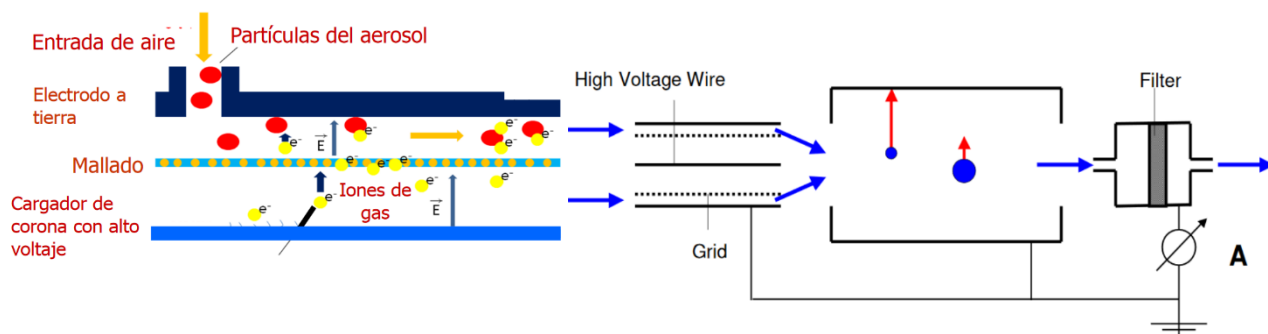


Figura 5.42 Principio de detección Nanosizer 1.320.

Fuente: Grimm Aerosol Technik (2013).

- **Aetalómetro:**

Para la medición de material particulado carbonoso, como es el caso del BC que absorbe radiación en el espectro IR, y del BrC que absorbe radiación en el espectro UV (Bond et al., 2013; Andreae y Gelencsér, 2006), se utiliza un Aetalómetro modelo AE33 marca Magee Scientific (AR-1). Este equipo recolecta una muestra de aerosol continuamente, la cual se deposita en una cinta de filtro conformando 2 marcas circulares. Como se aprecia en la Figura 5.43, la muestra en el filtro se incide con una fuente de luz, de manera que el equipo logra comprar la transmisión de luz a través de la muestra, en comparación con la transmisión a través de una porción limpia de la cinta de filtro, la que actúa como un área de referencia. El equipo calcula la concentración instantánea de partículas carbonosas a partir de la tasa de cambio en la atenuación de la luz transmitida a través del filtro cargado de partículas. Debido a que se obtienen dos mediciones simultáneas de dos marcas de la muestra, sus resultados se combinan matemáticamente para eliminar las no linealidades. Este análisis se realiza a siete longitudes de onda ópticas diferentes: 370 [nm], 470 [nm], 520 [nm], 590 [nm], 660[nm], 880 [nm] y 950 [nm], abarcando el rango desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta cercano (Magee Scientific, 2016).

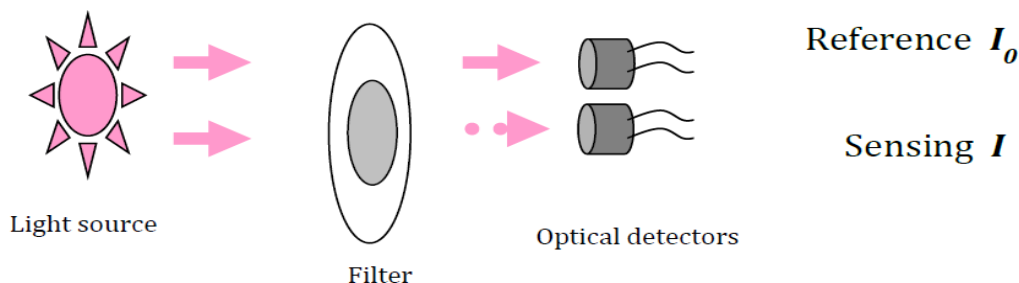
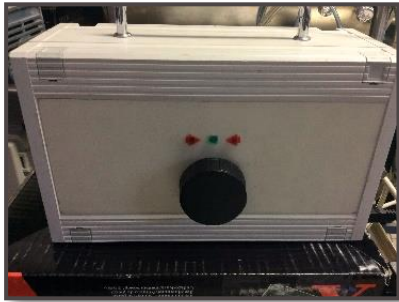


Figura 5.43. Principio de detección Magee Scientific AE33.

Fuente: Magee Scientific (2016).

En la siguiente Tabla 5.12 se presenta un resumen de las características principales de los equipos que participan en el sistema de muestreo.

Tabla 5.12 Equipos sistema de muestreo.

Equipo	Sigla	Descripción
 Figura 5.44 Aetalómetro Magee Scientific AE33.	AR – 1	Aethalometer Magee Scientific AE33 Puede medir en 7 longitudes de onda diferentes (370, 470, 520, 590, 660, 880 y 950 [nm]). La medición de la concentración de <i>Black Carbon</i> se realiza a 880 [nm] y la concentración de <i>Brown Carbon</i> a 370 [nm]. Resolución temporal: 1 [min].
 Figura 5.45 Dilutor.	D – 1	Aerosol Diluter Grimm 1159-100 Diluye 100 veces el flujo de muestreo succionado por el espectrómetro Grimm Nanosizer 1.365 conectado posteriormente en la línea, con el objetivo de no saturarlo y aumentar su vida útil.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.12 Equipos sistema de muestreo (Continuación).

 Figura 5.46 Espectrómetro láser de aerosoles Grimm.	AR – 2	Espectrómetro láser de aerosoles 1.109 Grimm Realiza conteo de partículas micrométricas en 31 canales diferentes (rango 0,265 – 34[μm]) [N° de partículas/cm^3]. Determina concentraciones de PM10, PM2,5 y PM1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Resolución temporal: 6[s].
 Figura 5.47 Analizador de gases Testo 350XL.	AR – 4 AR – 5 AR – 6 AR – 7 AR – 8	Analizador de gases TESTO 350XL Presenta sensores electroquímicos de gas certificado (ECS) para: - O_2 (rango 0 – 25% vol) - CO-H_2 compensado (rango 0-10000 ppm) - NO_x (rango 0 – 500 ppm) - SO_2 (rango 0 – 5000 ppm) Presenta un sensor infrarrojo para - CO_2 (rango 0 - 50% vol) Presenta una sonda de muestreo especializada modelo 0600 7451 Testo. Resolución temporal: 6 [s].
 Figura 5.48 Sensor de CO_2.	AR – 5	Sensor de CO_2 PP System SBA-5 4028 Mide individualmente la concentración de CO_2 mediante un sensor infrarrojo. Rango: 0 – 30000 [ppm] Se ocupa en sustitución del sensor infrarrojo del equipo Analizador Testo 350XL. Resolución temporal: 1 – 2 [s]

Fuente: Elaboración propia.

Para el correcto muestreo de las emisiones de combustión, se requiere que cada equipo detallado en la tabla anterior se conecte directamente a la CRET, lo cual se lleva a cabo mediante sondas de muestro que son introducidas en los diversos orificios que presenta esta zona para tal efecto. En la Figura 5.49 se puede apreciar la estructura de las sondas, donde aquellas correspondientes al Espectrómetro láser de aerosoles Grimm 1.109 y al Aetalómetro Magee Scientific AE33, son conductos de metal externos a los equipos con diámetro entre 2 – 3 [mm], en cambio, la sonda del equipo Analizador Testo 350XL es del tipo especializada y propia de este instrumento de medición, cuyo modelo es 0600 7451, la cual presenta un diámetro mayor que las demás sondas, con un tamaño aproximado de 5 [mm].

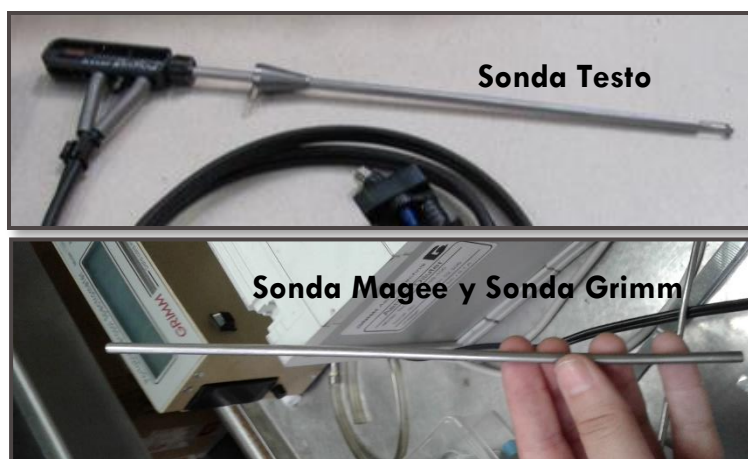


Figura 5.49 *Sondas de muestreo.*
Fuente: Elaboración propia.

Un factor importante para considerar es que, si bien los orificios de muestreo que posee la CRET se encuentran en distintas ubicaciones alrededor de su perímetro, no en todos ellos es posible introducir las sondas, debido a que algunos de estos agujeros presentan un diámetro inferior al diámetro requerido para colocarlas adecuadamente, como es el caso de la sonda del Analizador de gases Testo 350XL.

Cada una de las sondas se introduce con el objetivo de lograr que los flujos de succión que por defecto presentan los instrumentos de medición no compitan entre sí, por lo que para determinar cuán dentro de la CRET debe instalarse el extremo final de cada sonda, se recurre a dividir virtualmente en cuatro partes iguales de manera longitudinal la circunferencia formada por el equipo, cubriendo el diámetro de la CRET, donde finalmente el extremo de cada sonda es ubicado en la mitad del radio que cubre la división longitudinal, como se muestra en la Figura 5.50, que representa un corte transversal de la CRET, donde se esquematiza la posición final que ocupa cada sonda perteneciente al

sistema de muestreo. Estas ubicaciones serán conservadas para la totalidad de los ensayos de combustión.

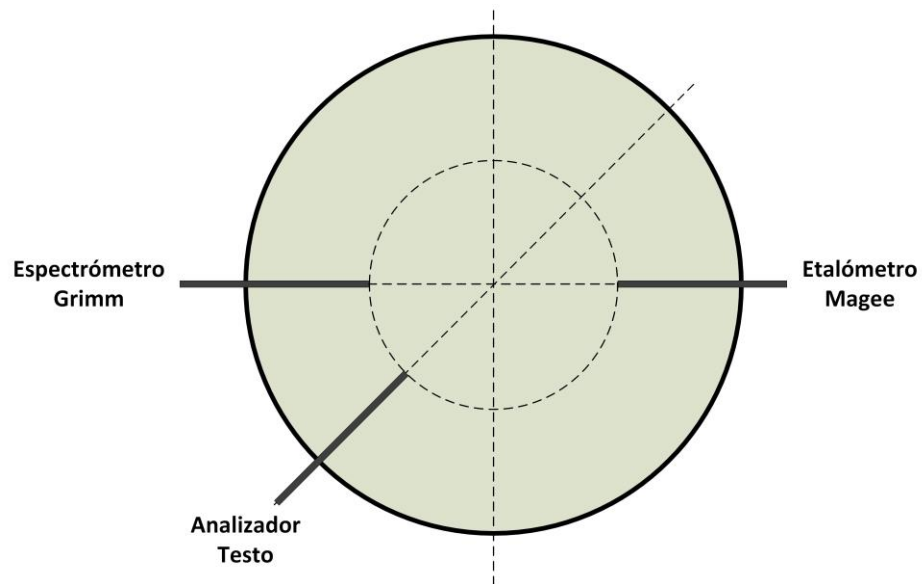


Figura 5.50 Distribución sondas conectadas a la CRET.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Condiciones finales de operación

Recopilando todas las adaptaciones y variables fijadas en el capítulo anterior y agregando otros factores relevantes, se presentan a continuación todas las condiciones finales con las que se trabajará en los ensayos de combustión:

Condiciones variables

- **Tipo de combustible: pellets de avena, uva, pino y pellet comercial**

Si bien el proyecto FONDEF contempla alrededor de 14 tipos de biomasa distintos, para efecto de esta memoria fueron seleccionados solo tres de estas variedades: avena, uva y pino, debido principalmente a la disponibilidad que se tenía de los residuos con los que se fabricaron los pellets. Con respecto a la biomasa comercial utilizada, esta corresponde a pellet comercial certificado (ENplus y FSC) marca Ecomas, fabricado en un 100% con pino radiata.

En la Tabla 5.13 se resumen las características de cada una de las variedades de pellet en estudio, su poder calorífico y su análisis inmediato.

Tabla 5.13 Análisis inmediato pellets.

Biomasa	Tipo residuo	Poder calorífico		Análisis inmediato		
		Superior [MJ/kg]	Inferior [MJ/kg]	% Volátiles	% Cenizas	% Carbono fijo
Pellet avena	Paja y cáscaras de avena	18,66	17,06	77,79	4,44	17,77
Pellet uva	Orujos prensados de uva	20,06	18,47	80,71	0,90	18,39
Pellet pino	Aserrín de pino radiata	20,11	18,58	86,35	0,21	13,44
Pellet comercial	Cultivo energético pino radiata (no residual)	-	18,04	-	0,16	-

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Universidad de Castilla La Mancha, España (2017) y Certificaciones Ecomas (Ecomas,2018).

- **Coefficiente de exceso de aire:** $\lambda_{avena} = 2,05$; $\lambda_{uva} = 1,55$; $\lambda_{pino} = 1,91$

Debido a que todos los pellets se quemarán con el mismo flujo de aire, la condición de utilizar diferentes tipos de combustible ocasiona que todos los excesos de aire utilizados también sean distintos, si bien la variación del factor lambda es un parámetro que se irá modificando entre cada quema dependiendo del tipo de biomasa, los valores utilizados aseguran la correcta combustión al presentar valores mayores a 1, asegurando oxígeno estequiométrico suficiente para el proceso, además al compararlos entre sí no presentan mayores variaciones, con un promedio de 1,84 y una desviación estándar de 0,26 como se aprecia en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Lambda pellets.

Tipo de biomasa	λ
100% Avena	2,05
100% Uva	1,55
100% Pino	1,91
Promedio	1,84
Desv. Estándar	0,26

Fuente: Elaboración propia.

Condiciones constantes

Los siguientes parámetros permanecerán invariables para la totalidad de los ensayos:

- **Humedad del aire primario: menor a 1 %**

Siempre se buscará llegar a una humedad constante inferior al 1% durante cada ensayo, ya que las condiciones climatológicas de la ubicación geográfica del laboratorio corresponden a una zona costera, la cual presenta alta humedad relativa que varía durante el día, de manera que si este parámetro no se ajusta afectaría la calidad y reproducibilidad de los ensayos de combustión.

- **Contenido de humedad biomasa: 0 %**

Luego del proceso de peletización y almacenamiento, cada variedad de pellet presenta distinto contenido de humedad, por lo tanto, para homogenizar esta condición se establece un porcentaje de humedad del 0% para quemar todas las variedades de pellets, lo cual será obtenido con ayuda de una termobalanza. Esto implica que todas las biomásas se quemarán con 0% de humedad para expresar los resultados en base seca.

- **Temperatura del horno de combustión: 120 [°C]**

Se mantendrá fija mediante control automático realizado por controlador TIC-1.

- **Flujo de comburente (aire primario): 35,4 [L/min]**
Proporcionado por el sistema de inyección de aire y controlado por FIC-4.
- **Cantidad de biomasa: 10 [g]**
Se evaluó en un inicio la posibilidad de quemar 5 [g] de biomasa, considerando que la disponibilidad de los residuos con los que se fabrican los *pellets* es limitada, sin embargo, al ser biomasa comprimida, esta cantidad no resultó apropiada para generar una suficiente área de contacto con la resistencia eléctrica que genera la ignición, mientras que 10 [g] de *pellet* permitieron una superficie de contacto más adecuada, ocasionando una mejor combustión con una llama constante. Utilizar una mayor cantidad de *pellet* fue descartado debido a la dificultad de fabricación de algunos de ellos y la baja disponibilidad de los residuos fuera de la temporada de cosechas.
- **Encendido y posicionamiento de la biomasa: contacto con resistencia a 200 [°C]**
La ignición del combustible, es decir, el posicionamiento de la resistencia eléctrica en contacto con la biomasa, se llevará a cabo cuando el termómetro (TR-1), con su respectiva termocupla presente en la pre-cámara, detecte una temperatura de 200 [°C].
- **Flujo total de salida de las emisiones de combustión: 31,2 [L/min]**
Llevado a cabo mediante el sistema de succión, con un flujo total controlado por FIC-3 y FIC-4, cuyos *setpoints* varían entre 16 – 19 [L/min]. Además, el flujo que atraviesa cada *cartridge* corresponde a la cuarta parte del flujo total de succión, lo que equivale a 7,8 [L/min].
- **Posición de las sondas de muestreo:**
La posición final de las sondas, detalladas en la Figura 5.50, se conserva para todos los ensayos.
- **Duración de cada ensayo de combustión: 40 [min]**
Con esta duración se asegura que la biomasa se haya combustionado completamente, ya que el transcurso de la llama oscila entre 2 – 4 [min], además se logran apreciar con claridad todas las etapas de la combustión y el aporte de los contaminantes a estas distintas etapas. Por otra parte, transcurridos los 40 [min] las emisiones han descendido considerablemente, alcanzando valores similares a las concentraciones ambientales del laboratorio, lo cual se comprueba con la medición del blanco de combustión, en donde no se realiza un proceso de combustión con biomasa pero se reproducen todas las condiciones habituales y se miden todas las variables de emisión para determinar la línea base del ensayo bajo las condiciones de operación del laboratorio.

- **Cantidad de ensayos por cada tipo de biomasa: $n \geq 3$ ensayos**

Se realizarán ensayos en triplicado como mínimo para cada uno de los tipos de biomasa en estudio, dependiendo de la disponibilidad que presenten, para avena se cuenta con material para 6 ensayos, al igual que con uva, para pino se cuenta con biomasa para 3 ensayos, y para pellet comercial con 8 ensayos.

5.2.4 Procedimientos preliminares

5.2.4.1 Preparación del suministro de aire

Antes de llevar a cabo los ensayos de combustión es necesario preparar previamente todos los equipos involucrados en el sistema de alimentación de aire, ya que el proceso de comprimir y deshumidificar aire ambiente, para que se logre una humedad menor al 1%, tarda bastante tiempo en concluir, alrededor de 2 [h], lo cual es determinante para conseguir aprovechar de manera adecuada el tiempo que se dispone. A continuación, se detallan los pasos necesarios para preparar la línea de inyección de aire:

- **Encendido de compresor principal**

Primero, es necesario enchufar y encender el compresor principal (C-1), modelo Schulz SV12, el cual se encuentra ubicado fuera del laboratorio. Es importante corroborar que la palanca de encendido esté correctamente dispuesta y el compresor se encuentre enchufado al interior del laboratorio, como se indica en la Figura 5.51.



Figura 5.51 Enchufe y encendido compresor C-1.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).



Figura 5.52 Despiche compresor C-1.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

- **Apertura llaves de paso V-1 y V-2**

Se debe verificar que la válvula V-1 se encuentre abierta para permitir el flujo de aire comprimido hacia la trampa de agua (T-1) y hacia el deshumidificador (S-1). También se debe verificar la correcta apertura de la válvula V-2, para permitir el ingreso del aire seco hacia el acumulador (C-2), como se aprecia en la Figura 5.53.



Figura 5.53 Válvula V-1 y V-2 abiertas.

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

- **Encendido de equipos**

Para la acumulación y posterior introducción de aire seco y limpio hacia la 3CE, se debe encender el deshumidificador (S-1), el purificador de aire (F-1), el compresor secundario (C-2) y el medidor de humedad y temperatura (MI-1, TI-1), verificando primeramente que se encuentren conectados a la corriente eléctrica, como en la Figura 5.54.



Figura 5.54 Conexión a corriente equipos

Fuente: Protocolo combustión para pellets (CETAM, 2017).

Por otra parte, también es necesario enchufar con anterioridad el controlador de flujo para el aire primario (FIC-1), ya sus componentes internos tardan en llegar a la temperatura adecuada de funcionamiento.

- **Apertura llave de paso V-3**

Cuando la humedad relativa del aire acumulado alcanza un valor menor al 1%, lo cual se verifica mediante el medidor de humedad (MI-1), se debe orientar la llave de paso V-3, como se índice en la Figura 5.55, para que el aire ya seco y purificado pueda ingresar al controlador de flujo másico FIC-1.



Figura 5.55 Válvula V-3 abierta.

Fuente: Elaboración propia.

- **Fijar setpoint controlador FIC-1**

Una vez que se encuentre abierta la válvula V-3 y la humedad del aire sea inferior al 1%, se debe controlar el aire primario mediante el controlador de flujo másico FIC-1, utilizando un destornillador y ajustando el setpoint que aparece en la pantalla del equipo hasta alcanzar el valor final del aire primario correspondiente a 35,4 [L/min].



Figura 5.56 Ajustando setpoint FIC-1.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1 Preparación de cartridges

Antes de armar los cartridges, cada uno de sus componentes debe ser lavado con etanol de grado técnico (96%) en un baño de ultrasonido durante 30 [min], procurando que todas las piezas queden cubiertas con el disolvente para obtener una limpieza óptima, con el objetivo de eliminar cualquier contaminante residual de su uso anterior, además el equipo debe operar tapado para evitar la contaminación con solventes orgánicos en el ambiente del laboratorio. La Figura 5.57 ilustra el equipo de ultrasonido que será utilizado.



Figura 5.57 Baño de ultrasonido VWR 97043-978.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez completada la fase de limpieza y retirados los componentes del baño de ultrasonido, el material debe secarse sobre papel absorbente, proceso que puede ser ayudado mediante una corriente de aire comprimido seco disponible en el laboratorio.

Cuando todas las piezas estén completamente secas, se requiere impregnar el centro de cada impactador con silicona de alto vacío, además de montar los filtros de fibra de cerámica en sus respectivos portafiltros, como se aprecia en la Figura 5.58.

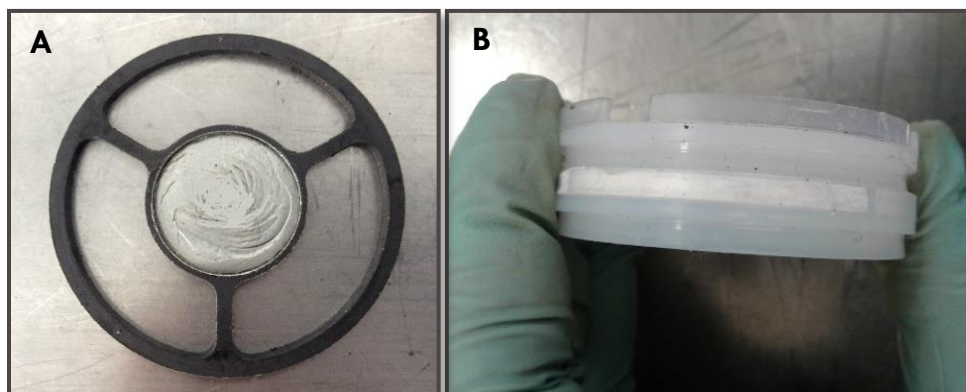


Figura 5.58 Preparación componentes cartridges, impactador (A) y portafiltro (B).

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, deben prepararse los PUFs limpiándolos con una corriente de aire comprimido, ya se reutilizan entre cada quema de manera que su limpieza no influye en las mediciones requeridas en los ensayos. Finalizado este paso, se procede con el armado de los cuatro *cartridges* para el ensayo introduciendo un portafiltro, un impactador y tres PUFs al interior de cada uno. Los *cartridges* ya armados deben ser montados en las ranuras que posee la CRET para tal efecto.

5.2.2.2 Preparación de equipos de muestreo y succión

- **Encendido instrumentos de muestreo**

Para que el sistema de muestreo opere adecuadamente, es necesario primero enchufar a la corriente eléctrica y encender todos los equipos involucrados en este sistema, el Analizador Testo 350XL, el Espectrómetro láser de aerosoles Grimm 1.109 y Nanosizer 1.320 con su respectivo dilutor, el Aetalómetro Magee Scientific AE33 y el sensor de CO₂ SBA-5 4028.

Con el propósito de que estos instrumentos sean capaces de registrar los valores de concentración de contaminantes medidos en tiempo real, es necesario conectarlos mediante un cable USB hacia computadores que tengan instalados programas específicos que permiten controlar el funcionamiento de los equipos y el almacenamiento de los datos en el disco duro de cada computador, así como también ajustar ciertos parámetros propios de cada instrumento. A continuación, se presenta un listado de todos los equipos que requieren adquisición de datos en tiempo real para cada quema:

- Analizador Testo 350XL: *software* “Testo easyEmission 2.7 SP3”.
- Espectrómetro láser de aerosoles Grimm1.109: *software* “NANO-Sizer1.378 vers.3.3”.
- Termómetro Extech EA10: *software* “EA15 v.10.01”.
- Sensor SBA-5 4028: *software* “Gas Analyzer Software”.
- Aetalómetro Scientific Magee AE33: este equipo posee memoria interna donde va almacenando todas las mediciones que detecta, por lo que no es necesario conectarlo a un computador. Posteriormente es posible extraer estos datos mediante un dispositivo USB.

Con respecto al dilutor (D-1), que se encarga de diluir la muestra obtenida por el Espectrómetro Grimm, para su adecuado funcionamiento es necesario ajustar la perilla giratoria que posee, procurando que solamente la luz de color verde quede encendida y las luces de color rojo no se prendan, de esta forma se logra un equilibrio entre los flujos de entrada y salida al equipo, y se genera la correcta dilución de la muestra.



Figura 5.59 Fechas dilutor.

Fuente: Elaboración propia.

- **Equipos de succión**

El primer paso para poner en marcha el sistema de succión es enchufar a la corriente eléctrica los controladores de flujo FIC-3 y FIC-4, debido a que tardan en calentar sus componentes internos antes de funcionar adecuadamente, por lo que es importante encenderlos con antelación.

Los compresores del sistema de succión, C-3 y C-4, se encienden solo unos minutos antes de comenzar cada ensayo, para posteriormente ajustar los *setpoints* de los controladores de flujo FIC-3 y FIC-4 listos para operar. Con ayuda de los caudalímetros FI-1, FI-2, FI-3 y FI-4 y de un destornillador, se ajusta finalmente el flujo que pasa a través de cada *cartridge* de muestreo, con un valor aproximado de 7,8 [L/min].

5.2.2.3 Preparación de la muestra

Para determinar el contenido de humedad de la muestra se utiliza una termobalanza Sartorius modelo MA30, la que se observa en la Figura 5.60. El procedimiento estándar de secado consiste en abrir el equipo e introducir los *pellets* a secar, la pantalla del dispositivo mostrará entonces el contenido inicial de humedad que presentan. Luego se requiere fijar en el instrumento una temperatura de 105 [°C] con el fin de llevar la muestra a un estado anhidro, donde solamente se conserva el agua de constitución, es decir, se programa el equipo para que evapore la totalidad de la humedad libre e higroscópica, quedando con un contenido de 0% de humedad.



Figura 5.60 Termobalanza o balanza infrarroja Sartorius MA30.

Fuente: Elaboración propia.

Un procedimiento equivalente al anterior consiste en someter los *pellets* a una temperatura de 105 [°C] durante 1 [h] al interior de una estufa modelo Memmert INB500, como se indica en la Figura 5.61. La utilización de este método depende de la disponibilidad de los equipos, obteniéndose resultados exactamente iguales que con la termobalanza, donde la biomasa adquiere un contenido de humedad de 0%.



Figura 5.61 Estufa Memmert INB500.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, alrededor de 5 [min] antes de la quema, se procede a pesar 10 [g] de *pellet* seco mediante una balanza digital “Electronic Balance” modelo WT100001XE, que posee una precisión de 0,1 [g], la cual se observa en la Figura 5.62, procurando que la muestra sea lo más homogénea posible, con tamaños de *pellets* similares.



Figura 5.62 Balanza Electronic Balance.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, la biomasa se almacena momentáneamente en un vaso precipitado y queda lista para transportarse y quemarse en el horno de combustión.

5.2.2.4 Limpieza química y térmica de la 3CE

Para la obtención de resultados confiables y reproducibles en la combustión de la biomasa, es necesario realizar previamente a cada ensayo una limpieza química y térmica de todas las zonas de la 3CE, con el objetivo de eliminar cualquier residuo que haya quedado de la quema anterior, principalmente cenizas y hollín.

Limpieza química

- Se desarma completamente la 3CE, se quitan las abrazaderas, se desmonta el TPC y el vidrio de la CRET.
- Con la ayuda de una esponja y papel absorbente, se limpian todas las piezas de la 3CE utilizando alcohol etílico de grado técnico (concentración 96%).
- Para la limpieza interior, se arma una escobilla con un palo de escoba, una esponja y un paño, los cuales se sujetan con bridas. Luego se introducen dentro del horno y del TPC para limpiarlos adecuadamente.
- Las sondas de muestreo y los *cartridges* también son sometidas a limpieza química con etanol mediante el ingreso a un baño ultrasónico, como se especificó anteriormente.

Limpieza térmica

- Se arma nuevamente el equipo 3CE.
- Se enciende la resistencia eléctrica y el horno mientras se ingresa aire primario abriendo la válvula V-3, lo que facilita la evaporación del etanol y el transporte de aire seco a través de la 3CE para que arrastre cualquier partícula residual.
- Este proceso se extiende aproximadamente por 10 [min], para finalmente apagar la resistencia, apagar el horno y cerrar la válvula V-3, y así esperar el enfriamiento del equipo para continuar con el siguiente ensayo.
- Se considera que el proceso de limpieza es satisfactorio cuando se aprecia que no existe un aporte externo de partículas dentro de la 3CE, mediante la visualización de los resultados en línea de las emisiones utilizando los instrumentos de monitoreo antes mencionados.

5.2.5 Prueba de blanco

Para la obtención de resultados confiables respecto al aporte de cada tipo de contaminante en el proceso, es necesario validar la limpieza química y térmica realizada con anterioridad y verificar que no exista un aporte de sustancias externas a la combustión, de manera que se procede a realizar la prueba de blanco, la cual consiste en simular un ensayo de combustión durante 30 [min] midiendo todas las variables de emisión, donde la única diferencia con un ensayo real es que no se utilizará la muestra de *pellet* a quemar, es decir, el soporte para la biomasa estará vacío, esto con el objetivo de determinar la línea base del ensayo bajo las condiciones de operación del laboratorio.

5.2.6 Protocolo de ensayos en 3CE

El diseño experimental de cada ensayo está basado en un proceso *batch*, donde existe una fase de carga de biomasa hacia la 3CE y una fase de descarga de la biomasa combustionada (cenizas), para luego cargar una vez más la biomasa y así sucesivamente. En la siguiente Figura 5.63 se esquematizan todos los pasos necesarios en cada fase para llevar a cabo adecuadamente los ensayos de combustión.

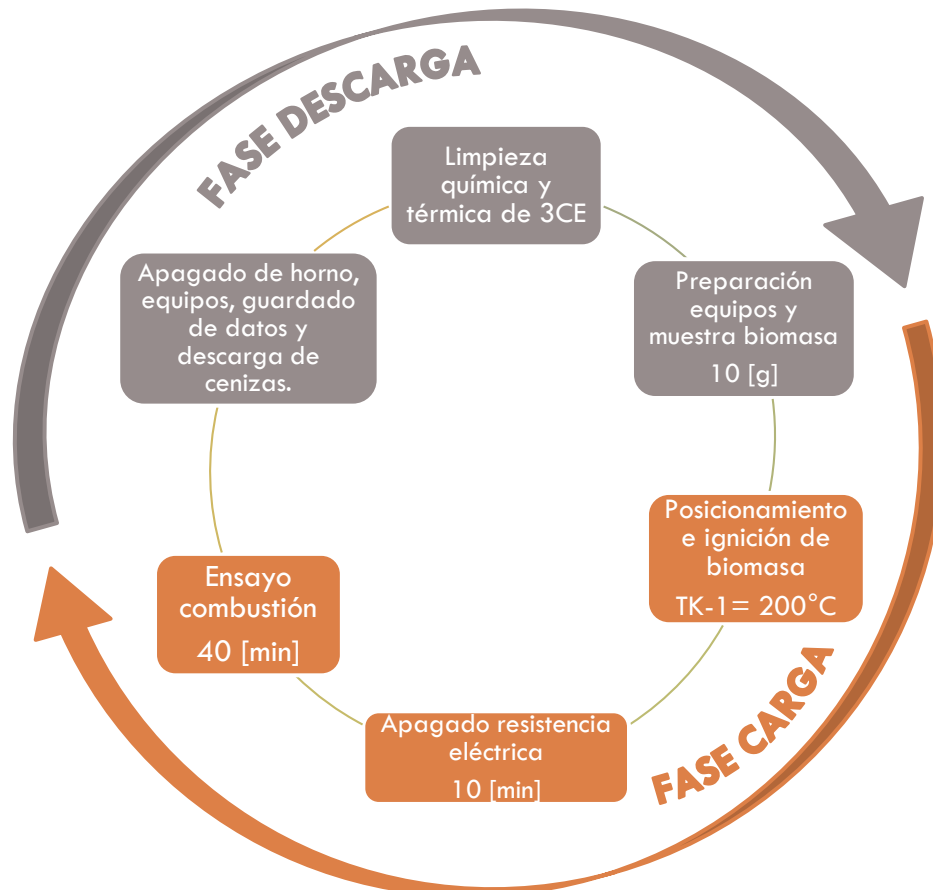


Figura 5.63 Fase carga y descarga protocolo de combustión.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe detalladamente el procedimiento necesario para quemar cada variedad de biomasa según el protocolo de combustión:

- Cuando se encuentra limpia la 3CE con todos los equipos instalados, y además el sistema de inyección de aire y el sistema de succión están funcionando correctamente con sus respectivos equipos seteados, y por su parte la biomasa se encuentra seca y pesada, se procede a encender el horno de combustión.
- Una vez alcanzada la temperatura de 120 [°C] en el horno (TIC-1), se dispone la muestra de 10 [g] de *pellet* en el soporte recto de la pre-cámara, por debajo de la resistencia eléctrica como se muestra en la Figura 5.64. Es importante colocar la muestra justo en este momento ya que puede variar su contenido de humedad si permanece mucho tiempo en contacto con la atmósfera del laboratorio.



Figura 5.64 Posición pellets.

Fuente: Elaboración propia.

- Depositada la muestra en el soporte, se procede a encender la resistencia y posicionarla alrededor de 5 [cm] por encima de la biomasa, el contacto se realizará cuando la termocupla TK-1 marque 200 [°C], mientras tanto se irá desplazando lentamente el soporte hacia el interior del horno, con el objetivo de que en la fase de pre-ignición la biomasa se encuentre lo más cercana posible al horno y no existan pérdidas de emisiones, es decir, no existan emisiones no contabilizadas por los equipos de muestreo ya que la pre-cámara es una zona abierta y se encuentra en contacto con el ambiente.
- Cuando la termocupla TK-1 llega a la temperatura de 200 [°C], rápidamente se realiza el contacto de la resistencia con los *pellets* y en paralelo, con mucha precaución, se introduce completamente el soporte dentro del horno y se conecta la línea de aire primario en su respectiva posición.

- Una vez introducido el soporte con la biomasa al interior del horno, se debe asegurar con la ayuda caimanes para evitar posibles fugas de emisiones, como se aprecia en la Figura 5.65.

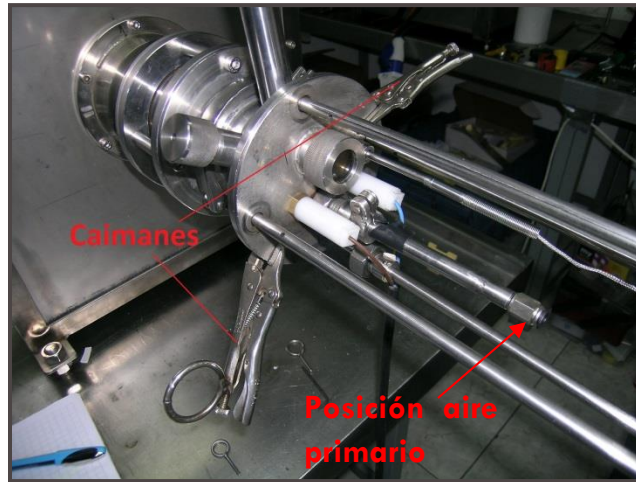


Figura 5.65 Horno cerrado.
Fuente: Elaboración propia.

- Cuando comienza la ignición de la biomasa y se forma la llama, comienza oficialmente el ensayo de combustión que tiene una duración total de 40 [min]. Transcurridos los primeros 10 [min] se apaga la resistencia eléctrica, ya que su objetivo es propiciar la ignición y la correcta combustión de los *pellets* mientras exista llama y no permanecer encendida durante todo el ensayo, considerando que la llama tiene una duración entre 3 – 4 [min] como se mencionó anteriormente.
- Al finalizar la quema se procede a apagar el horno, guardar los datos adquiridos por los equipos de muestreo en cada computador y desmontar la pre-cámara quitando los caimanes, para poder recolectar las cenizas generadas en el proceso. Es importante dejar los instrumentos de muestreo encendidos para que realicen su fase de autolimpieza.
- Completadas estas tareas, se procede nuevamente con la limpieza química y térmica de la 3CE y con la preparación de la biomasa, que puede ser de la misma variedad (ensayos en como mínimo en triplicado) o de una variedad diferente (avena, uva, pino, *pellet* comercial).

5.3 PARTE 3. Análisis de cenizas

Al completar la totalidad de los ensayos para todos los tipos de biomasa contemplados, se realizó el análisis elemental de las cenizas que permanecieron luego de la combustión mediante tecnología de fluorescencia de rayos X (XRF).

5.3.2 Materiales y equipos:

En la siguiente Tabla 5.15, se describen los materiales y equipos utilizados para el análisis de las cenizas correspondientes:

Tabla 5.15 Materiales y equipos análisis de cenizas.

Material	Modelo	Características
 <i>Figura 5.66 Equipo XRF.</i>	Analizador XRF S1 Titan Bruker	El equipo S1 TITAN es un analizador portátil de campo completo que mide concentraciones elementales de una muestra basándose en la tecnología de fluorescencia de rayos X (XRF), la cual consiste en irradiar la muestra por medio de un tubo de rayos X, para excitar sus componentes y poder identificarlos a través de la dispersión de energía que generan (EDXRF) mediante un detector de desviación de silicio (SDD).
 <i>Figura 5.67 Rollo de Prolene.</i>	Film de Prolene SpectroCertified® 416	El <i>film</i> de Prolene (polipropileno) está certificado para ofrecer soporte de manera segura, para las muestras que requieran análisis XRF. Este material presenta transparencia frente a los rayos X y una alta pureza, además posee propiedades necesarias para la resistencia química a distintos tipos de muestras, permitiendo la obtención de resultados comparables y reproducibles.

Fuente: Elaboración propia con información de S1 TITAN Manual del usuario (Bruker, s.f.).

5.3.3 Procedimiento análisis de cenizas

Recolección muestras de ceniza:

- Transcurridos los 40 [min] que dura cada ensayo de combustión, se procede a la fase de descarga, donde parte de las cenizas generadas en el proceso quedan almacenadas en el soporte de la pre-cámara, como se aprecia en la Figura 5.68. Con ayuda de una brocha, se recolectan todas las cenizas para cada tipo de biomasa en placas Petri diferentes.



Figura 5.68 Cenizas luego de combustión.

Fuente: Elaboración propia.

- A continuación, en la Figura 5.69 se observan todas las muestras de cenizas recolectadas, correspondientes a *pellets* de avena, *pellets* de uva y *pellet* comercial. Con respecto a las cenizas de aserrín de pino, estas no pudieron reunirse debido a que al finalizar los ensayos el soporte no presentaba restos de estas cenizas. Si bien, pudo comprobarse su existencia en otras zonas de la 3CE, su recolección resultaba dificultosa y la cantidad no era suficiente para poder realizar un posterior análisis.

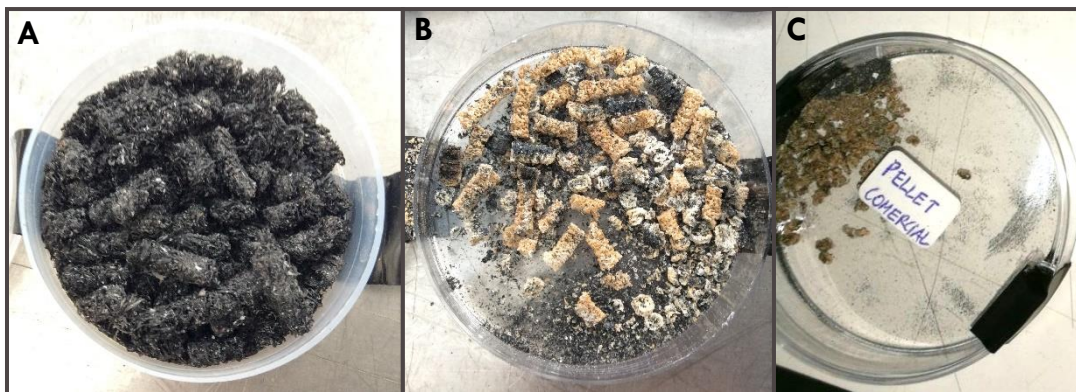


Figura 5.69 Cenizas de *pellets* de avena (A), uva (B) y *pellet* comercial (C).

Fuente: Elaboración propia.

- En un principio se intentó cuantificar la cantidad exacta de ceniza generada en cada quema para poder realizar un balance de masa de cada tipo de *pellet*, sin embargo, esto no fue posible ya que cualquiera sea la variedad quemada, parte de las cenizas eran transportadas mediante el aire primario hacia las distintas zonas de 3CE, siendo dificultosa su completa recolección y cuantificación exacta, por lo que medir las cenizas habría ocasionado inherentemente considerables errores experimentales.

Análisis XRF

- Obtenidas las muestras de cenizas se procedió a someterlas a fluorescencia de rayos X mediante el equipo analizador S1 Titan Bruker, el cual se configuró para trabajar en modo estático por medio del uso del soporte de escritorio, como se aprecia en la Figura 5.70, además también se conectó mediante puerto USB a un computador para poder ir almacenando en tiempo real todos los datos obtenidos a través del *software* “S1 Data Tool”.

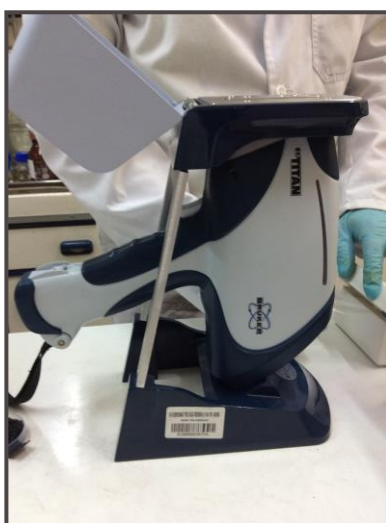


Figura 5.70 Analizador XRF modo escritorio.

Fuente: Elaboración propia.

- Para evitar que la muestra de ceniza entre en contacto directo con el equipo XRF y lo deteriore o ensucie, se utiliza un *film* de Prolene certificado para tal efecto, el cual se corta del tamaño adecuado y se posiciona por encima de la ventanilla de análisis.
- Posteriormente se remueve la muestra de ceniza de la placa Petri y se coloca directamente sobre el *film* de Prolene, procurando que quede centrada y alineada con la ventanilla del analizador XRF. Por seguridad, es necesario cerrar la tapa del equipo para evitar que escape radiación hacia el ambiente, como se observa en la Figura 5.71.

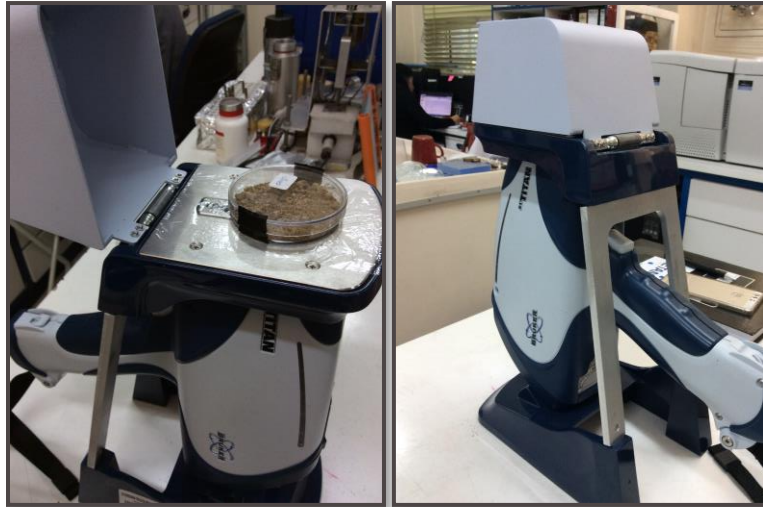


Figura 5.71 Análisis XRF.

Fuente: Elaboración propia.

- Cerrada la tapa se procede a iniciar el análisis mediante el *software* computacional. El equipo comienza a emitir rayos X, los que interactúan con la muestra la cual absorbe la radiación excitando sus electrones, generándose entonces una reemisión de radiación (fotones) por parte de la muestra. Esta radiación es captada por el detector de desviación SDD del equipo, que mide la intensidad de fotones emitida la cual es característica para cada átomo en específico, permitiéndose de esta forma identificar cada elemento presente en la muestra.
- El análisis para una muestra tarda 5 [min] en concluir. Para obtener resultados más precisos se realizaron análisis en quintuplicado para cada variedad de ceniza.

6. Metodología de obtención de Factores de Emisión, Rendimiento y análisis de cenizas

Los factores de emisión (FE) corresponden a valores representativos que relacionan la cantidad emitida de un contaminante hacia la atmósfera con la actividad asociada a su emisión, a través de un conjunto de fuentes o de una actividad determinada. Generalmente los FE se expresan mediante la relación entre el peso del contaminante generado, versus el peso, volumen o energía del combustible consumido. Estos factores facilitan la estimación de las emisiones al aire procedentes de diversas fuentes de contaminación (EPA, 1995).

6.1 Material Particulado

La medición en línea del material particulado se obtiene directamente desde el *software* “NANO-Sizer1.378 vers.3.3”, el cual arroja resultados cada 6 [s] de PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀. Como cada ensayo tiene una duración total de 40 [min], para calcular el FE se consideran las mediciones en línea durante 2.400 [s] como se detalla en la Ecuación 6.1, teniendo en cuenta que el equipo Aerosol Diluter Grimm 1159-100 se encarga de diluir 100 veces la muestra. Se debe considerar además la conversión de unidades respectivas.

$$FE_{PM} = \int_{t=0}^{t=2400} PM_{en\ línea} * AP * D * \frac{1}{m_{pellet}} \left[\frac{g_{PM}}{kg_{pellet}} \right] \quad (6.1)$$

Dónde,

FE_{PM} : Factor de Emisión del PM, expresado en [g] de PM por cada [kg] de *pellet*.

$PM_{en\ línea}$: concentración puntual de PM, expresado en [$\mu g/m^3$]

AP : flujo de aire primario, correspondiente a 35,4 [L/min].

D : factor de dilución, el cual corresponde a 100 [-].

m_{pellet} : masa del *pellet*, correspondiente a 10 [g].

Para el caso de las partículas nanométricas y micrométricas, la medición en línea se obtiene igualmente desde el *software* “NANO-Sizer1.378 vers.3.3”, que arroja resultados cada 6[s]. Para determinar el FE se emplea la Ecuación 6.2, teniendo en cuenta los 2.400 [s] que dura el ensayo y la conversión de unidades respectivas.

$$FE_{partículas} = \int_{t=0}^{t=2400} NP_{en\ línea} * AP * D * \frac{1}{m_{pellet}} \left[\frac{N^{\circ}partículas}{kg_{pellet}} \right] \quad (6.2)$$

Dónde,

$FE_{partículas}$: Factor de Emisión del número de partículas, expresado en $[N^{\circ} de partículas]$ por cada $[Kg]$ de *pellet*.

$NP_{en\ línea}$: medición puntual de la cantidad de partículas, expresado en $\left[\frac{N^{\circ}partículas}{cm^3} \right]$.

AP : flujo de aire primario, correspondiente a 35,4 $[L/min]$.

D : factor de dilución, para este caso es 100 $[-]$.

m_{pellet} : masa del *pellet*, correspondiente a 10 $[g]$.

En el caso de BC y BrC, los datos se descargan de la memoria interna del instrumento de medición, el cual arroja resultados cada 1 $[min]$. Para calcular el FE se aplica la Ecuación 6.3 respecto a las mediciones en línea de BC y BrC, durante el período que dura el ensayo (40 $[min]$), considerando además las respectivas conversiones de unidades.

$$FE_B = \int_{t=0}^{t=40} B_{en\ línea} * AP * \frac{1}{m_{pellet}} \left[\frac{g_B}{kg_{pellet}} \right] \quad (6.3)$$

Dónde,

FE_B : Factor de Emisión del BC o BrC, expresado en $[g]$ de BC o BrC, por cada $[Kg]$ de *pellet*.

$B_{en\ línea}$: concentración puntual de BC o BrC, expresado en $[ng/m^3]$

AP : flujo de aire primario, correspondiente a 35,4 $[L/min]$.

m_{pellet} : masa del *pellet*, correspondiente a 10 $[g]$.

6.2 Gases

La medición en línea de los gases se obtiene desde el software “Testo easyEmission 2.7 SP3” el cual arroja resultados cada 6 [s] para O₂, CO₂, CO, NO, SO₂, H₂ y NO_x. Los FE se calculan de acuerdo con la Ecuación 6.4, considerando la conversión de unidades respectivas.

$$FE_{gas} = \int_{t=0}^{t=2400} C_{gas} * DN * AP * \frac{1}{m_{pellet}} \left[\frac{g_{gas}}{kg_{pellet}} \right] \quad (6.4)$$

Dónde,

FE_{gas} : Factor de Emisión del PM, expresado en [g] de PM por cada [kg] de *pellet*.

C_{gas} : concentración puntual del gas, expresado en [ppm].

AP : flujo de aire primario, correspondiente a 35,4 [L/min].

m_{pellet} : masa del *pellet*, correspondiente a 10 [g].

DN : Densidad del gas en condiciones normales de presión y temperatura (1 [atm] y 25 [°C]), según el DS N°34 del Ministerio de Salud (Decreto Supremo N°4, 1992).

$$DN = \frac{PM_{gas}}{\hat{V}_{gas}} \left[\frac{g}{L} \right] \quad (6.5)$$

Dónde,

PM_{gas} : peso molecular del gas [g/mol].

$\hat{V}_{gas}$: volumen molar del gas en condiciones normales de presión y T° [L/mol].

En la Tabla 6.1, se detallan la densidad normal calculada para cada gas.

Tabla 6.1 Densidad normal de los gases de combustión.

Gas	Densidad normal [g/L]
O ₂	1,31
CO ₂	1,80
CO	1,14
NO	1,23
SO ₂	2,62
H ₂	0,08
NO _x	1,88

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Rendimiento

El volumen de un gas en condiciones normales de presión y temperatura definidas en el Decreto Supremo N° 4 (1992) está dado por la Ecuación 6.6.

$$\hat{V}_{gas} = \frac{RT}{P} = \frac{0,0821 \left[\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right] * 298,16 [K]}{1 [atm]} = 24,45 \left[\frac{L}{mol} \right] \quad (6.6)$$

Considerando la siguiente reacción parcial de oxidación del combustible,



Y que se tiene la composición elemental en masa del combustible (%C, %H, %N, %S, %O), entonces para combustionar todo el contenido de carbono que presenta 1 [kg] de combustible, se tiene que:

$$\frac{\%C}{PM_c [g/mol]} * \frac{1}{1 [Kg] de comb} * \frac{1 [mol] de O_2}{1 [mol] de C} * \frac{24,45 [L] de O_2}{1 [mol] de O_2} * \frac{1 [m^3]}{1000 [L]} = 0,2445 \left(\frac{\%C}{12} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.8)$$

Para los demás elementos que componen el combustible, las demás reacciones quedan:



Debido a que se está realizando el balance referido al oxígeno necesario para combustionar 1 [kg] de combustible, se debe restar el oxígeno trae consigo el combustible, de manera que las cantidades de oxígeno total (O_T) y de aire total (A_T) necesarias para quemar completamente 1 [g] combustible se expresan en la Ecuación 6.13 y Ecuación 6.14 respectivamente, considerando que el oxígeno representa el 21% en volumen del aire.

$$O_T = 0,2445 * \left(\frac{\%C}{12} + \frac{\%H}{4} + \frac{\%S}{32} + \frac{\%N}{14} - \frac{\%O}{32} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.13)$$

$$A_T = \frac{O_T}{0,21} = \frac{0,2445}{0,21} = 1,164 * \left(\frac{\%C}{12} + \frac{\%H}{4} + \frac{\%S}{32} + \frac{\%N}{14} - \frac{\%O}{32} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.14)$$

Con respecto a los gases generados en la combustión, también conocidos como gases de escape, estarán formados por:

$$CO_2 = 0,2445 * \left(\frac{\%C}{12} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.15)$$

$$SO_2 = 0,2445 * \left(\frac{\%S}{32} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.16)$$

$$NO_2 = 0,2445 * \left(\frac{\%N}{14} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.17)$$

$$H_2O = 0,2445 * \left(\frac{\%H}{2} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.18)$$

Como se mencionó en el Capítulo 3.4, el nitrógeno presente en el aire suministrado al proceso en general suele ser muy estable y no experimenta cambios significativos durante la combustión, sin embargo, existe una pequeña cantidad que sí reacciona formando óxidos de nitrógeno (NO_x) cuando las condiciones de temperatura son elevadas (García, 2001; Fernández, 2010), sin embargo para efectos de este cálculo se asumirá que todo el N_2 presente en el aire suministrado es eliminado posteriormente en los gases de escape de la combustión.

$$N_2 = 0,79 * A_T \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.19)$$

Por lo tanto, la suma de todos estos productos equivale a los Gases de escape teóricos Húmedos (GTH):

$$GTH = 0,2445 * \left(\frac{\%C}{12} + \frac{\%H}{2} + \frac{\%S}{32} + \frac{\%N}{14} \right) + 0,79 * A_T \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.20)$$

Considerando que en una combustión real se ocupan cantidades de aire por sobre los requerimientos estequiométricos, la cantidad de gases reales húmedos está dada por los gases teóricos húmedos más el aire en exceso suministrado:

$$GRH = GTH + Aire\ exceso \quad (6.21)$$

Se define el coeficiente lambda como:

$$\lambda = \frac{aire\ real}{aire\ teórico} = \frac{A_R}{A_T} \quad (6.22)$$

$$\lambda - 1 = \frac{A_R}{A_T} - 1 = \frac{A_R - A_T}{A_T} \quad (6.23)$$

Un exceso corresponde a la diferencia entre lo real y lo teórico, de manera que el aire en exceso resulta $A_R - A_T$.

$$\lambda - 1 = \frac{A_{exceso}}{A_T} \quad (6.24)$$

Despejando el aire en exceso:

$$A_{exceso} = (\lambda - 1) * A_T \quad (6.25)$$

Por lo tanto, los Gases Reales Húmedos (GRH) quedan:

$$GRH = \left[0,2445 * \left(\frac{\%C}{12} + \frac{\%H}{2} + \frac{\%S}{32} + \frac{\%N}{14} \right) + 0,79 * A_T \right] + [(\lambda - 1) * A_T] \quad (6.26)$$

$$GRH = 0,2445 * \left(\frac{\%C}{12} + \frac{\%H}{2} + \frac{\%S}{32} + \frac{\%N}{14} \right) + A_T(\lambda - 0,21) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.27)$$

Además, la cantidad de gases reales secos queda:

$$GRS = GRH - 0,2445 \left(\frac{\%H}{2} \right) \left[\frac{Nm^3}{kg_{comb}} \right] \quad (6.28)$$

De manera que el porcentaje de CO₂ máximo teórico resulta:

$$\%CO_2 \text{ máx. teórico} = \frac{0,2445 * \frac{\%C}{12}}{GRS} * 100 [\%] \quad (6.29)$$

Por lo que el rendimiento de quemado (con λ_{real}) y el rendimiento de combustión (con $\lambda=1$), quedan:

$$Rendimiento \text{ de quemado} = \frac{\% CO_2 \text{ medido}}{\% CO_2 \text{ máx. teórico (con } \lambda_{real})} * 100 [\%] \quad (6.30)$$

$$\text{Rendimiento de combustión} = \frac{\% CO_2 \text{ medido}}{\% CO_2 \text{ máx.teórico (con } \lambda = 1)} * 100 [\%] \quad (6.31)$$

6.4 Análisis de cenizas

Considerando las cenizas recolectadas en de los ensayos de combustión y el respectivo análisis XRF para determinar los elementos que estas contienen, se procederá a calcular dos índices de *slagging*, ratio S y ratio Cl, para determinar respectivamente el grado de escorificación que se generará tras la combustión de las diferentes variedades de biomasa, mediante el procedimiento descrito por Suárez y Folgueras (2015) y Niu et al. (2014), cuyas fórmulas de cálculo se aprecian en la Ecuación 6.32 y Ecuación 6.33.

$$ratio\ S = \frac{\%S_{volátil\ base\ ceniza} + \%K_2O + \%Na_2O}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (6.32)$$

$$ratio\ Cl = \frac{\%Cl_{base\ ceniza} + \%K_2O + \%Na_2O}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (6.33)$$

Además, también serán calculados los porcentajes de volatilización de cloro y azufre, comparando la concentración inicial de estos elementos en la biomasa sin quemar, con la concentración de estos elementos en las cenizas, mediante la Ecuación 6.34.

$$\% Volatilización_B = \frac{a - b}{a} * 100 \quad (6.34)$$

Dónde,

a : concentración del elemento en la biomasa [%].

b : concentración del elemento en las cenizas [%].

Por otra parte, para determinar el $\%S_{volátil\ base\ ceniza}$ y el $\%Cl_{base\ ceniza}$ que ingresarán a la fórmula de ratio S y ratio Cl, se requiere realizar ciertos cambios en las bases de cálculo para que los resultados queden expresados en base a las cenizas y no en base a la biomasa sin quemar, los cuales consisten en:

$$\%S_{volátil\ base\ ceniza} = \frac{\%S_{volátil\ B} * \%S_{BSQ}}{\%Cenizas} \quad (6.35)$$

$$\%Cl_{base\ ceniza} = \% Cenizas * \%Cl_{BSQ} \quad (6.36)$$

Dónde,

$\%S_{volátil\ B}$: porcentaje de azufre volátil en base a la biomasa sin quemar [%].

$\%S_{BSQ}$: concentración de azufre en la biomasa sin quemar [%].

$\%Cl_{BSQ}$: concentración de cloro en la biomasa sin quemar [%].

$\% Cenizas$: porcentaje en masa de cenizas que genera la biomasa [%].

7. Tratamiento estadístico de los datos

Con el fin de identificar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos para las distintas variedades de *pellets*, se realizará un tratamiento estadístico mediante el *software* “Statgraphics Centurion XVI”, que considera las siguientes pruebas:

- **Test de normalidad Shapiro-Wilk:**

Cuando el tamaño muestral es igual o inferior a 50, una manera adecuada para contrastar la bondad de ajuste de los datos a una distribución normal corresponde a la prueba de Shapiro-Wilk, la cual establece las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: los datos provienen de una distribución normal.

Hipótesis alternativa: los datos no provienen de una distribución normal.

El estadístico de prueba W se define como:

$$W = \frac{[\sum_{i=1}^k a_{(n-i+1)} * (x_{(n-i+1)} - x_{(i)})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.1)$$

Dónde,

$a_{(n-i+1)}$: coeficiente tabulado para cada tamaño muestral.

$x_{(n-i+1)}$: dato ordenado ubicado en la posición $n - i + 1$.

$\bar{x}$: media de los datos.

n : número total de datos de la muestra.

Si W es menor que el valor crítico esperado, y el nivel de confianza es menor a 0,05, entonces se rechaza la hipótesis nula con un 95% de confianza (Shapiro y Wilk, 1965; Yazici y Yolacan, 2007; StatPoint Technologies Inc., 2010).

- **Prueba de Levene:**

Corresponde a un análisis que permite contrastar la homogeneidad de las varianzas existentes entre dos o más grupos. Las hipótesis establecidas son las siguientes:

Hipótesis nula: las varianzas para todos los grupos son iguales.

Hipótesis alternativa: al menos un par de varianzas dentro de los grupos presentan diferencias significativas.

El estadístico de prueba para el test de Levene se detalla en la Ecuación 6.25.

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_{i.} - \bar{Z}_{..})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Z}_{ij} - \bar{Z}_{i.})^2} \quad (7.2)$$

Dónde,

N : número total de datos.

k : cantidad de grupos.

n_i : cantidad de datos en el grupo i .

$\bar{Z}_{..}$: media general de $\bar{Z}_{ij}$

$\bar{Z}_{i.}$: media de $\bar{Z}_{ij}$ para el grupo i .

$\bar{Z}_{ij}$: $|Y_{ij} - \bar{Y}_{i.}|$, dónde $\bar{Y}_{i.}$ Puede ser la media, la mediana o la media recortada al 10% de los i grupos.

El test rechaza la hipótesis nula cuando el valor W es mayor que el valor crítico superior de la distribución de Fisher con un 95% de confianza y con los grados de libertad correspondientes (Correa, Iral y Rojas, 2006; García, 2017; StatPoint Technologies Inc., 2010).

- Test de Kruskal-Wallis:

Esta prueba representa un método adecuado para comparar muestras que provienen de distribuciones no normales. El objetivo de este test es identificar si existen diferencias estadísticas significativas entre grupos de medianas. Se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: las medianas para todos los grupos son iguales entre sí.

Hipótesis alternativa: al menos un par de medianas dentro de los grupos presentan diferencias significativas.

El estadístico de prueba H para el test de Kruskal-Wallis se define como:

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{j=1}^J \frac{R_j^2}{n_j} - 3(n+1) \quad (7.3)$$

Dónde,

n : número total de datos.

j : número de grupos.

n_j : cantidad de datos del grupo j .

R_j : suma de los rangos asignados a las n_j datos del grupo j .

Si H supera el valor crítico según el modelo de probabilidad chi-cuadrado, con un 95% de confianza y con los grados de libertad correspondientes, se rechaza la hipótesis nula (IBM Corporation, 2009; StatPoint Technologies Inc., 2010).

- **Test de rangos múltiples LSD:**

El Test LSD (*Least significant difference*) es una prueba que permite comparar las medias de grupos de datos, identificando aquellas que se encuentren más distantes, asumiendo previamente la homocedasticidad y normalidad de los grupos. Esta prueba establece las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: las medias de todos los grupos son iguales.

Hipótesis alternativa: al menos un par de medias dentro de los grupos presentan diferencias significativas.

El Test LSD establece el siguiente estadístico de prueba, como se aprecia en la Ecuación 6.27.

$$t = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_j}{\sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}} \quad (7.4)$$

Dónde,

CM_E : cuadrado medio del error de la tabla de varianza.

n_i : número de repeticiones en el grupo i .

n_j : número de repeticiones en el grupo j .

$\bar{y}_i$: media muestral del grupo i .

$\bar{y}_j$: media muestral del grupo j .

Si el valor t calculado es mayor que el valor teórico crítico de la distribución *t-student*, para los grados de libertad correspondientes y con un 95% de confianza, entonces se

rechaza la hipótesis nula (Fallas 2012; Williams y Abdi, 2010; StatPoint Technologies Inc., 2010).

- **Análisis de correlación de Spearman:**

Cuando las variables en estudio no provienen de una distribución normal, para determinar la intensidad de la relación lineal entre ellas, es adecuado utilizar el coeficiente de correlación de Spearman, que permite comparar dos variables aleatorias cuantitativas midiendo la intensidad de la relación lineal entre ellas. Este coeficiente se calcula de la siguiente manera:

$$r_s = 1 - \left[6 \sum \frac{d_i^2}{n^3 - 3} \right] \quad (7.5)$$

Dónde,

d_i : diferencia entre rangos de las variables x e y .

n : número de parejas de datos.

Los valores de r_s oscilan entre -1 y 1, cuando se obtienen valores cercanos a cero, indica la ausencia de relación entre las variables, mientras que valores cercanos a 1, independiente de su signo, indica una mayor asociación entre ellas (Badii, Guillen, Lugo y Aguilar, 2014).

8. Resultados y discusión

8.1 Resultados proceso de peletizado

A continuación, se describen los resultados obtenidos respecto al proceso de peletizado. En la Figura 8.1 se puede apreciar la estructura final de los *pellets* fabricados con biomasa residual de avena, específicamente de cáscara y paja.

Se distingue que los *pellets* de avena poseen formas irregulares y presentan un contorno astilloso, es decir, la consolidación del material es deficiente, sin embargo se conserva la estructura física del *pellet* a pesar de que presenta diámetros y largos variables entre sí. Esto evidencia que la granulometría que presentaba el material crudo sin peletizar, no era suficientemente pequeña para poder armar *pellets* con tamaño y forma regular, como queda fabricado el *pellet* comercial.



Figura 8.1 Pellets de paja y cáscara de avena.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, con respecto a los pellets conformados a partir de orujos de uva, se puede apreciar en la Figura 8.2 que su coloración resulta más oscura que la de los pellets de avena, y en general la forma de cada *pellet* tiende a ser más homogénea que la de la avena, sin embargo, presentan surcos en sus contornos y tamaños variables. Para el caso de esta biomasa, se evidencia que no existe problema con la granulometría del material previo a peletizar, porque no se aprecian astillas sobresalientes en la estructura del *pellet*, sin

embargo, un factor que puede haber influido en la consolidación del material corresponde a la presión de peletizado con que se operó, la cual en este caso fue de 70 [bar].

Cabe destacar que para esta biomasa se elaboraron 2 partidas de *pellets*, la primera partida se ocupó en las quemas Q1, Q2 y Q3 de uva, y la segunda partida en las quemas Q4, Q5 y Q6. Esto resulta relevante debido a que ambas partidas presentaban *pellets* con distintas características, y se diferenciaban principalmente en la consolidación del material, la cual en la primera partida era mínima, y los pellets se desarmaban muy fácilmente, en cambio en la segunda partida se encontraban más compactos. Además, ocurrió que en proceso de peletizado en la primera partida de pellets se produjo un efecto de caramelización, por lo que al combustionarlas emitían un aroma dulce.



Figura 8.2 Pellets de orujo de uva.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, respecto a los pellets elaborados a partir de aserrín de pino radiata, se observa en la Figura 8.3 que su coloración resulta más clara que la de los *pellets* de avena y uva, además su estructura se encuentra mejor conformada que las demás biomásas. Sin embargo, se logra apreciar que presenta cierta tendencia a desarmarse, es decir, también presenta problemas con respecto a la consolidación del material.



Figura 8.3 Pellets de aserrín de pino.
Fuente: Elaboración propia.

8.2 Prueba de blanco

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la prueba de blanco en la 3CE, cuyo objetivo consistió en validar la limpieza química y térmica realizada a los equipos de monitoreo y a todas las zonas de la 3CE.

En el Gráfico 8.1 se ilustra el comportamiento y la concentración en tiempo real de PM10, PM2,5, PM1, BC y BrC durante la prueba de blanco. Se determina que tanto el PM1, PM2,5 y PM10 no superan los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración durante los primeros 5 [min] del ensayo, valor que desciende considerablemente a medida que avanza la prueba, hasta alcanzar concentraciones muy pequeñas que están por debajo del límite de detección del equipo de monitoreo (Espectrómetro 1.109 Grimm AR – 2) después de transcurrir los primeros 15 [min]. Cabe señalar que este valor alcanzado representa aproximadamente entre un 0,03 - 0,25[%] de los niveles más elevados alcanzados durante el monitoreo en línea de PM1, PM2,5 y PM10 en las quemas con biomasa. Con respecto a las emisiones de BC y BrC, estas no superan los valores de 2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente en el ensayo de blanco, lo cual equivale entre 0,01–0,83% del máximo alcanzado durante las pruebas con biomasa para BC, y entre 0,01–0,17% para el caso de BrC. Por lo tanto, puede establecerse que la limpieza química y térmica realizada a la 3CE resulta satisfactoria para el caso del material particulado, al alcanzar niveles que no superan el 1% de las concentraciones máximas detectadas en línea durante los ensayos de combustión.

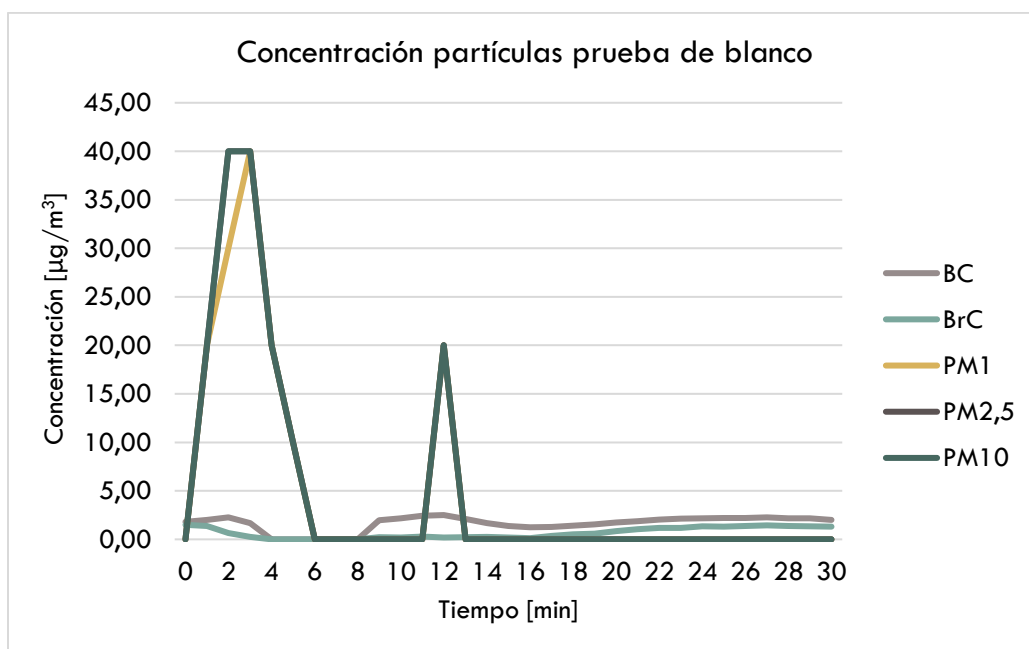


Gráfico 8.1 Comportamiento en tiempo real de partículas en prueba de blanco.

Fuente: Elaboración propia.

Según lo referente a la distribución granulométrica de las partículas detectadas, se establece que durante la prueba de blanco, las partículas medidas se concentran

principalmente en el rango de tamaños 0,013 – 0,115 [μm], como se aprecia en el Gráfico 8.2, con un total aproximado de $3,9 \times 10^5$ [N° de partículas], lo que equivale entre un 0,0015 – 1,39% de la cantidad de partículas totales emitidas durante los ensayos de combustión. De manera que con respecto a la cantidad de partículas, también se comprueba que la limpieza química y térmica resulta satisfactoria.

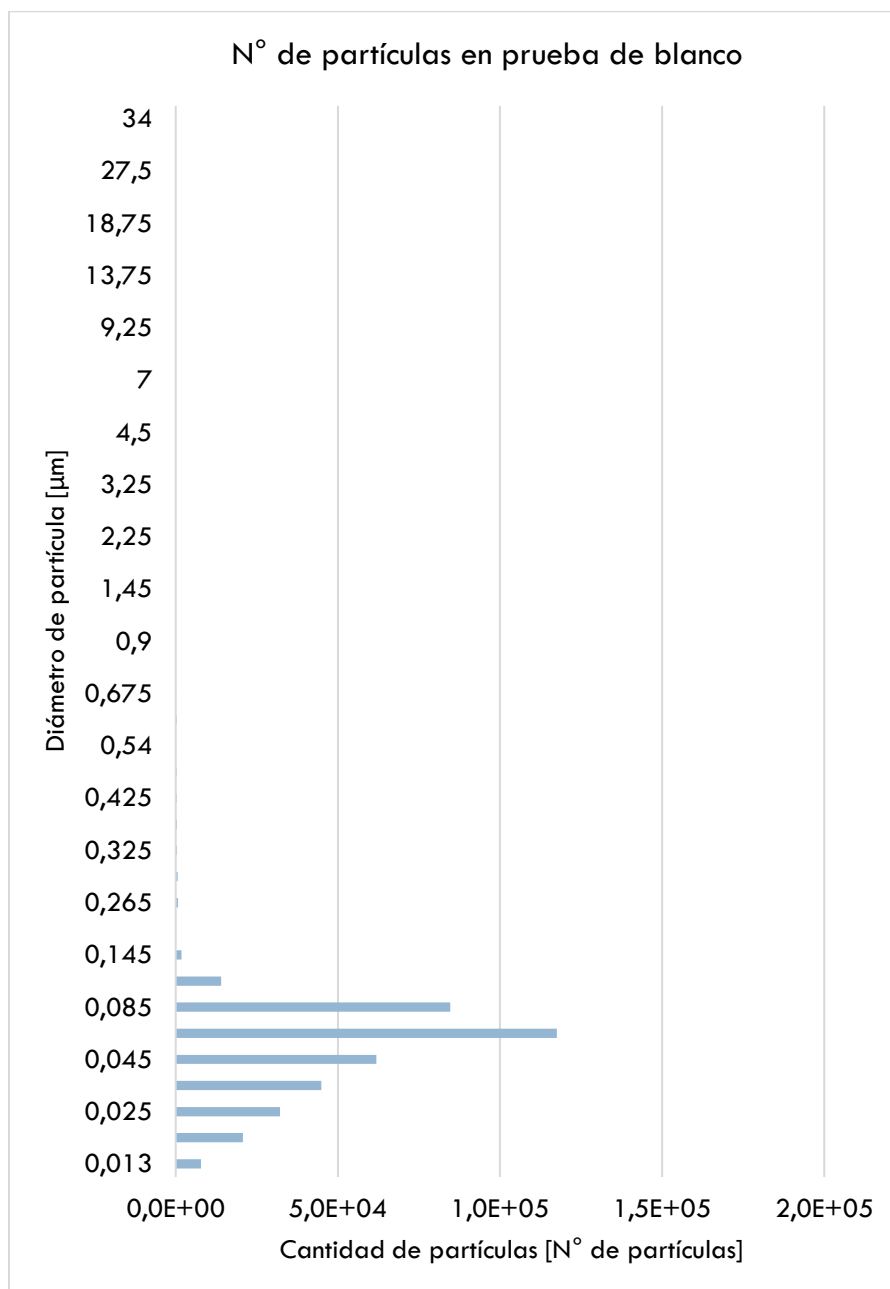


Gráfico 8.2 Cantidad de partículas durante prueba de blanco en función del diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

En relación con los gases de combustión CO, NO, SO₂, H₂ y NO_x, según lo observado en el Gráfico 8.3, que representa los niveles en tiempo real de estos gases en la prueba de

blanco, se aprecia que no presentaron concentraciones que superen las 6 [ppm]. En el caso del NO_x , sus concentraciones alcanzaron un máximo de 3 [ppm] durante el ensayo de blanco, lo cual equivale entre un 1,1 – 4,0% del NO_x detectado durante los ensayos con biomasa. Con respecto a SO_2 , los valores medidos en la prueba de blanco resultaron inferiores al límite de detección del equipo Analizador de gases Testo 350XL durante todo el ensayo. Los comportamientos del CO y del H_2 alcanzaron un límite de 6 [ppm] en las mediciones en línea, representando como máximo un 0,08% de las emisiones de CO durante las quemas con biomasa, y como máximo un 0,83% para las emisiones de H_2 .

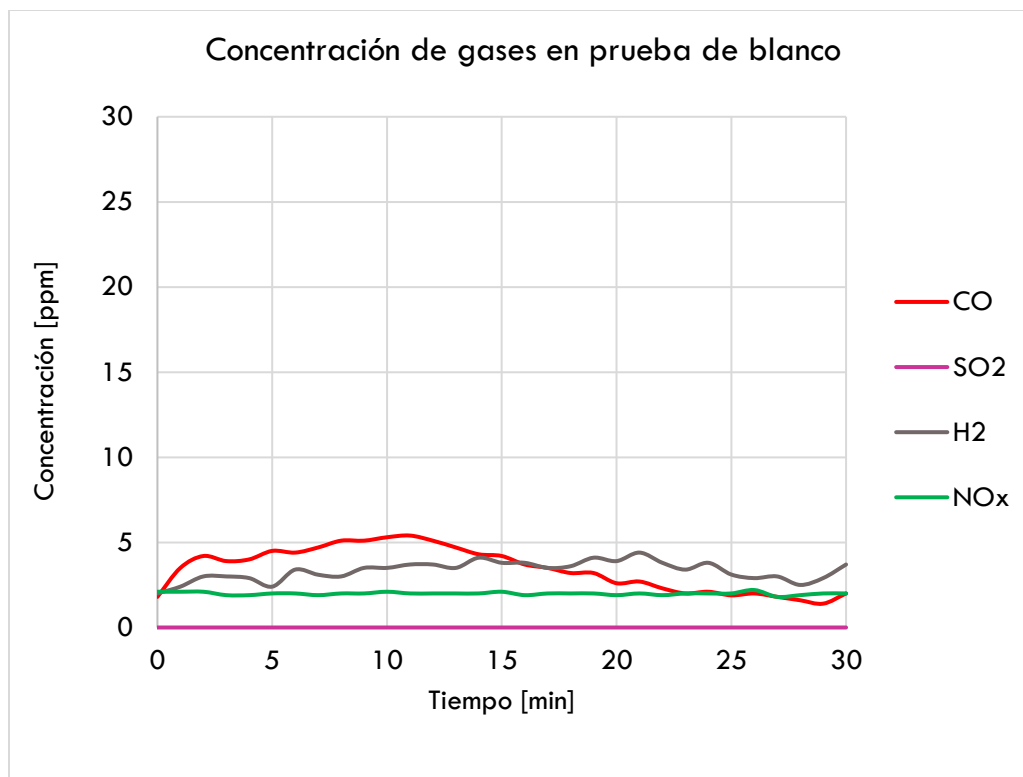


Gráfico 8.3 Comportamiento en tiempo real de los gases en prueba de blanco.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los gases CO_2 y O_2 , como se indica en el Gráfico 8.4, la concentración de CO_2 se mantuvo relativamente constante durante la prueba de blanco, sin exceder niveles del 0,33%, lo cual representa como máximo un 2% de las emisiones de CO_2 durante los ensayos de combustión. De la misma forma, el comportamiento del O_2 no presenta mayores variaciones, con valores muy cercanos a la concentración típica de O_2 en el aire, alcanzando un mínimo de 20,98%.

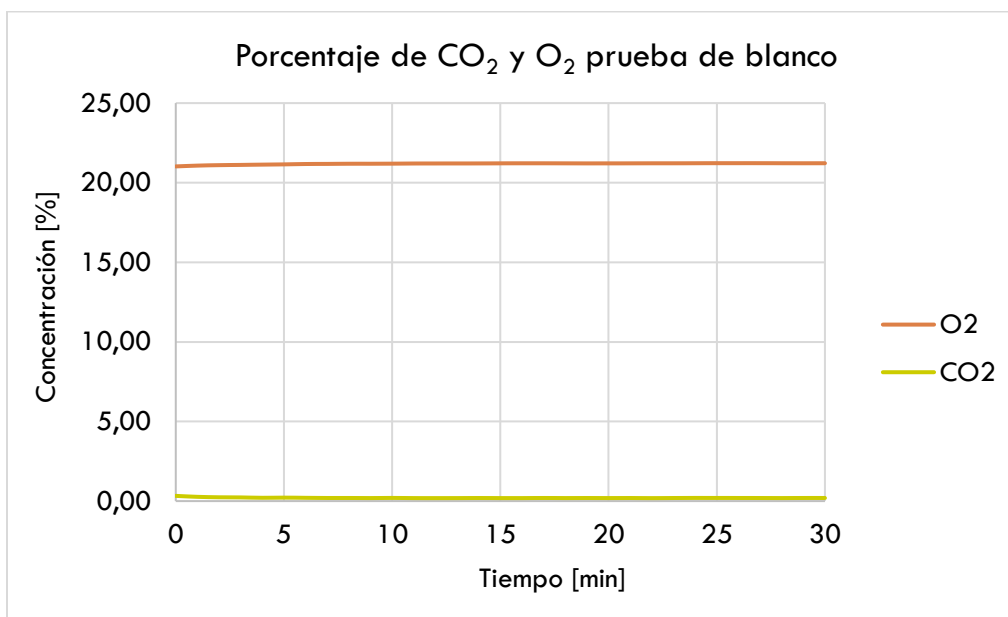


Gráfico 8.4 Comportamiento CO₂ y O₂ durante ensayo de blanco.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se determina que las concentraciones para cada gas medido durante la prueba de blanco no superan el 4% de las emisiones totales para cada compuesto respectivo en los gases de combustión durante las pruebas con biomasa, por lo que puede establecerse que la limpieza química y térmica realizada a la 3CE con respecto a los gases medidos, resulta satisfactoria en más de un 96%.

En consecuencia, se determina que, si bien el ambiente del laboratorio no está exento de contener partículas y gases que se monitorean durante los ensayos en la 3CE, no existe un aporte externo sostenido considerable de contaminantes durante las pruebas de combustión.

8.3 Emisiones de material particulado

A continuación, en la Tabla 8.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con respecto a las emisiones de material particulado durante los ensayos de combustión. Las celdas marcadas en color amarillo indican que durante esa quema en específico el equipo de medición presentó algún problema, por lo que no fue posible obtener un FE para ese ensayo. Las celdas marcadas en color rojo corresponden a los valores atípicos (*outliers*) dentro del conjunto de datos, los cuales fueron identificados mediante la elaboración de gráficos de cajas y bigotes detallados en el Anexo B. Cabe destacar que durante las quemas que presentan *outliers* no se presentaron problemas aparentes en el transcurso del ensayo, ni en los equipos de medición. Al observar el panorama general de los datos, se aprecia que la Quema 3 para Avena generó FE con valores atípicos para todos los tipos de partículas medidos, excepto para BC. Con el objetivo de no introducir sesgos en los resultados, para el cálculo de los promedios y desviaciones estándar no se considerarán los valores atípicos obtenidos.

Tabla 8.1 Resumen resultados de FE para PM.

Biomasa	N° Quema	PM1 [g/kg]	PM2,5 [g/kg]	PM10 [g/kg]	Número de partículas [N° partículas/kg]	BC [g/kg]	BrC [g/kg]
Avena	Q1	0,296	0,301	0,303	1,30E+13	0,075	0,033
	Q2	0,114	0,114	0,114	1,16E+13	0,076	0,034
	Q3	3,257	3,580	4,092	6,58E+14	0,104	0,078
	Q4	0,086	0,123	0,164	9,24E+11	0,084	0,019
	Q5	0,773	0,799	0,804	6,76E+13	0,089	0,042
	Q6				8,32E+13	0,076	0,034
Uva	Q1	1,248	1,263	1,263	9,74E+13	0,073	0,030
	Q2					0,070	0,030
	Q3					0,092	0,045
	Q4	0,417	0,432	0,432	9,34E+11	0,105	0,049
	Q5	0,363	0,374	0,374	7,79E+11	0,099	0,043
	Q6	0,269	0,279	0,279	6,10E+11	0,043	0,030
Pino	Q1	1,488	1,563	1,679	2,65E+14	0,080	0,036
	Q2	2,581	2,850	3,258	3,86E+14	0,084	0,039
	Q3	2,186	2,633	3,405	4,92E+14	0,079	0,036
Pellet comercial	Q1	3,275	3,412	4,084	7,51E+12	0,031	0,030
	Q2	3,749	3,822	4,071	9,86E+12	0,034	0,023
	Q3	2,477	2,510	2,660	5,49E+12	0,034	0,023
	Q4					0,051	0,067
	Q5	3,302	3,342	3,486	9,48E+12	0,006	0,028
	Q6	1,899	1,967	2,256	5,04E+12	0,031	0,025
	Q7	1,696	1,752	2,010	3,62E+12	0,008	0,018
	Q8	3,013	3,063	4,084	8,34E+12	0,018	0,030

Fuente: Elaboración propia.

8.3.1 Emisiones de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀

A continuación, en la Tabla 8.2, Tabla 8.4 y Tabla 8.6 se presenta un resumen de todos los resultados obtenidos para los Factores de Emisión (FE) de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀ respectivamente, en las quemas de *pellets* conformados de avena, uva, pino y *pellet* comercial. Si bien se realizaron 6 ensayos con los *pellets* de avena, en uno de ellos (Q6) el Espectrómetro de aerosoles (AR – 2 y AR – 3) presentó un error durante el ensayo y dejó de medir, lo mismo ocurrió en las quemas Q2 y Q3 para uva, y en la quema Q4 para *pellet* comercial, por lo tanto, no fue posible obtener un FE en estas ocasiones.

Por otra parte, una observación relevante con respecto a las características de la biomasa utilizada en las quemas Q1, Q2 y Q3 con uva, fue que la estructura de los *pellets* no se encontraba perfectamente compacta con forma adecuada, presentando la tendencia a desarmarse fácilmente, por lo que se evaluará posteriormente si esta característica presenta incidencia en los resultados durante esa quema.

En los gráficos posteriores, para destacar la fase de llama del proceso se consideró una duración de 3 [min], si bien cada ensayo presenta tiempos de llama diferentes, oscilan generalmente entre 2 y 3 [min], de manera que para homogenizar gráficamente este valor se marcó solamente este último, considerando también que esta cantidad se utilizó para los cálculos del exceso de aire.

8.3.1.1 PM₁

Con respecto específicamente a PM₁, según lo expuesto en la Tabla 8.2, sin considerar los valores atípicos en el cálculo de los promedios y las desviación estándar, la biomasa que generó menores emisiones de este contaminante durante los ensayos de combustión, resultó ser el *pellet* de avena con un FE promedio de 0,32 [g/kg], no obstante, en este caso la variabilidad entre los resultados para esta biomasa fue más elevada con respecto al promedio de las demás variedades de *pellet*, lo cual se ve reflejado en su alto coeficiente de variación del 100%.

El segundo *pellet* con menores emisiones de PM₁ corresponde a la biomasa del tipo uva, con un FE promedio de 0,57 [g/kg], sin embargo, este resultado presenta una elevada variabilidad al considerar que el coeficiente de variación entre los FE de las quemas con uva resultó de un 79%, valor más elevado que lo obtenido con las variedades de pino y *pellet* comercial. Cabe destacar que, la quema Q1 con uva, la cual se realizó con biomasa poco compacta, presentó un valor de FE de 1,25 [g/kg], diferente a la tendencia que siguieron las demás quemas Q4, Q5 y Q6, las que resultaron con FE más homogéneos entre sí, sin superar 1 [g/kg], lo cual explica el elevado coeficiente de variación que se obtuvo para las quemas con uva.

En el caso de las emisiones promedio de PM1 para pino, fueron en general mayores que los resultados con pellets de uva y avena, con FE promedios de 2,09 y 2,77 [g/kg] para pino y pellet comercial respectivamente, aun así, estas variedades de biomasa presentaron FE con menores desviaciones estándar que las quemas con avena y uva, lo que se denota en sus coeficientes de variación, de un 27% para pino, y de un 28% para pellet comercial.

Tabla 8.2 Factores de Emisión PM1.

Biomasa	N° Quema	FE PM1 [g_{PM1}/kg_{pellet}]	FE PM1 Promedio [g_{PM1}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{PM1}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,30	0,32	0,21	100
	Q2	0,11			
	Q3	3,257 Outlier			
	Q4	0,09			
	Q5	0,77			
	Q6	-			
Uva	Q1	1,25	0,57	0,45	79
	Q2	-			
	Q3	-			
	Q4	0,42			
	Q5	0,36			
	Q6	0,27			
Pino	Q1	1,49	2,09	0,55	27
	Q2	2,58			
	Q3	2,19			
Pellet comercial	Q1	3,27	2,77	0,77	28
	Q2	3,75			
	Q3	2,48			
	Q4	-			
	Q5	3,30			
	Q6	1,90			
	Q7	1,70			
	Q8	3,01			

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar más en profundidad las diferencias obtenidas entre cada quema para los distintos tipos de pellet, se expone a continuación en el Gráfico 8.5, Gráfico 8.6, Gráfico 8.7 y Gráfico 8.8, el comportamiento en línea de las emisiones de PM1 durante todos los ensayos. A grandes rasgos, la concentración de PM1 se comporta de manera similar durante la totalidad de las quemas y se logra identificar las diferentes fases de la combustión, con una alta carga de emisiones durante la fase de llama, que dura alrededor de 3 [min],

donde se alcanza un valor máximo inicial, para luego ir descendiendo considerablemente durante la fase humeante de la combustión, en la que posteriormente ocurre un ascenso de las emisiones, entre los minutos 20 y 30 del ensayo, sin embargo en esta ocasión las concentraciones máximas en línea de PM1 resultan menores que el máximo alcanzado inicialmente, por último las emisiones van disminuyendo paulatinamente hasta el final de cada ensayo.

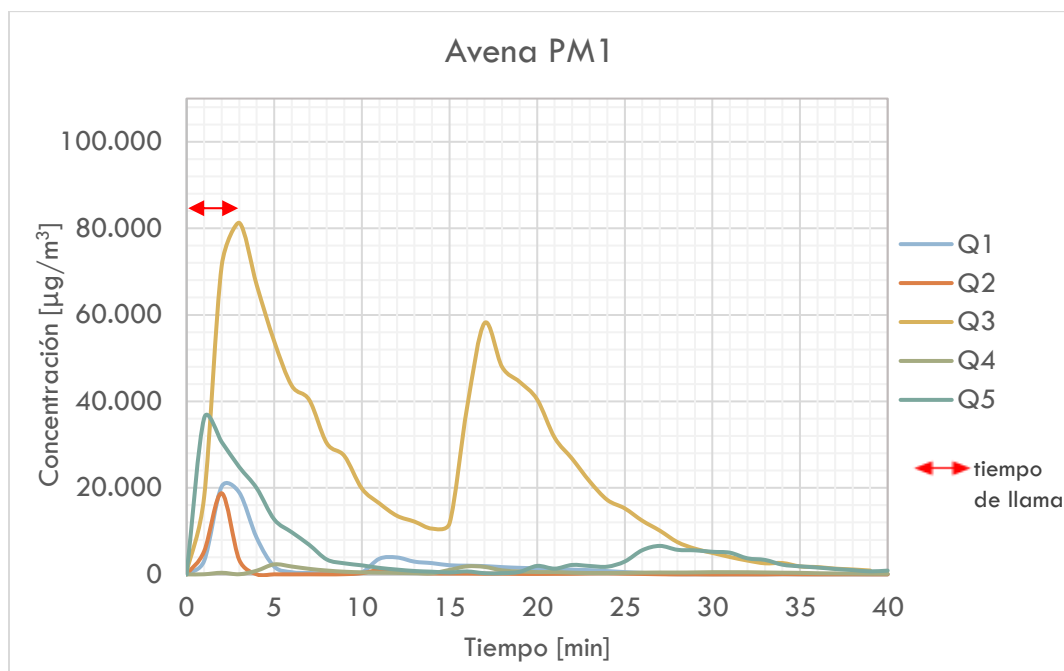


Gráfico 8.5 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de avena.
Fuente: Elaboración propia.

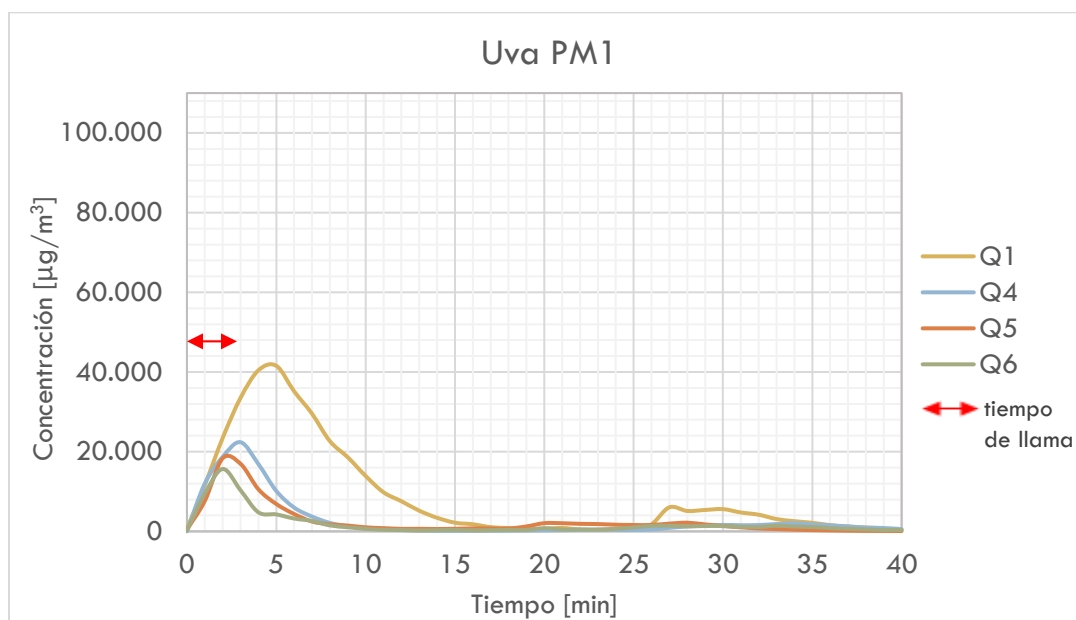


Gráfico 8.6 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de uva.
Fuente: Elaboración propia.

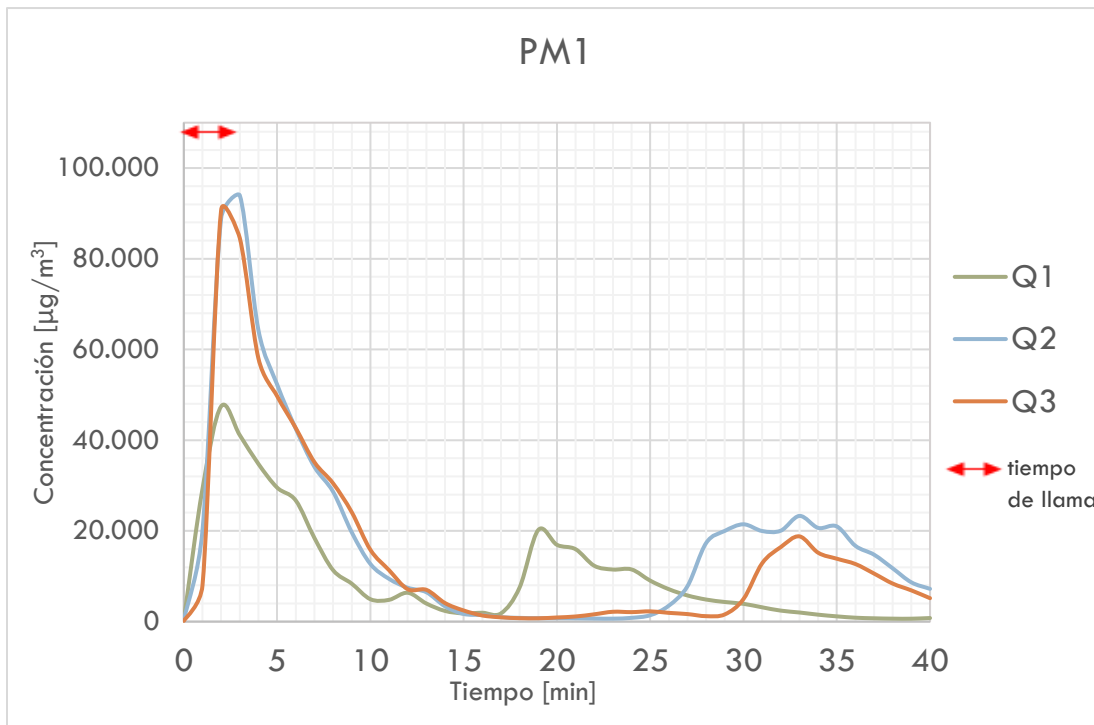


Gráfico 8.7 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellets de pino.
Fuente: Elaboración propia.

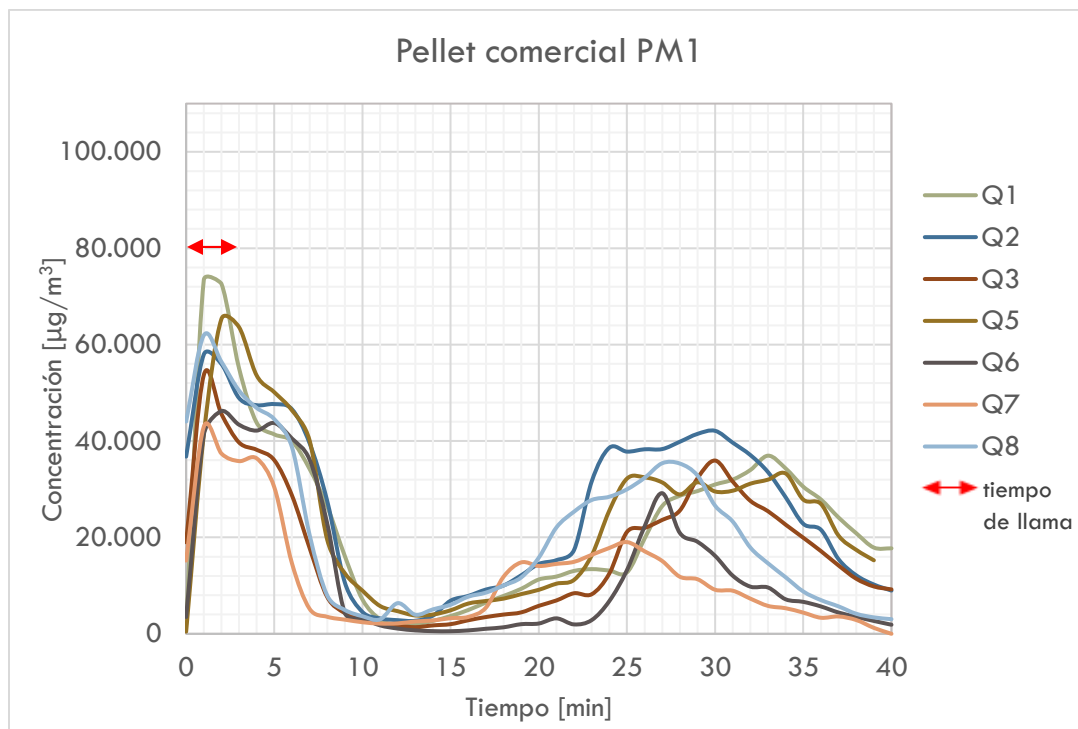


Gráfico 8.8 Emisiones en tiempo real de PM1 para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las quemas de avena, en el Gráfico 8.5, se aprecia que la quema Q3 presenta mayor cantidad de emisiones en comparación con las quemas Q1, Q2, Q4 y Q5, como también se ve reflejado en los FE de la Tabla 8.2, ya que Q3 alcanza un máximo de concentración inicial cercano a 80.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, y en las demás quemas con avena no se superan los 36.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ como máximo global, además durante la fase humeante la quema Q3 generó un máximo local de alrededor de 60.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, y las quemas Q1, Q2, Q4 y Q5 no alcanzaron los 10.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Por lo tanto, puede establecerse que Q3 resulta ser la quema que más se diferencia en cuanto a las emisiones y al comportamiento en tiempo real de PM1 dentro de todos los ensayos realizados con avena, lo cual evidencia su condición de *outlier*.

Para el caso de las quemas con uva, en el Gráfico 8.6, se distingue que la quema Q1 alcanza un máximo global de 40.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ aproximadamente durante la fase de llama, en cambio los máximos globales alcanzados durante las quemas Q4, Q5 y Q6 oscilan en torno a los 20.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en esa etapa, no obstante durante la fase humeante las cuatro quemas no superaron los 10.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ como máximo de concentración local en tiempo real. De manera que se establece que Q1 se comporta de forma parcialmente diferente a lo ocurrido con las demás quemas, lo cual puede explicarse según lo expuesto anteriormente sobre la falta de compactación y facilidad de desarme que presentó la biomasa utilizada para la quema Q1 con uva.

Según lo referente a la combustión de *pellet* de pino radiata, como se observa en el Gráfico 8.7, las quemas Q2 y Q3 alcanzaron un máximo global aproximado de PM1 de 93.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ durante la fase de llama, en cambio la quema Q1 no superó los 50.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Con respecto a lo ocurrido en la fase humeante, las tres quemas se acercaron a un máximo de concentración local de 20.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, sin embargo, este valor fue alcanzado en el minuto 19 por la quema Q1, y en el minuto 33 por las quemas Q2 y Q3. Por lo tanto, dentro de los ensayos realizados con pino, la quema Q1 resultó ser la más diferente.

En la situación del *pellet* comercial, en el Gráfico 8.8 se aprecia que las concentraciones máximas de PM1 durante la fase de llama, oscilaron entre 45.000 – 75.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, y durante la fase humeante la concentración máxima local alcanzó valores entre 20.000 y 40.000 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ aproximadamente para las siete quemas estudiadas.

Para identificar de mejor manera las diferencias obtenidas entre los resultados anteriores, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos con el objetivo de verificar si existen diferencias significativas entre las emisiones de PM1 para las distintas variedades de *pellet*, como se expone en la Tabla 8.3, que representa los resultados del test de rangos múltiples, obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, dado que los datos de las emisiones de PM1 provienen de una distribución normal, con un 95% de confianza.

Tabla 8.3 Test de rangos múltiples para FE de PM1.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Uva	4	0,575	X
Avena	5	0,906	X
Pino	3	2,08667	X
Pellet comercial	7	2,77286	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics Centurion XVI.

Mediante el Test de rangos múltiples LSD se establece que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de avena y de *pellet* de pino con *pellet* comercial, con un 95% de confianza. No obstante, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE para los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de pino, de *pellet* de uva con *pellet* comercial, de *pellet* de avena con *pellet* de pino y de *pellet* de avena con *pellet* comercial, con un 95% de confianza.

8.3.1.2 PM2,5

Con respecto a los resultados obtenidos de las emisiones de PM2,5, como se indica en la Tabla 8.4, sin considerar en los promedios y desviaciones estándar aquellos valores que resultaron atípicos, el tipo de *pellet* que generó menores concentraciones promedio de este contaminante durante los ensayos corresponde al *pellet* de avena, con un FE promedio de 0,33 [g/kg], no obstante, en este caso la variabilidad de las emisiones entre las quemaduras resulta muy elevada en contraste con las demás variedades de *pellet*, lo cual se ve reflejado en su alto coeficiente de variación de 96%, como ocurrió de manera similar en el caso de PM1 para los ensayos con avena.

La segunda variedad de biomasa que presentó con menores emisiones PM2,5 corresponde al *pellet* de uva, con un FE promedio de 0,59 [g/kg], sin embargo, el coeficiente de variación obtenido resultó más elevado que con las variedades de pino y *pellet* comercial, con un valor del 77%. Es importante mencionar que equivalentemente a lo sucedido con PM1, los resultados para PM2,5 de la quema Q1 presentaron una tendencia diferente en contraste con las demás quemaduras Q4, Q5 y Q6, las cuales resultaron con FE más similares entre sí.

En el caso de las emisiones promedio de PM1 para pino y *pellet* comercial, en general resultaron más elevadas que las emisiones de las quemaduras con uva y avena, con un promedio de 2,35 y 2,84 [g/kg] para pino y *pellet* comercial respectivamente, aun así, estas variedades de biomasa presentaron FE con desviaciones estándar menores que las demás biomásas, lo que se evidencia sus coeficientes de variación, de un 29% para pino, y de un 27% para *pellet* comercial, situación similar a lo ocurrido con PM1.

Tabla 8.4 Factores de Emisión de PM_{2,5}.

Biomasa	N° Quema	FE PM_{2,5} [g_{PM2,5}/kg_{pellet}]	FE PM_{2,5} Promedio [g_{PM2,5}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{PM2,5}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,30	0,33	0,32	96
	Q2	0,11			
	Q3	3,58 (Outlier)			
	Q4	0,12			
	Q5	0,80			
	Q6	-			
Uva	Q1	1,26	0,59	0,46	77
	Q2	-			
	Q3	-			
	Q4	0,43			
	Q5	0,37			
	Q6	0,28			
Pino	Q1	1,56	2,35	0,69	29
	Q2	2,85			
	Q3	2,63			
Pellet comercial	Q1	3,41	2,84	0,78	27
	Q2	3,82			
	Q3	2,51			
	Q4	-			
	Q5	3,34			
	Q6	1,97			
	Q7	1,75			
	Q8	3,06			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en el Gráfico 8.9, Gráfico 8.10, Gráfico 8.11 y Gráfico 8.12, se esquematiza el comportamiento en tiempo real de las emisiones de PM_{2,5} durante todos los ensayos con biomasa. En general, la concentración de PM_{2,5} se comporta de manera similar durante todas las quemas y se logra identificar las diferentes fases de la combustión, de la misma forma que se identificaron en los resultados PM₁, con una alta carga de emisiones durante la fase de llama, donde se alcanza un valor máximo inicial, para luego disminuir durante la fase humeante, en la que posteriormente ocurre un ascenso de las emisiones, entre los minutos 20 y 30 del ensayo, para finalmente ir disminuyendo hasta el final de los ensayos.

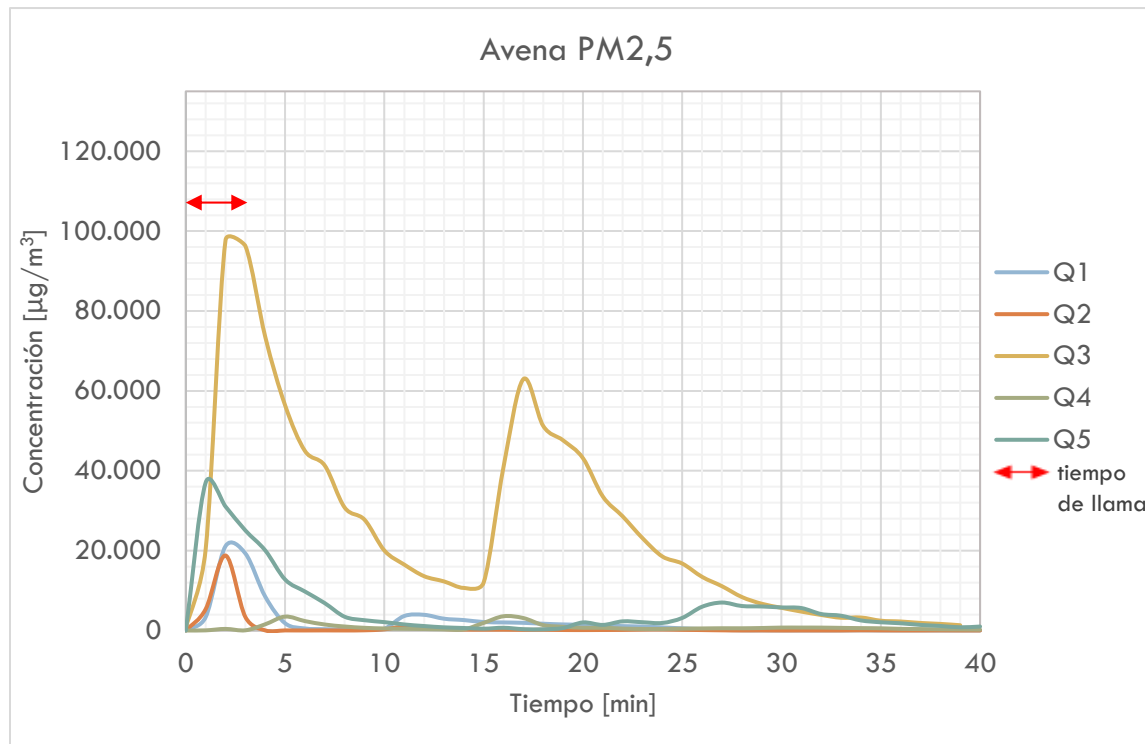


Gráfico 8.9 Emisiones en tiempo real de PM_{2,5} para pellet de avena.
Fuente: Elaboración propia.

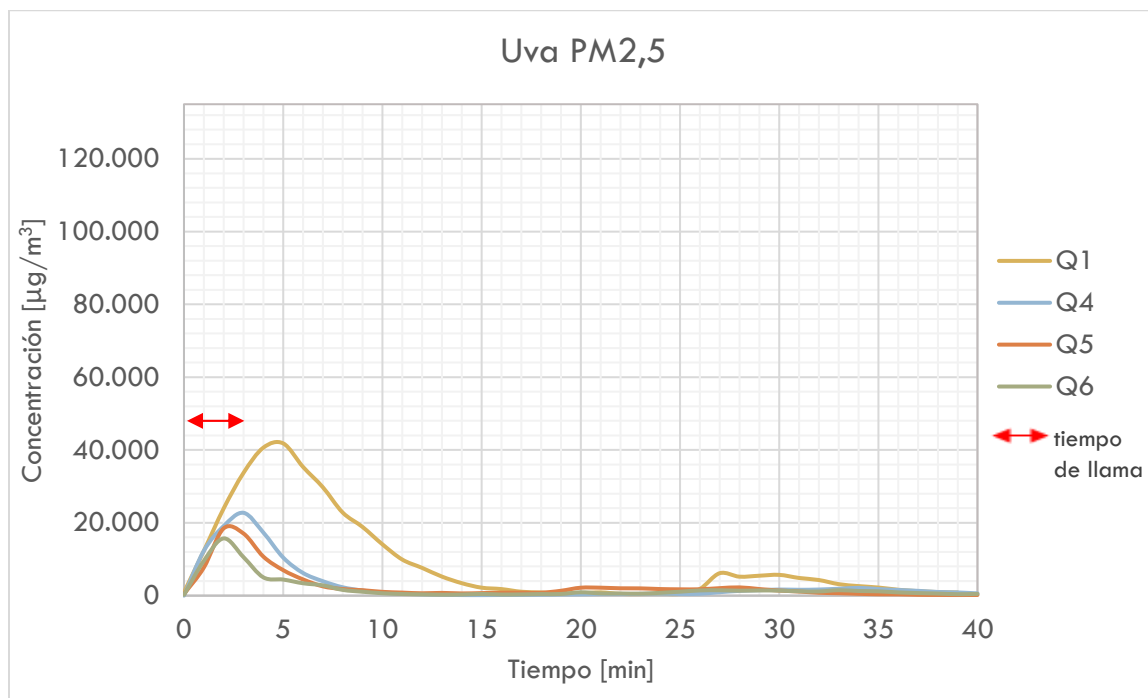


Gráfico 8.10 Emisiones en tiempo real de PM_{2,5} para pellet de uva.
Fuente: Elaboración propia.

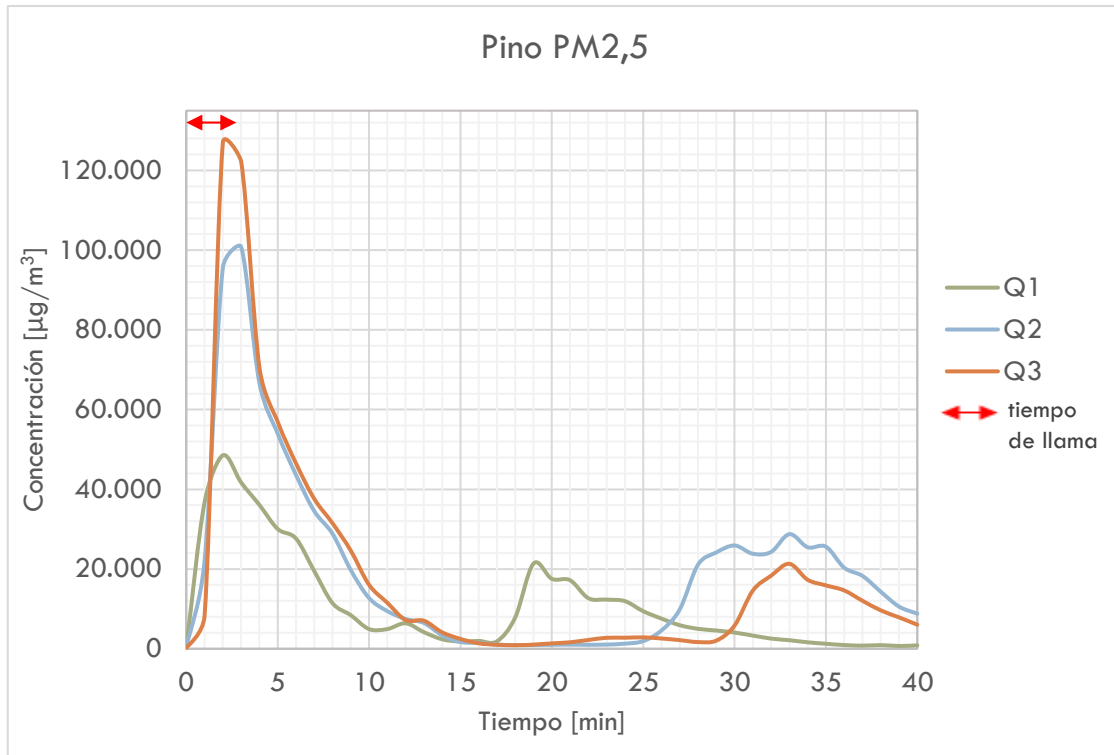


Gráfico 8.11 Emisiones en tiempo real de PM_{2,5} para pellet de pino.

Fuente: Elaboración propia.

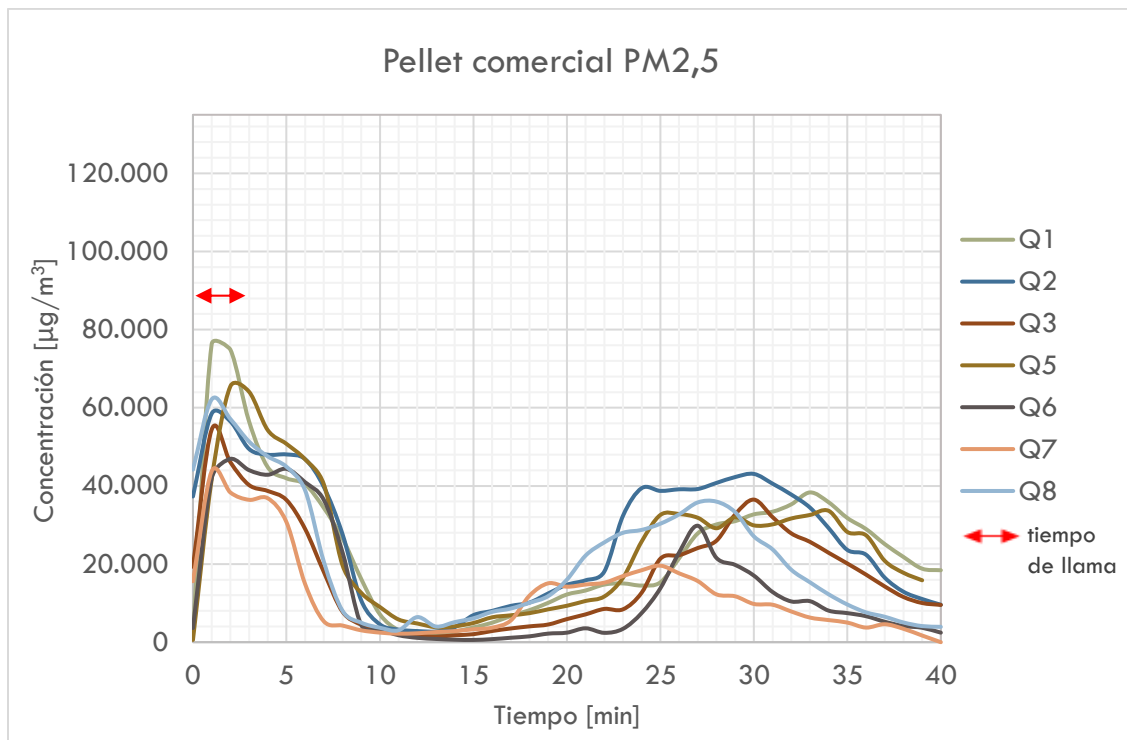


Gráfico 8.12 Emisiones en tiempo real de PM_{2,5} para pellet comercial.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de los ensayos con avena, se aprecia en el Gráfico 8.9 que la quema Q3 resulta relativamente diferente con respecto a las emisiones de PM_{2,5} frente a las quemas Q1, Q2, Q4 y Q5, lo cual también se distingue en los FE de la Tabla 8.2, ya que Q3 alcanza un máximo aproximado de concentración inicial de 100.000 [µg/m³], y en las demás quemas con avena no se superan los 38.000 [µg/m³], evidenciando así su condición de *outlier*. Por otra parte, durante la fase humeante la quema Q3 generó un máximo local cercano a 64.000 [µg/m³], mientras que las quemas Q1, Q2, Q4 y Q5 no alcanzaron los 10.000 [µg/m³]. Por lo tanto, al igual que con PM₁, la quema Q3 resulta ser la que más difiere en cuanto a las emisiones y al comportamiento de PM_{2,5} dentro de todos los ensayos realizados con avena, comprobando la existencia de valores atípicos en esta quema.

Con respecto a las quemas con uva, en el Gráfico 8.10, se observa que Q1, alcanza un máximo global de emisiones en línea para PM_{2,5} cercano a 40.000 [µg/m³], en contraste con las quemas Q4, Q5 y Q6, que presentan valores cercanos a 20.000 [µg/m³]. Resulta importante mencionar que Q1 alcanza su valor máximo aproximadamente 2 minutos después que las demás quemas. Por otra parte, durante la fase humeante, las cuatro quemas no sobrepasaron los 8.000 [µg/m³] como máximo de concentración local. Por lo tanto, puede establecerse que Q1 se comporta ligeramente diferente a lo ocurrido con las demás quemas con respecto a las emisiones de PM_{2,5}, de forma similar a lo que sucedió con las emisiones de PM₁.

Para la situación de las quemas con pino, como se aprecia en el Gráfico 8.11 Gráfico 8.7, la quema Q3 alcanzó un máximo global aproximado de PM_{2,5} de 128.000 [µg/m³], la quema Q2 cercano a los 100.000 [µg/m³] y la quema Q1 no superó los 50.000 [µg/m³] durante la fase de llama. En relación con la fase humeante, las tres quemas oscilaron entre 20.000 y 30.000 [µg/m³] como máximo local, sin embargo, este valor fue alcanzado en el minuto 19 por la quema Q1, y en el minuto 33 por las quemas Q2 y Q3, al igual que lo ocurrido con PM₁ para esta variedad de biomasa.

Según lo referente a la combustión de *pellet* comercial, en el Gráfico 8.12 se observa que las concentraciones máximas de PM_{2,5} durante la fase de llama, fluctuaron entre 45.000 – 76.000 [µg/m³], en cambio los valores máximos locales oscilaron entre 20.000 y 40.000 [µg/m³] aproximadamente durante la fase humeante para las siete quemas ensayadas.

Con el fin de identificar si existen diferencias significativas entre las emisiones de PM_{2,5} para las diferentes variedades de *pellet*, se realizó un análisis estadístico denominado test de rangos múltiples, obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, dado que los datos de las emisiones de PM_{2,5} provienen de una distribución normal, con un 95% de confianza.

En la Tabla 8.5 se presentan los resultados obtenidos para este tratamiento, siendo posible afirmar con un 95% de confianza que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de avena y de *pellet* de pino con *pellet* comercial. Sin embargo, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE para los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de pino, de *pellet* de uva con *pellet* comercial, de *pellet* de avena con *pellet* de pino y de *pellet* de avena con *pellet* comercial, con un 95% de confianza.

Tabla 8.5 Test de rangos múltiples para FE de PM_{2,5}.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Avena	4	0,33425	X
Uva	4	0,587	X
Pino	3	2,34867	X
Pellet comercial	7	2,83829	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics Centurion XVI.

8.3.1.3 PM₁₀

Los resultados obtenidos para las emisiones de PM₁₀ se exponen en la Tabla 8.6, donde se aprecia que los *pellets* de avena fueron los que generaron menor cantidad de este contaminante durante los ensayos, con un FE promedio de 0,35 [g/kg], sin embargo, los datos para este caso presentan una alta variabilidad en comparación con todas las demás tipos de *pellet*, lo que se refleja en su elevado coeficiente de variación del 91%, situación similar a sucedido con los FE de PM₁ y PM_{2,5} para los ensayos con avena.

Respecto a los ensayos con *pellet* de avena, se obtuvo que corresponde a la segunda variedad que generó menor cantidad de emisiones de PM₁₀, con un FE promedio de 0,59 [g/kg], al igual como ocurrió con las emisiones de PM₁ y PM_{2,5}. No obstante, el coeficiente de variación para los FE de PM₁₀ de uva resultó de un 77%, valor más elevado comparado con las variedades de pino y *pellet* comercial. Cabe destacar que al igual que con los resultados de PM₁ y PM_{2,5}, la quema Q1 con uva para PM₁₀ presentó una tendencia diferente en contraste con las quemas Q4, Q5 y Q6, lo cual se explica debido a la escasa compactación que presentó la biomasa utilizada en esta quema.

Con respecto a las emisiones promedio de PM₁₀ para las variedades de pino y *pellet* comercial, en general resultaron más elevadas que los FE de las quemas con uva y avena, con un promedio de 2,78 y 3,24 [g/kg] para pino y *pellet* comercial respectivamente, cabe mencionar que estas variedades de biomasa presentaron FE con baja variabilidad en comparación con las demás biomásas, lo que se evidencia en sus coeficientes de variación, de un 34% para pino y de un 28% para *pellet* comercial.

Tabla 8.6 Factores de Emisión de PM10.

Biomasa	N° Quema	FE PM10 [g_{PM10}/kg_{pellet}]	FE PM10 Promedio [g_{PM10}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{PM10}/kg_{pellet}]	Coficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,30	0,35	0,32	91
	Q2	0,11			
	Q3	4,09 (Outlier)			
	Q4	0,16			
	Q5	0,80			
	Q6	-			
Uva	Q1	1,26	0,59	0,46	77
	Q2	-			
	Q3	-			
	Q4	0,43			
	Q5	0,37			
	Q6	0,28			
Pino	Q1	1,68	2,78	0,96	34
	Q2	3,26			
	Q3	3,41			
Pellet comercial	Q1	4,08	3,24	0,91	28
	Q2	4,07			
	Q3	2,66			
	Q4	-			
	Q5	3,49			
	Q6	2,26			
	Q7	2,01			
	Q8	4,08			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el Gráfico 8.13, Gráfico 8.14, Gráfico 8.15 y Gráfico 8.16, se ilustra el comportamiento en línea de las emisiones de PM10 durante todos los ensayos con biomasa, donde se logran distinguir las diferentes etapas de la combustión, al igual que lo ocurrido con PM1 y PM2,5, con la emisión de una alta carga de contaminantes durante la fase de llama, alcanzando un máximo global, para luego disminuir durante la fase humeante, donde

posteriormente, entre los minutos 20 y 30 del ensayo, se emite un máximo local de concentración en tiempo real.

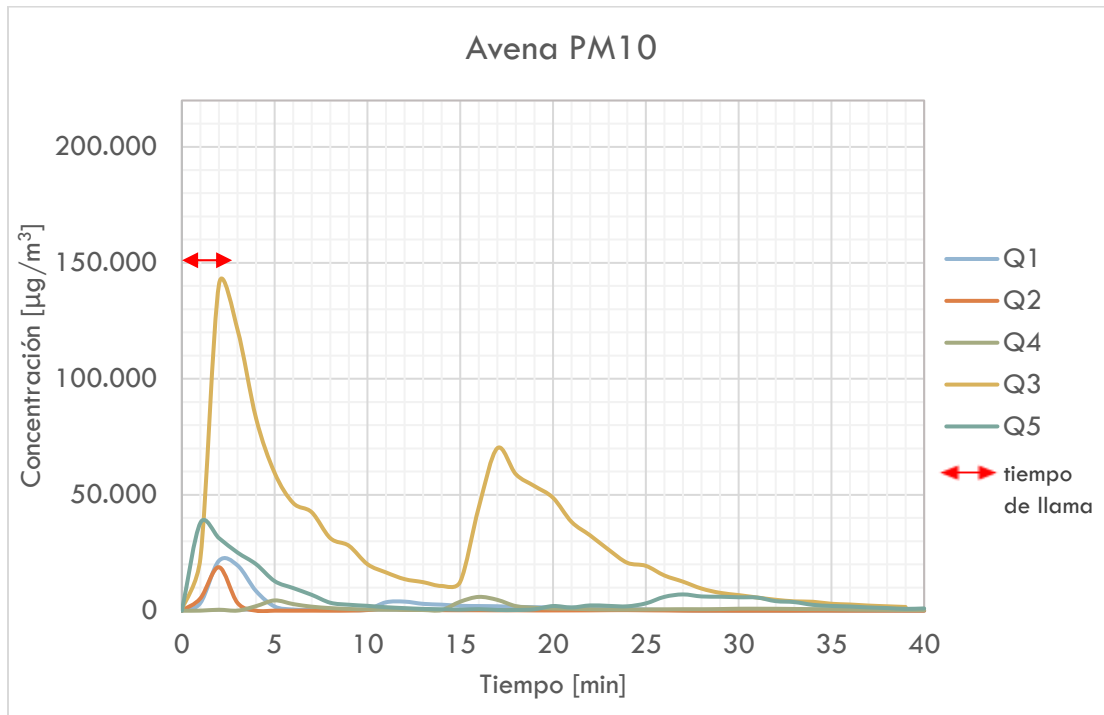


Gráfico 8.13 Emisiones en tiempo real de PM10 para pellet de avena.
Fuente: Elaboración propia.

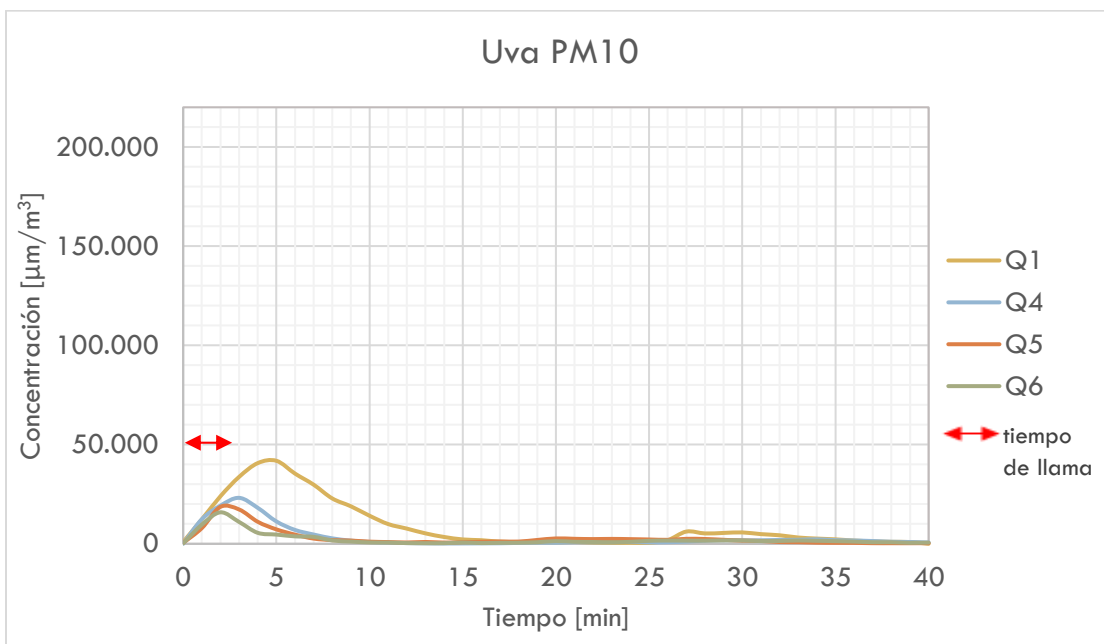


Gráfico 8.14 Emisiones en tiempo real de PM10 para pellet de uva.
Fuente: Elaboración propia.

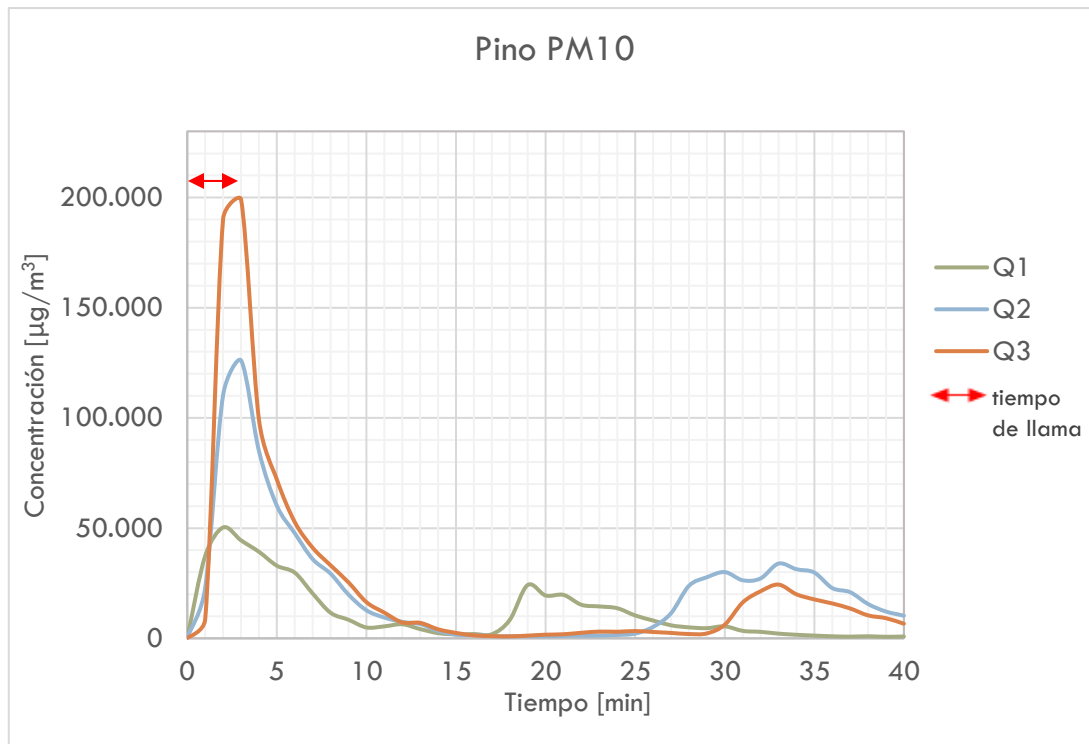


Gráfico 8.15 Emisiones en tiempo real de PM10 para pellet de pino.
Fuente: Elaboración propia.

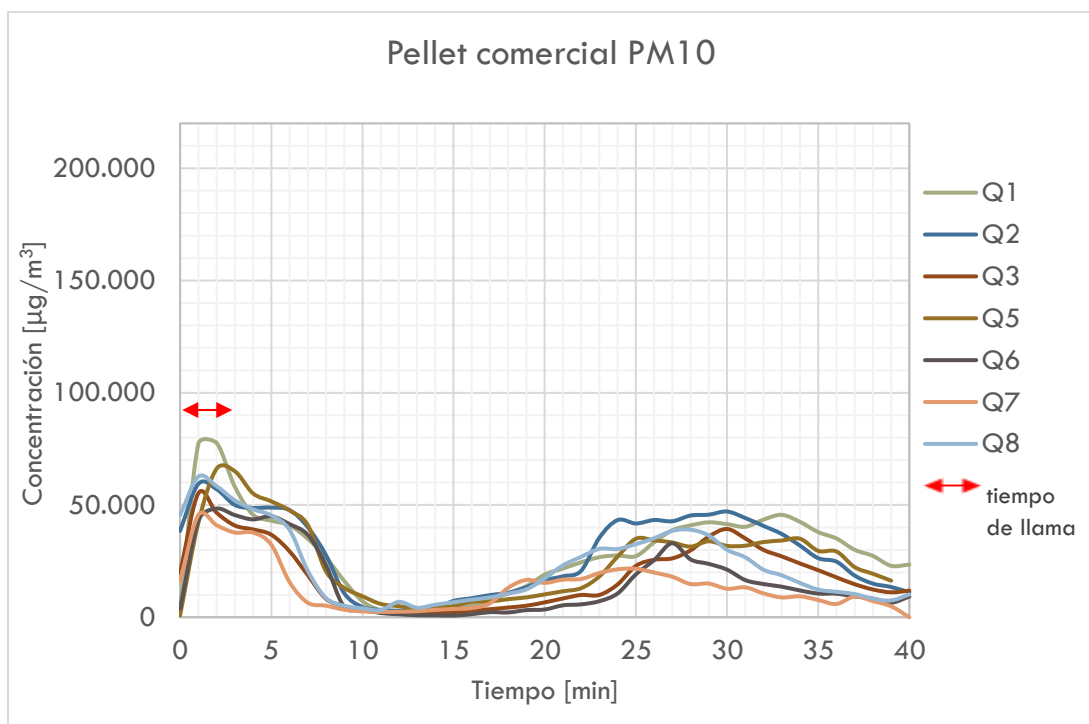


Gráfico 8.16 Emisiones en tiempo real de PM10 para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a ensayos con *pellets* de avena, se aprecia en el Gráfico 8.13 que en conjunto las quemas Q1, Q2, Q4 y Q5 resultan ligeramente diferentes en cuanto a las emisiones de PM10 en comparación con la quema Q3, donde se alcanza un máximo inicial aproximado de 140.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], y en las demás quemas con avena no se superan los 40.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Por otra parte, durante la fase humeante la quema Q3 generó un máximo local aproximado de 70.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], en cambio las quemas Q4, Q5 y Q6 no alcanzaron los 10.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Por lo tanto, se evidencia la condición *outlier* para los resultados del comportamiento en línea de las concentraciones de PM10 de la Q3.

Para el caso de los ensayos con uva, en el Gráfico 8.14 se distingue que Q1, alcanza un máximo global aproximado de emisiones en tiempo real para PM10 de 40.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] mientras que las quemas Q4, Q5 y Q6 presentan valores cercanos a 20.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. De la misma forma que ocurre para las emisiones de PM1 y PM2,5, la quema Q1 alcanza un valor máximo de PM10 aproximadamente 2 minutos después que las demás quemas. En cuanto a la fase humeante, las cuatro quemas no sobrepasaron los 10.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] como máximo de concentración local. De manera que se establece que Q1 se comporta ligeramente diferente con respecto a las otras quemas con uva para las emisiones de PM10.

Según lo referente a las quemas de *pellet* de pino, como se distingue en el Gráfico 8.15Gráfico 8.7, la quema Q3 alcanzó un máximo global aproximado de PM10 de 200.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] durante la fase de llama, mientras que la quema Q2 alcanzó valores cercanos a 130.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y la quema Q1 una concentración aproximada de 50.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en tiempo real durante esta etapa. Con respecto a la fase humeante, las tres quemas oscilaron entre 20.000 y 30.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] como máximo local, sin embargo, este valor fue alcanzado en el minuto 19 por la quema Q1, y en el minuto 33 por las quemas Q2 y Q3, similar a lo ocurrido con PM1 y PM2,5 para esta variedad de biomasa.

Con respecto a la combustión de *pellet* comercial, se observa en el Gráfico 8.16 que las concentraciones máximas en tiempo real de PM10 durante la fase de llama oscilaron entre 50.000 – 78.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], en cambio los valores máximos locales, durante la fase humeante, fluctuaron entre 20.000 y 50.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aproximadamente para las siete quemas realizadas con esta biomasa.

Con el objetivo de determinar la existencia de diferencias significativas entre las emisiones de PM10 para las diversas variedades de *pellet* ensayadas, se realizó el test de rangos múltiples, obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, debido a que los datos de las emisiones de PM10 provienen de una distribución normal, con un 95% de confianza.

En la Tabla 8.7 se presentan los resultados obtenidos para este tratamiento, siendo posible afirmar con un 95% de confianza que no existen diferencias estadísticamente significativas

entre las medias de los FE de PM10 para los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de avena y de *pellet* de pino con *pellet* comercial. Sin embargo, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE para los pares de comparación de *pellet* de uva con *pellet* de pino, de *pellet* de uva con *pellet* comercial, de *pellet* de avena con *pellet* de pino y de *pellet* de avena con *pellet* comercial, con un 95% de confianza.

Tabla 8.7 Test de rangos múltiples para FE de PM10.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Avena	4	0,34625	X
Uva	4	0,587	X
Pino	3	2,78067	X
Pellet comercial	7	3,23586	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics Centurion XVI.

8.3.1.4 Comparación PM1, PM2,5 y PM10

A continuación, en el Gráfico 8.17, se resumen los resultados de los FE de PM1, PM2,5 y PM10 para cada biomasa de manera comparativa. Se distingue que, dentro de los resultados para uva, el FE promedio de PM10 y PM2,5 resultan con el mismo valor de 0,59 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], lo cual ocurre de la misma manera con las variedades de pino y pellet comercial, con valores de 2,35 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 2,84 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente. Con respecto a las emisiones de PM1 se aprecia que equivalen a un porcentaje importante de todo el material particulado, en el caso de la avena el PM1 equivale al 91% del PM10, con respecto a los pellets de uva las emisiones de PM1 representan un 97% del PM10, para pino el PM1 equivale a un 89% del PM10 y finalmente para el pellet comercial resulta de un 98%. De manera que puede establecerse que al considerar todo el PM10 generado en los ensayos, la mayor parte de este contaminante corresponde a material particulado ultrafino (PM1), en más de un 89% para todas las quemas, lo cual se analizará más adelante, al cuantificar la cantidad de partículas nanométricas y micrométricas emitidas para 41 tamaños de diámetro distintos.

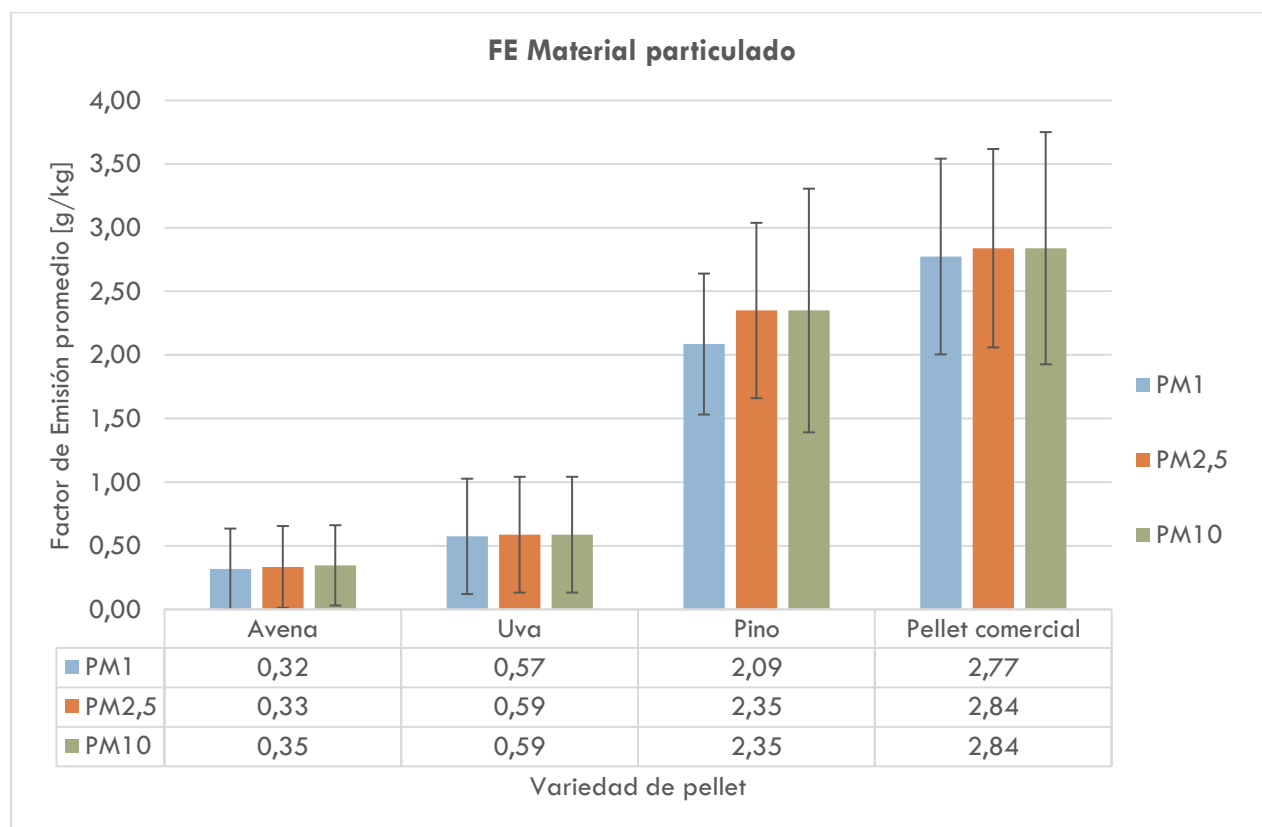


Gráfico 8.17 Comparación Factores de Emisión PM.

Fuente: Elaboración propia.

8.3.2 Emisiones de PM carbonoso

8.3.2.1 Black Carbon

En la Tabla 8.8 se detallan los resultados para los FE de BC obtenidos en cada ensayo de combustión para los tipos de biomasa en estudio. Se aprecia que la variedad de *pellet* que generó menores emisiones de BC resultó ser el *pellet* comercial, con un FE promedio de 0,027 [g/kg], en contraposición con los resultados obtenidos para PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁, donde el *pellet* comercial lideró las emisiones en comparación a los demás materiales, sin embargo, los resultados de BC para *pellet* comercial presentaron la mayor variabilidad entre sus quemas, en comparación con los FE de uva, avena y pino, con un coeficiente de variación del 56%.

En el caso de las emisiones de BC para las variedades de avena, uva y pino, resultaron en general con FE promedios relativamente similares entre sí, con valores de 0,084 [g/kg] para avena, 0,080 [g/kg] para uva y 0,081 [g/kg] para pino, además sus coeficientes de variación fueron menores que lo obtenido con *pellet* comercial. En el caso específico de los *pellets* de avena, su coeficiente de variación fue de un 13%, en contraste con los resultados de PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁, donde se obtuvo coeficientes de variación cercanos al 100% entre las quemas con esta biomasa. Para uva el coeficiente de variación respecto a las emisiones de BC fue de un 28% y para pino resultó del 3%. Es considerable destacar que la totalidad de los coeficientes de variación para los FE de BC resultan menores que para los FE de material particulado ultrafino, fino y grueso.

Tabla 8.8 Factores de Emisión BC.

Biomasa	N° Quema	BC [g_{BC}/Kg_{pellet}]	Promedio [g_{BC}/Kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{BC}/Kg_{pellet}]	Coefficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,075	0,084	0,011	13
	Q2	0,076			
	Q3	0,104			
	Q4	0,084			
	Q5	0,089			
	Q6	0,076			
Uva	Q1	0,073	0,080	0,023	28
	Q2	0,070			
	Q3	0,092			
	Q4	0,105			
	Q5	0,099			
	Q6	0,043			
Pino	Q1	0,080	0,081	0,002	3
	Q2	0,084			
	Q3	0,079			
Pellet comercial	Q1	0,031	0,027	0,015	56
	Q2	0,034			
	Q3	0,034			
	Q4	0,051			
	Q5	0,006			
	Q6	0,031			
	Q7	0,008			
	Q8	0,018			

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en el Gráfico 8.18, Gráfico 8.19, Gráfico 8.20 y Gráfico 8.21 Gráfico 8.21 se esquematiza el comportamiento del monitoreo en línea de las emisiones de BC para todas las quemas con las biomásas en estudio. Se aprecia, que equivalentemente a lo ocurrido con PM durante la fase de llama, que dura alrededor de 3 [min], al inicio del ensayo se emite un gran máximo inicial de carga contaminante, el cual desciende paulatinamente durante la fase humeante hasta alcanzar valores por debajo de los 600 [µg/m³] en todas las quemas, sin embargo, al contrario de lo que ocurre con PM, durante

la fase humeante si bien se distingue un máximo local dentro de las emisiones en todas las variedades de *pellets*, el valor alcanzado resulta bastante inferior al máximo global durante la fase de llama, representando como máximo el 35% de este valor, mientras que para PM en algunos casos el máximo local alcanzó el 60% del máximo global.

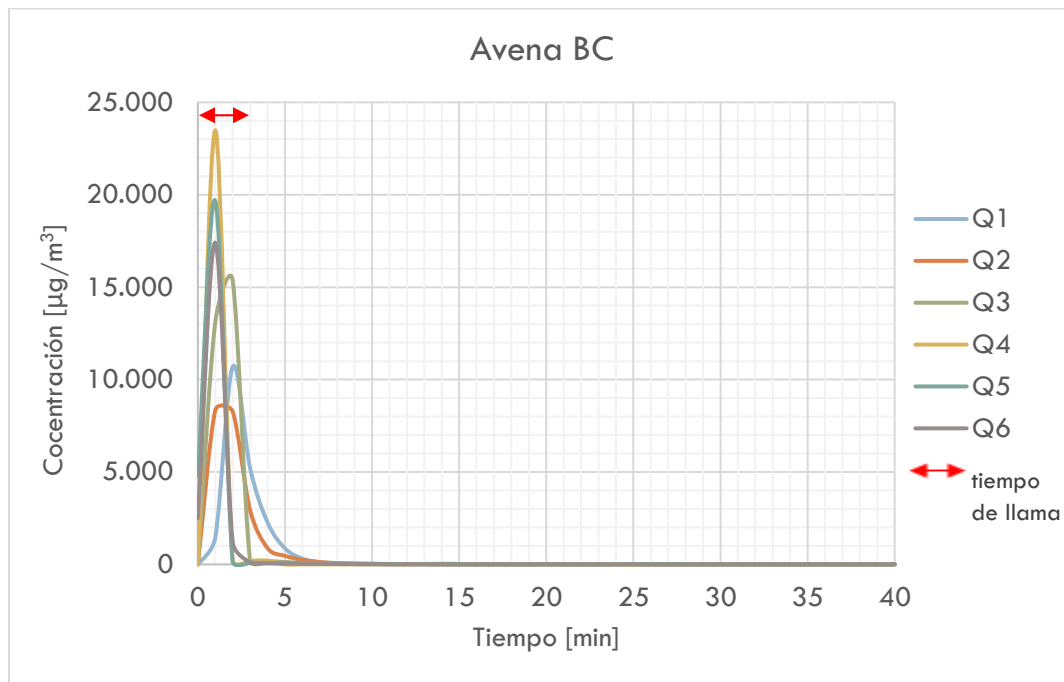


Gráfico 8.18 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de avena.
Fuente: Elaboración propia.

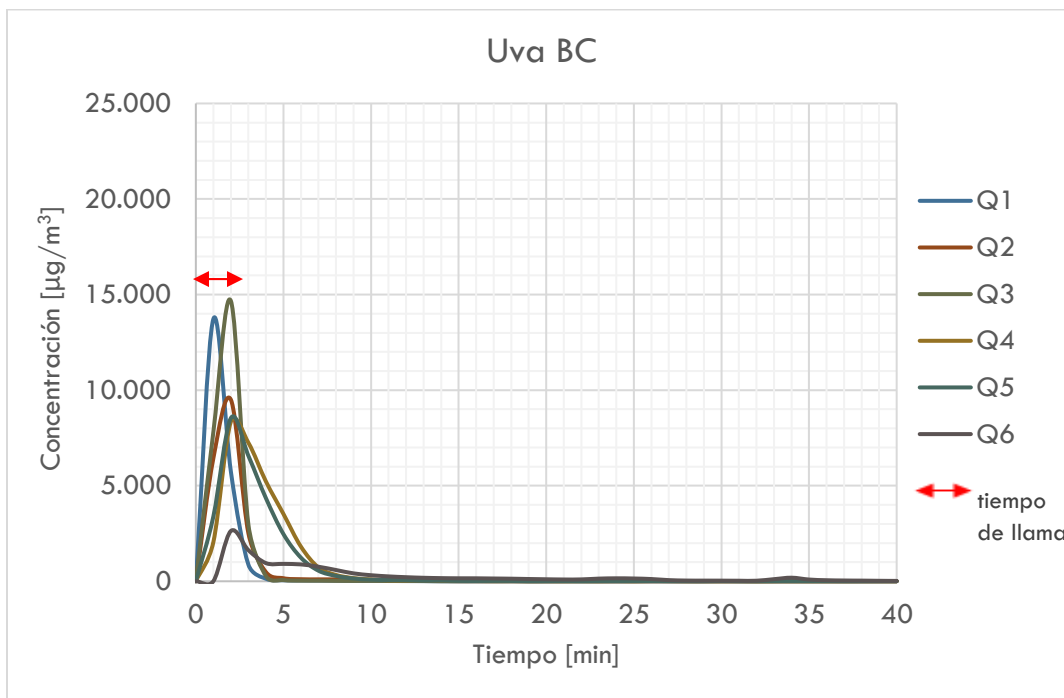


Gráfico 8.19 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de uva.
Fuente: Elaboración propia.

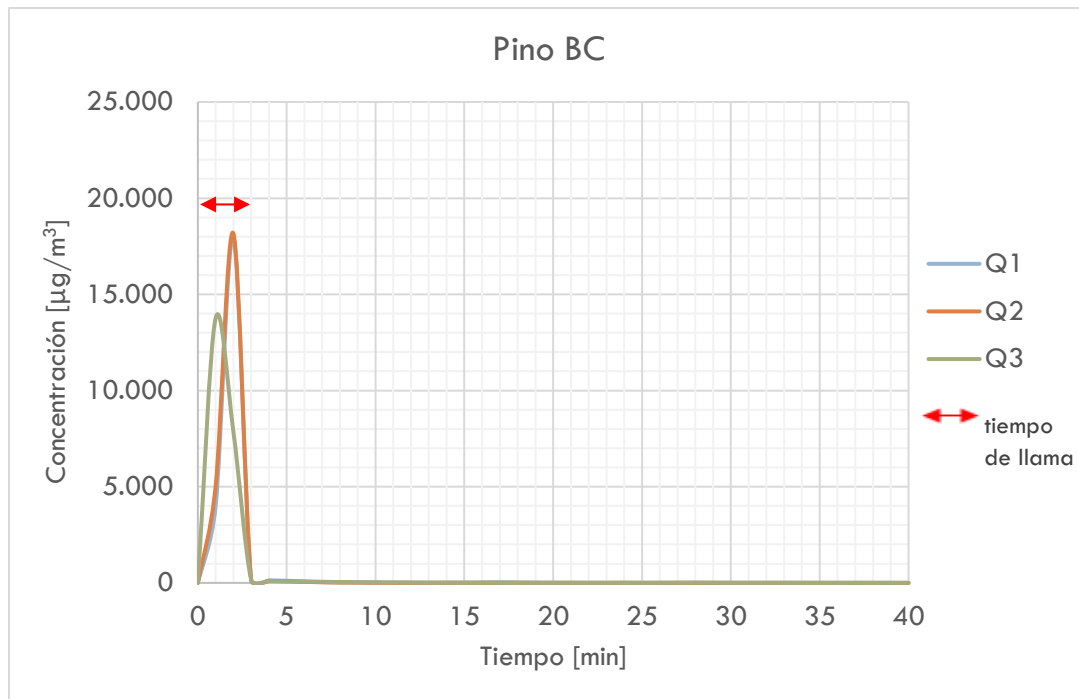


Gráfico 8.20 Emisiones en tiempo real de BC para pellet de pino.
Fuente: Elaboración propia.

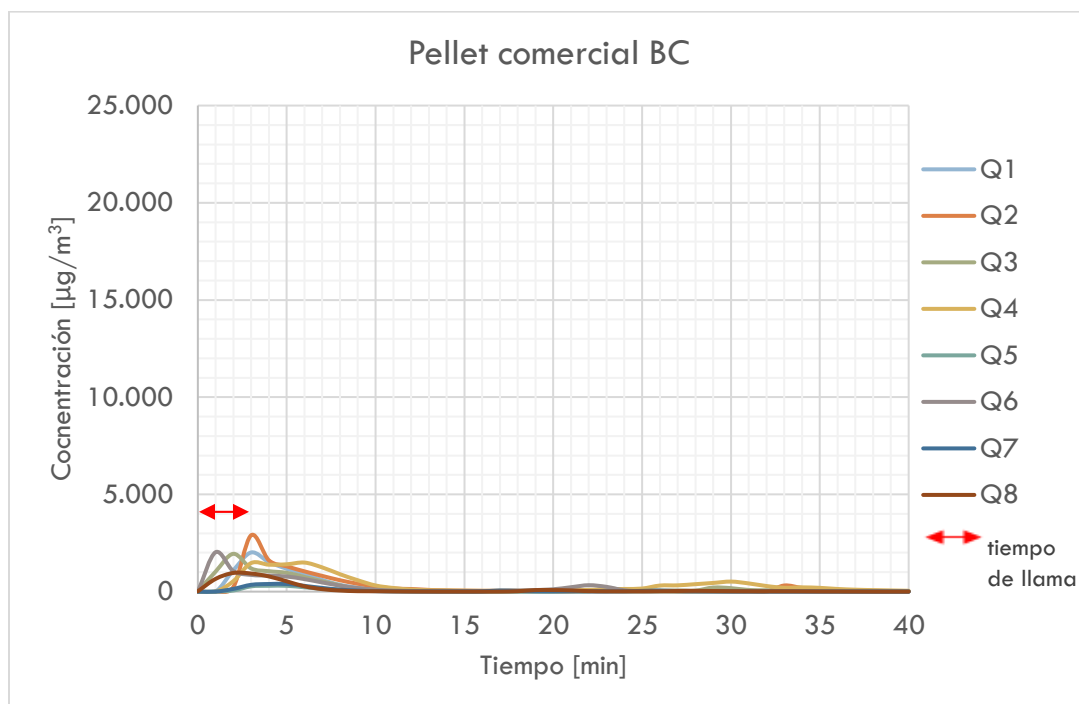


Gráfico 8.21 Emisiones en tiempo real de BC para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las quemas con avena, se aprecia en el Gráfico 8.18 que se alcanzan máximos de concentración en línea de BC que oscilan entre 8.000 – 23.000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] durante la fase de llama, siendo la quema Q4 la que alcanza el máximo valor y la quema Q2 la que alcanza el menor. Por otra parte, durante la fase humeante se distingue un máximo local solamente en la quema Q1, con un valor de 12 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], en cambio en las demás quemas con avena solo se presentan valores constantes o decrecientes.

Con respecto a las quemas con uva, en el Gráfico 8.19 se observa que los máximos de concentración en línea de BC alcanzados durante la fase de llama fluctúan entre 2.500 – 14.500 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], donde la quema Q3 alcanza el mayor de estos valores y la quema Q6 el menor. En el caso de la fase humeante, se distingue un máximo local que oscila entre 7 – 150 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para las quemas Q3, Q4, Q5 y Q6, sin embargo, esto no ocurre durante las quemas Q2 y Q3, donde no se logra distinguir un máximo local en esta fase, solamente valores constantes o en descenso.

Para la situación de las quemas con pino, como se aprecia en el Gráfico 8.20, los niveles del máximo global de BC durante la fase de llama oscilan entre 14.000 – 18.500 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aproximadamente, donde las quemas Q1 y Q2 alcanzan el máximo de estos valores, siendo relevante mencionar que los comportamientos en tiempo real de ambas quemas resultan muy parecidos, con líneas que se solapan en el Gráfico 8.20 durante prácticamente los 40 [min] que duran los ensayos, sin embargo los FE para las quemas Q1 y Q2 resultan con mayores variaciones entre sí que los resultados para las quemas Q1 y Q3, a pesar de que en apariencia se comportan de la misma manera. Con respecto a la fase humeante, solamente en la quema Q3 se distingue un máximo local de BC, con un valor de 14 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Según lo referente a la combustión de *pellet* comercial, en el Gráfico 8.21 se observa que las concentraciones máximas de BC durante la fase de llama oscilaron entre 300 – 2900 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], en cambio durante la fase humeante, se distinguen máximos locales de BC en tiempo real para todas las quemas, los cuales oscilan entre 26 – 517 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Para verificar si existen diferencias significativas entre las emisiones de BC para las distintas variedades de *pellet*, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, correspondiente al del test de rangos múltiples, obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, dado que los datos de las emisiones de BC provienen de una distribución normal, con un 95% de confianza

Los resultados de esta prueba se exponen en la Tabla 8.9, de manera que puede establecerse que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE para los *pellets* de uva, pino y avena con un 95% de confianza. No obstante, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de uva con *pellet* comercial, de pino con *pellet* comercial, y de avena con *pellet* comercial con un 95% de confianza.

Tabla 8.9 Test de rangos múltiples para FE de BC.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Pellet comercial	8	0,026625	X
Uva	6	0,0803333	X
Pino	3	0,081	X
Avena	6	0,084	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics Centurion XVI.

8.1.1.2 Brown Carbon

A continuación, en la Tabla 8.10 se detallan los resultados obtenidos para los FE de BrC en cada ensayo de combustión para todas las variedades de *pellets* en estudio, sin considerar los valores que resultaron ser atípicos en el cálculo del promedio y desviación estándar. Se aprecia que en general los valores de FE promedio para BrC entre todos los tipos de biomasa se asemejan entre sí, con valores entre 0,02 – 0,04 [g/kg]. Específicamente la variedad de biomasa que generó el menor FE promedio con un total de 0,025 [g/kg] fue el *pellet* comercial, de la misma manera que ocurrió con el BC, donde también esta variedad generó la menor cantidad de emisiones. No obstante, los resultados de BrC para *pellet* comercial presentaron una mayor variabilidad entre sus quemas, en comparación con los FE de BrC para uva y avena, con un coeficiente de variación del 17%.

En el caso de las emisiones de BrC para las variedades de avena, uva y pino, resultaron en general con FE promedios relativamente similares entre sí, con valores de 0,036 [g/kg], 0,038 [g/kg] y 0,037 [g/kg] respectivamente. Por otra parte, los coeficientes de variación para los FE de uva y pino fueron de un 23% y un 5% respectivamente, y en el caso de avena se obtuvo un coeficiente de variación del 50%, al igual que con *pellet* comercial. Resulta importante mencionar que la totalidad de los coeficientes de variación para los FE de BrC resultan menores que los coeficientes de variación obtenidos a partir de los FE de PM1, PM2,5 y PM10, al igual que ocurre con BC.

Tabla 8.10 Factores de Emisión BrC.

Biomasa	N° Quema	BC [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Promedio [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Coefficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,033	0,036	0,004	12
	Q2	0,034			
	Q3	0,078 (<i>Outlier</i>)			
	Q4	0,019 (<i>Outlier</i>)			
	Q5	0,042			
	Q6	0,034			
Uva	Q1	0,030	0,038	0,009	23
	Q2	0,030			
	Q3	0,045			
	Q4	0,049			
	Q5	0,043			
	Q6	0,030			
Pino	Q1	0,036	0,037	0,002	5
	Q2	0,039			
	Q3	0,036			
Pellet comercial	Q1	0,030	0,025	0,004	17
	Q2	0,023			
	Q3	0,023			
	Q4	0,067 (<i>Outlier</i>)			
	Q5	0,028			
	Q6	0,025			
	Q7	0,018			
	Q8	0,030			

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en el Gráfico 8.22, Gráfico 8.23, Gráfico 8.24 y Gráfico 8.25 Gráfico 8.21 se esquematiza el comportamiento en tiempo real de las emisiones de BrC para todos los ensayos con las biomásas en estudio. Se aprecia, que equivalentemente a lo ocurrido con PM y con BC, es posible distinguir en estos gráficos las diferentes etapas de la combustión. Durante la fase de llama, que dura en promedio 3 [min], al comienzo de cada quema se percibe un máximo global de contaminantes, el cual va descendiendo durante la fase humeante hasta alcanzar valores por debajo de los 500 [µg/m³] de BrC en todas las quemas, sin embargo, al contrario de lo que ocurre con PM, y de la misma forma que sucede con BC, durante la fase humeante se distingue un máximo local dentro de las emisiones en

esta etapa, sin embargo el nivel alcanzado resulta considerablemente inferior al máximo global de la fase de llama, representando como máximo el 20% de este valor, el cual se distingue dificultosamente en los gráficos, mientras que para PM en algunos casos el máximo local alcanzó el 60% del máximo global, y era perfectamente visible dentro de las representaciones gráficas.

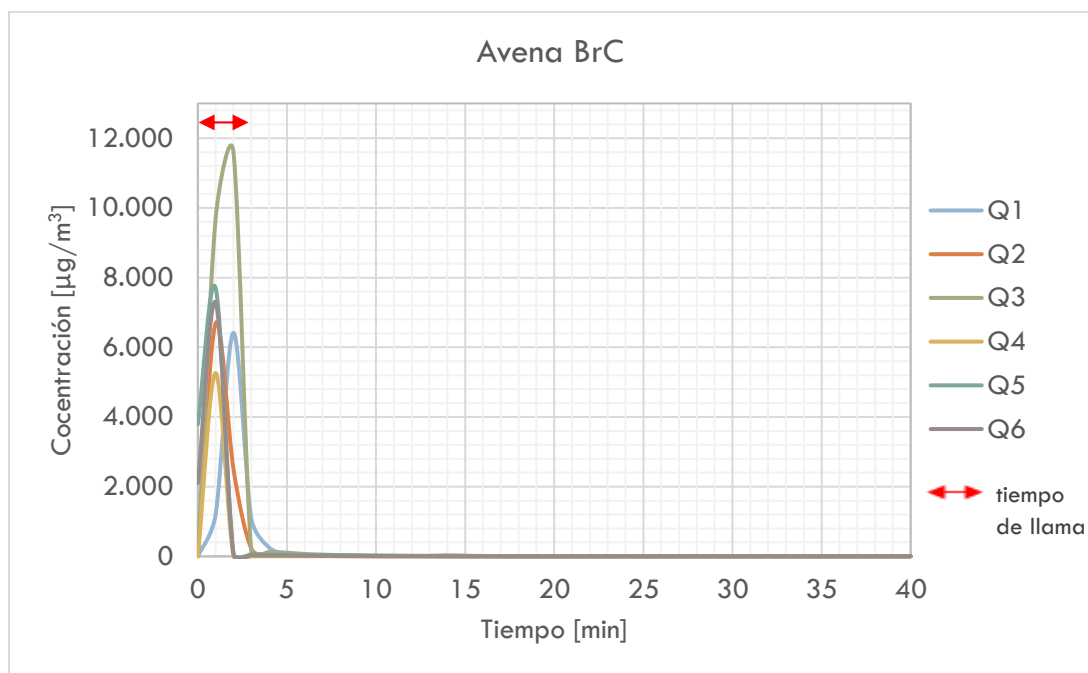


Gráfico 8.22 Emisiones en tiempo real de BrC para avena.

Fuente: Elaboración propia.

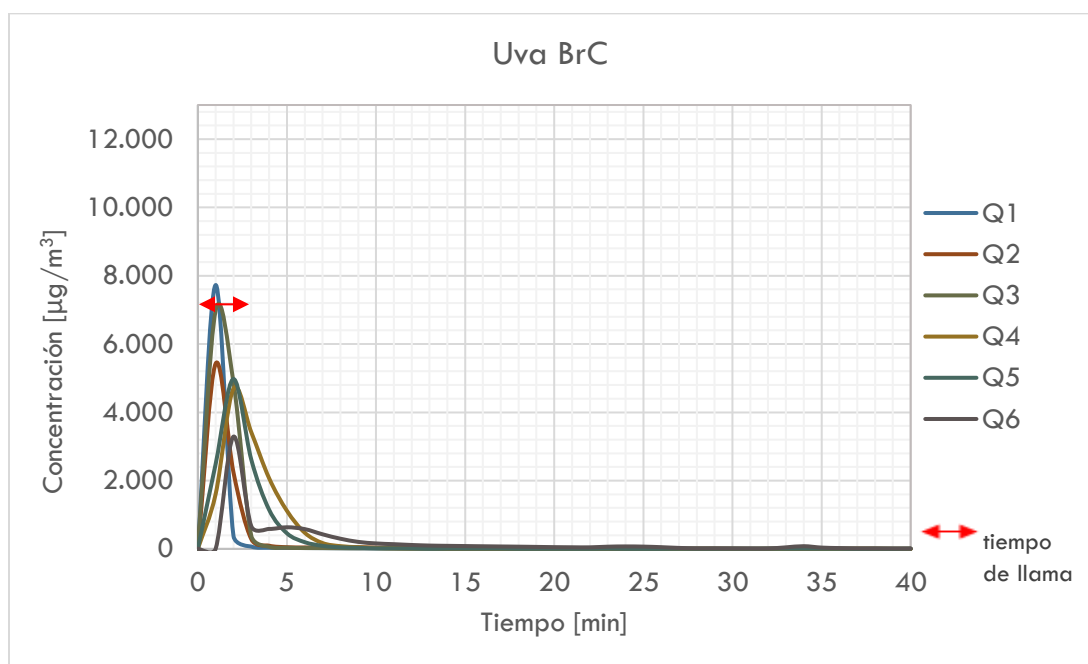


Gráfico 8.23 Emisiones en tiempo real de BrC para uva.

Fuente: Elaboración propia.

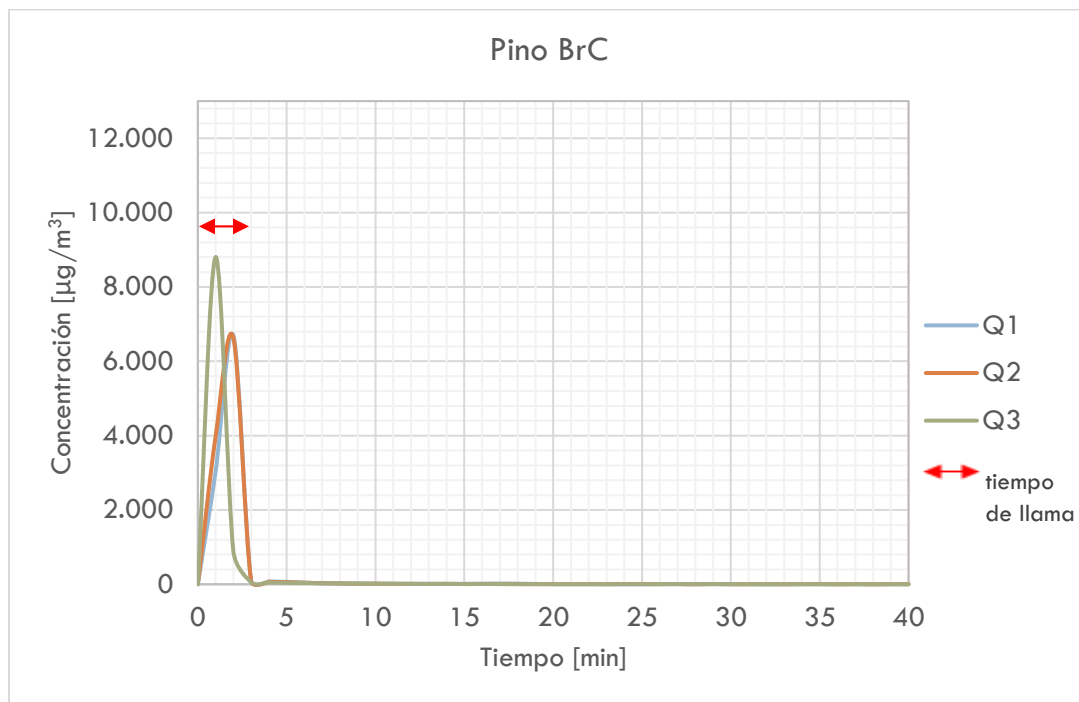


Gráfico 8.24 Emisiones en tiempo real de BrC para pino.
Fuente: Elaboración propia.

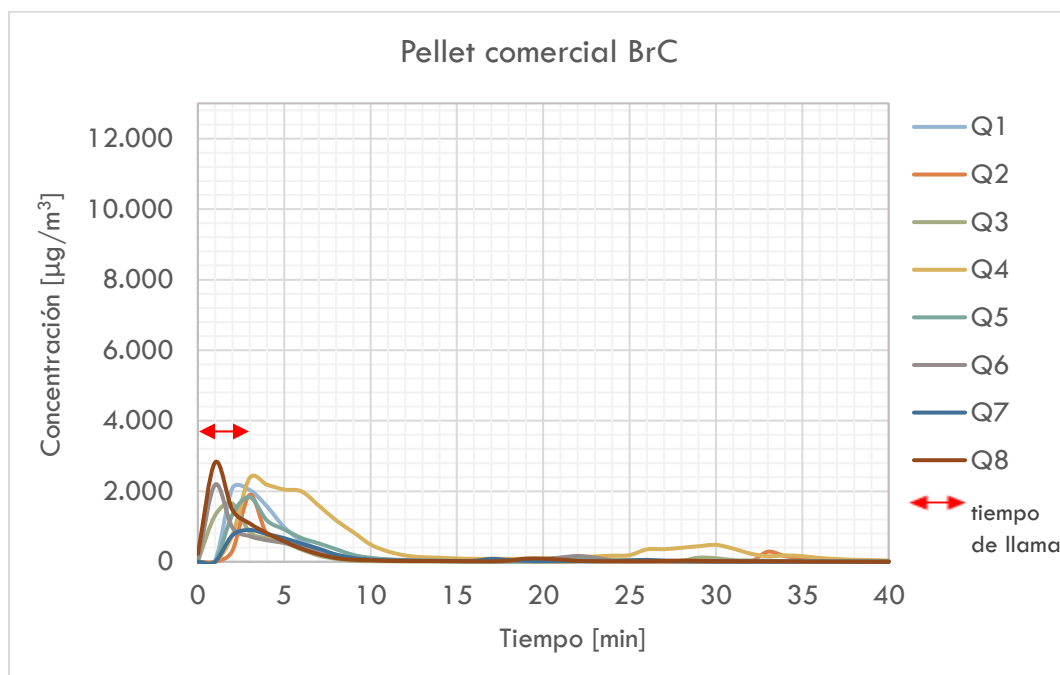


Gráfico 8.25 Emisiones en tiempo real de BrC para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los ensayos realizados con avena, se distingue en el Gráfico 8.22, Gráfico 8.21 que se alcanzaron máximos de concentración en línea de BrC que oscilan entre 5.200 – 11.800 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] durante la fase de llama, siendo la quema Q3 la que alcanza el máximo valor, a diferencia de lo ocurrido con BC, donde la quema Q4 resultó ser el máximo, la cual en este caso presenta en cambio el menor valor entre los máximos globales para las emisiones de BrC. Por otra parte, durante la fase humeante se distingue un máximo local solamente en las quemas Q1 y Q5, con valores de 8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respectivamente, mientras que en las demás quemas no se percibe un máximo, solamente una tendencia decreciente.

Para el caso de las quemas con uva, en el Gráfico 8.23 se aprecia que los máximos de concentración de BrC en tiempo real alcanzados durante la fase de llama oscilan entre 3.200 – 7.600 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], donde la quema Q1 alcanza el mayor de estos valores y la quema Q6 el menor, al igual que con BC. En el caso de la fase humeante, se distingue un máximo local que fluctúa entre 7 – 72 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para las quemas Q3, Q4, Q5 y Q6, no obstante, esto no ocurre durante las quemas Q2 y Q3, donde no se logra apreciar un máximo local durante esta fase, solamente valores constantes o en descenso.

Según lo referente a los ensayos con pino, como se aprecia en el Gráfico 8.24, los niveles máximos globales de BrC alcanzados en tiempo real durante la fase de llama oscilan entre 6.400 – 8.400 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] aproximadamente, donde la quema Q3 alcanza el mayor de estos valores, en cambio las quemas Q1 y Q2 alcanzan el menor. Resulta relevante que los comportamientos en línea de las quemas Q1 y Q2 sean muy parecidos, al igual que ocurre con los niveles de BC durante estos ensayos, con líneas gráficas que se solapan entre sí durante casi el tiempo total que duran las quemas, sin embargo, los FE para las quemas Q1 y Q2 resultan más diferentes que comparando Q1 y Q3, a pesar de que en apariencia se comportan de la misma manera. Con respecto a la fase humante, solamente en las quemas Q2 y Q3 se distingue un máximo local de BrC, con un valor de 9 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Con respecto a la combustión de *pellet* comercial en el Gráfico 8.25, se observa que las concentraciones máximas de BrC durante la fase de llama oscilan entre 900 – 2800 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], en cambio durante la fase humeante se aprecian máximos locales de BrC en tiempo real para todas las quemas, los cuales fluctúan entre 32 – 480 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Con el fin de identificar si existen diferencias significativas entre las emisiones de BrC para las diferentes variedades de pellets en estudio, se realizó el test de rangos múltiples, considerando que los datos provienen de una distribución normal con un 95% de confianza, pero fue necesario primeramente realizar una estandarización de los datos, ya que no cumplían con el supuesto del análisis de varianza.

A continuación, en la Tabla 8.11 se presentan los resultados obtenidos en este tratamiento estadístico, siendo posible afirmar que entre las medias de los FE de BrC para las quemas

con *pellets* de avena, pino, uva y *pellet* comercial no existen diferencias estadísticamente significativas entre sí, con un 95% de confianza.

Tabla 8.11 Test de rangos múltiples para FE de BrC

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Avena	4	-2,5E-10	X
Pellet comercial	7	0	X
Uva	6	0	X
Pino	3	3,33333E-10	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics Centurion XVI.

8.1.1.3 Comparación PM

Con el objetivo de comparar de mejor manera los FE de BC con los de BrC, se presenta a continuación, en el Gráfico 8.26, un esquema comparativo de ambos contaminantes, donde se distingue que para todas las variedades de *pellets* el FE promedio de BC resulta mayor que FE promedio de BrC. En el caso de la avena, el BrC representa el 43% del BC, para la uva, el BrC equivale al 48% del BC, en el caso del pino el BrC representa el 46%, y para el *pellet* comercial, el BrC equivale al 93%.

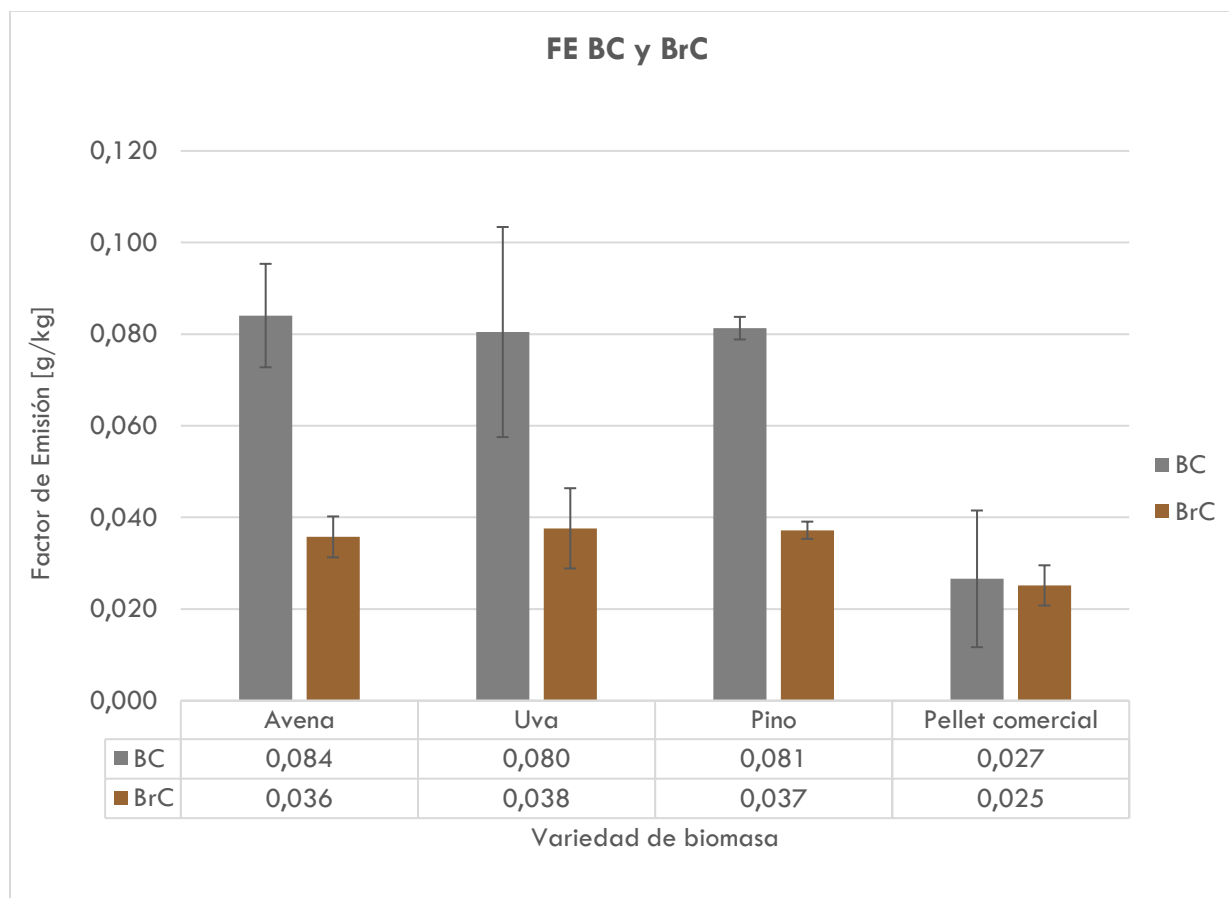


Gráfico 8.26 Comparación FE de BC con BrC.

Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar más claramente las diferencias que presentan el BC y el BrC dentro del PM_{2,5}, ya que según se indicó en el Capítulo 3.6.3, el PM_{2,5} es la fracción más fina de PM contemplada en la legislación chilena, por lo tanto, se elaboraron esquemas que reflejan las relaciones entre estos contaminantes, representados en el Gráfico 8.27. Se aprecia que para los ensayos con *pellets* de avena las emisiones de BC y BrC representan un 25% y un 11% del PM_{2,5}, proporciones mayores que lo ocurrido con los otros tipos de biomasa, ya que en el caso de los *pellets* de uva el BC y el BrC equivalen al 14% y 6 % respectivamente,

en cambio para los *pellets* de pino y *pellet* comercial, el BC y el BrC equivalen a menos del 5% del PM_{2,5}.

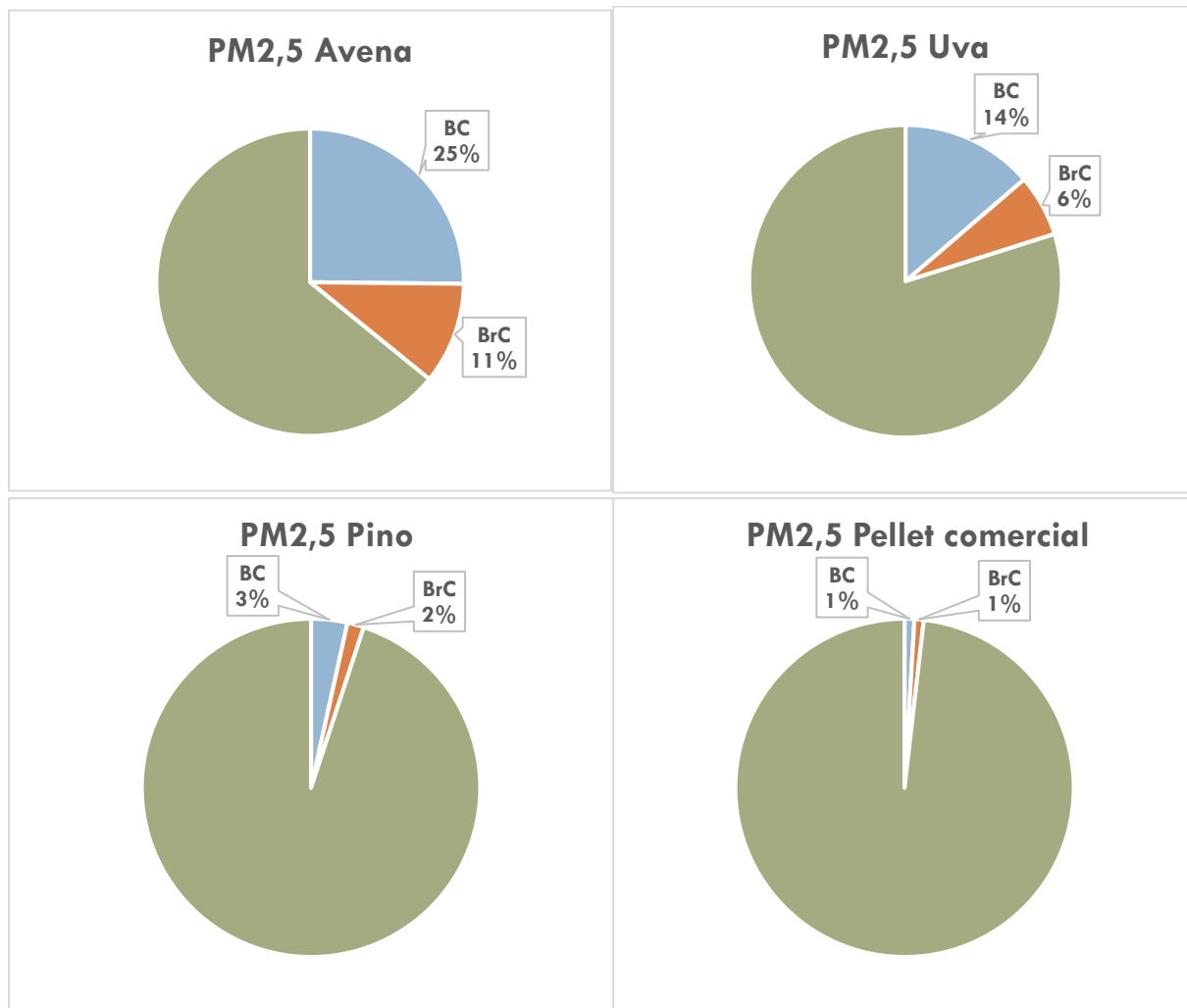


Gráfico 8.27 Porcentajes de BC y BrC en el PM_{2,5}.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, para contrastar gráficamente las emisiones de BC, BrC y PM se elaboró el Gráfico 8.28 a partir todos los FE promedios para material particulado, ya sea ultrafino, fino, grueso y carbonoso. Se distingue que el BC y BrC resultan considerablemente menores que las emisiones de PM1, PM2,5 y PM10 para todos los ensayos de combustión. Debido a que tanto BC como BrC representan y son parte del material particulado ultrafino, es decir, poseen diámetros menores 1 μm , ya que según Solaun et al. (2014) el BC presenta diámetros que oscilan entre 0,1 a 0,5 μm y además Pósfai et al. (2004) y Chakrabarty et al. (2010) sugieren que el BrC fluctúa entre 0,03 y 0,5 μm , por lo tanto se comparará el valor de los FE de estos contaminantes con el FE de PM1. Se establece entonces que, para el caso de la avena el FE de BC representa el 26% del PM1 emitido, y el BrC equivale al 11%. Con respecto a las emisiones de uva, el BC equivale al 14% del PM1 y el BrC representa el 6,7%. En el caso del pino, el BC constituye el 3,9% de las emisiones de PM1, y el BrC representa el 1,8%. Finalmente, con respecto al *pellet* comercial, el BC equivale al 0,97% del FE promedio de PM1, y el BrC representa el 0,90%.

Resulta relevante mencionar que el *pellet* comercial presenta las mayores emisiones tanto para PM1, PM2,5 y PM10, pero a la vez presenta las menores emisiones para BrC y BC comparado con las demás variedades de biomasa.

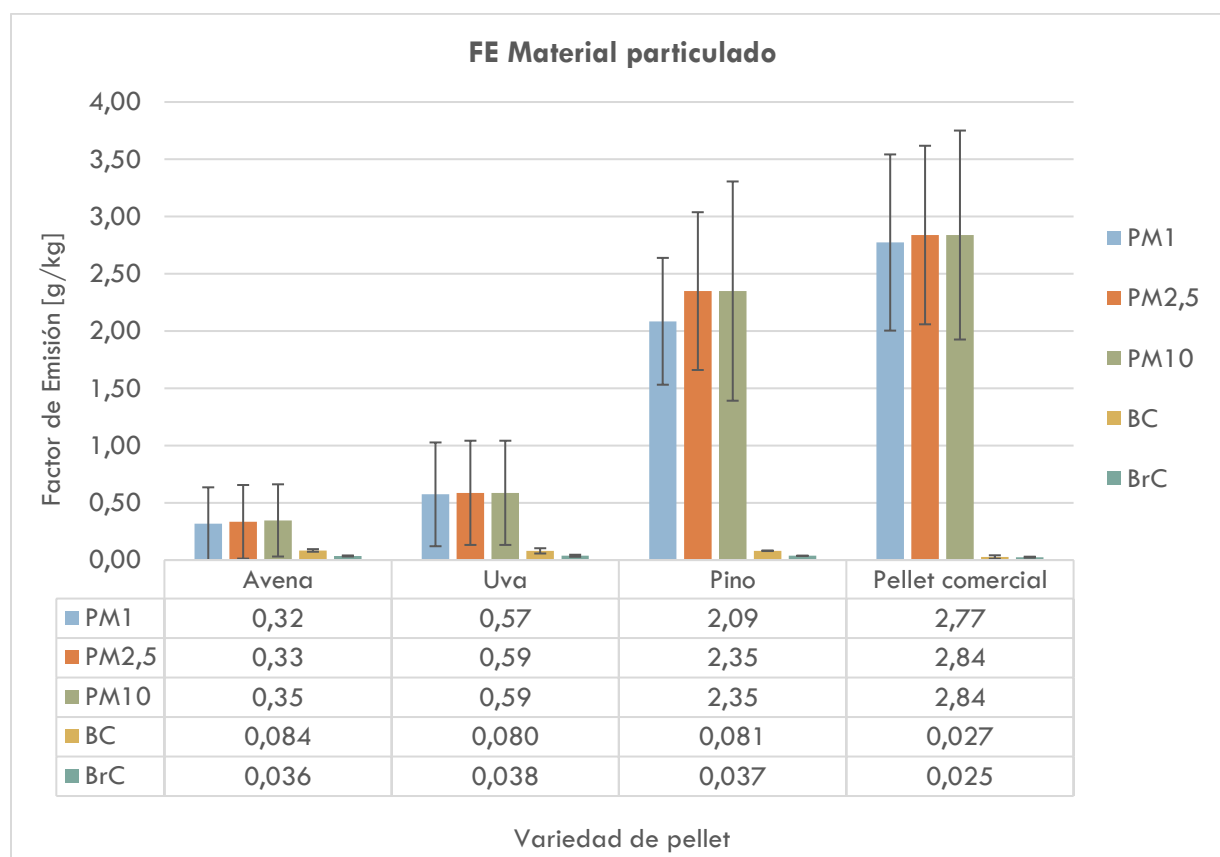


Gráfico 8.28 Comparación FE de BC, BrC y PM.

Fuente: Elaboración propia.

8.3.3 Cantidad de partículas

Los resultados obtenidos para la cantidad de partículas totales emitidas, tanto nanométricas como micrométricas, pertenecientes al rango entre 0,013 – 34 [μm] para 41 tamaños diferentes, se resumen en el Gráfico 8.29 y en la Tabla 8.12. Respecto a las mediciones de partículas ocurre lo mismo que en el caso de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀, ya que el equipo de monitoreo Espectrómetro Grimm (AR –2 y AR-3) es el encargado de detectar todas las partículas presentes, por lo que en la quema Q6 con avena, en las quemas Q2 y Q3 con uva y en la quema Q4 con *pellet* comercial, no fue posible obtener un FE debido a que el equipo de monitoreo dejó de medir durante esas ocasiones.

Tabla 8.12 Factores de Emisión cantidad de partículas.

Biomasa	N° Quema	BC [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Promedio [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{BrC}/Kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	1,30E+13	3,53,E+13	3,73,E+13	106
	Q2	1,16E+13			
	Q3	6,58E+14 (<i>Outlier</i>)			
	Q4	9,24E+11			
	Q5	6,76E+13			
	Q6	8,32E+13			
Uva	Q1	9,74E+13	2,49,E+13	4,83,E+13	194
	Q2	-			
	Q3	-			
	Q4	9,34E+11			
	Q5	7,79E+11			
	Q6	6,10E+11			
Pino	Q1	2,65E+14	3,81,E+14	1,14,E+14	30
	Q2	3,86E+14			
	Q3	4,92E+14			
Pellet comercial	Q1	7,51E+12	7,05,E+12	2,38,E+12	34
	Q2	9,86E+12			
	Q3	5,49E+12			
	Q4	-			
	Q5	9,48E+12			
	Q6	5,04E+12			
	Q7	3,62E+12			
	Q8	8,34E+12			

Fuente: Elaboración propia.

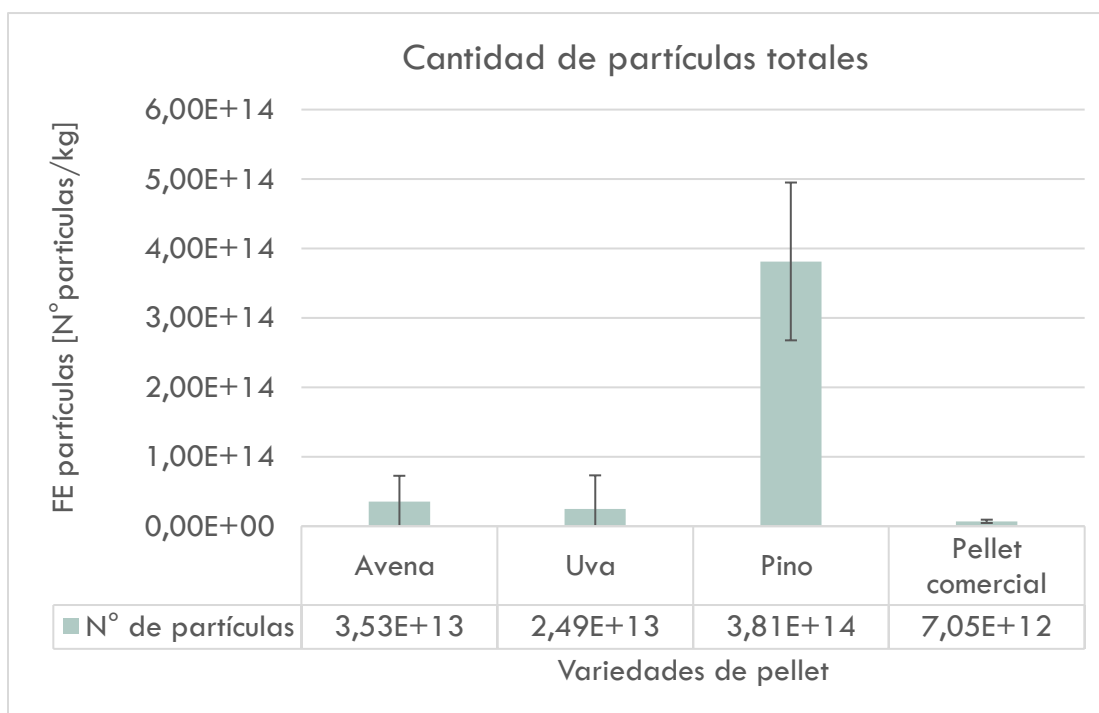


Gráfico 8.29 FE de cantidad de partículas totales.

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia entonces en el Gráfico 8.29, que la variedad de pino resulta con el FE promedio mayor para el número de partículas en comparación con las demás variedades de biomasa, con una cantidad de $3,81 \cdot 10^{14}$ [N° de partículas/kg], cuyo coeficiente de variación resulta también menor que los obtenidas para las demás biomásas, con un valor del 30%.

Por otra parte, la avena resulta ser la segunda variedad de biomasa que emite mayor cantidad de partículas, con un total de $3,53 \cdot 10^{13}$ [N° de partículas/kg], presentando además un elevado coeficiente de variación, que corresponde a 109%.

Con respecto a las emisiones de uva, se observa que equivalen a un total de $2,49 \cdot 10^{13}$ [N° de partículas/kg], presentando además un coeficiente de variación mayor con respecto a todas las demás biomásas, el cual resulta del 194%.

Para el caso de las emisiones de partículas durante los ensayos de *pellet* comercial, se aprecia que corresponden a un total de $7,05 \cdot 10^{12}$, siendo la variedad de biomasa que presenta menores emisiones para este contaminante, sin embargo es importante considerar que durante los ensayos con *pellet* comercial el equipo de monitoreo se encontraba con un desperfecto en su capacidad para determinar las partículas nanométricas, es decir el Espectrómetro láser Grimm con NanoSizer modelo 1.365 no se encontraba operando adecuadamente, de manera que la emisión total de partículas para *pellet* comercial puede estar subestimada, debido a que el equipo de medición solamente fue capaz de detectar

las partículas micrométricas presentes dentro del rango 0,265 – 34 [μm] para 31 canales de medición. Si bien solamente se perdió la medición en 10 canales, estos resultan sumamente importantes, como se explicará a continuación, debido a que en ese rango es donde se concentra generalmente la mayor cantidad de partículas en el caso de los ensayos de combustión. En general, los FE para *pellet* comercial resultaron con una baja variabilidad en contraste con lo obtenido para avena y uva, presentando un coeficiente de variación del 34%.

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas respecto a los FE del N° de partículas para todas las variedades de biomasa, se llevó a cabo el Test de Kruskal-Wallis, considerando que los datos analizados no provienen de una distribución normal con un 95% de confianza.

En el Gráfico 8.30 se exponen los resultados obtenidos para este tratamiento, siendo posible afirmar que entre las medianas de los FE de la cantidad de partículas para uva y avena no existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza, lo cual también ocurre en el caso de las medianas de los FE para uva y *pellet* comercial. En cambio, entre las medianas de los FE de pino con avena, de pino con uva, y de pino con *pellet* comercial, sí existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza.

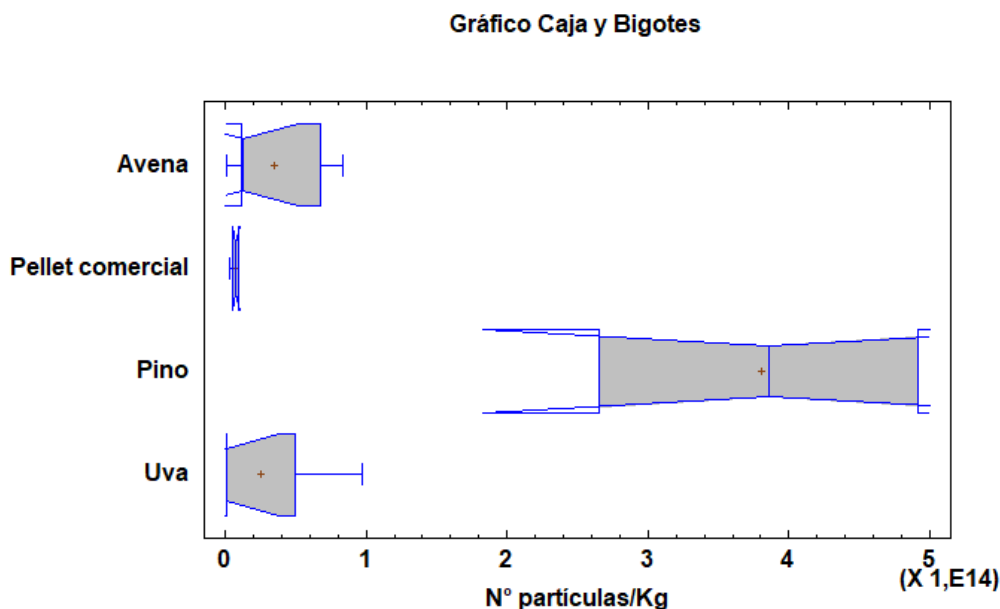


Gráfico 8.30 Gráfico de cajas y bigotes para los FE del N° de partículas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, el Gráfico 8.31 se presenta la distribución de la cantidad de partículas en relación con su diámetro para cada tipo de biomasa ensayada entre en rango 13 – 900 [nm]. A pesar de que el equipo puede medir hasta 3400 [nm], en el Gráfico 8.31 no se consideró el rango de tamaños 900 – 34000 [nm] debido a que los valores de las cantidades de partículas al ser tan bajos, en el gráfico solamente se apreciaban como una barra muy cercana al eje horizontal, por lo que no aportaban mayor información.

Se aprecia entonces, que en general las emisiones se concentran en dos focos, en torno a 60 [nm] y a 375 [nm], que equivalen al máximo global y al máximo local respectivamente de la gráfica describe la cantidad de partículas, para todas las biomásas en estudio, excepto para *pellet* comercial, del cual solamente fueron medidas las partículas mayores a 265 [nm]. Se determina entonces que la distribución que presenta la cantidad de partículas con respecto a su tamaño se comporta según lo esperado teóricamente de acuerdo con la Figura 3.10 proporcionada por la EPA (1996) en el informe “Air Quality Criteria for Particulate Matter”, y de acuerdo con los experimentos realizados por Whitby (1978), identificándose en primera instancia, de forma cualitativa, dos de las modas típicas en las cuales se distribuye el material particulado, la moda Aitken y la moda de acumulación.

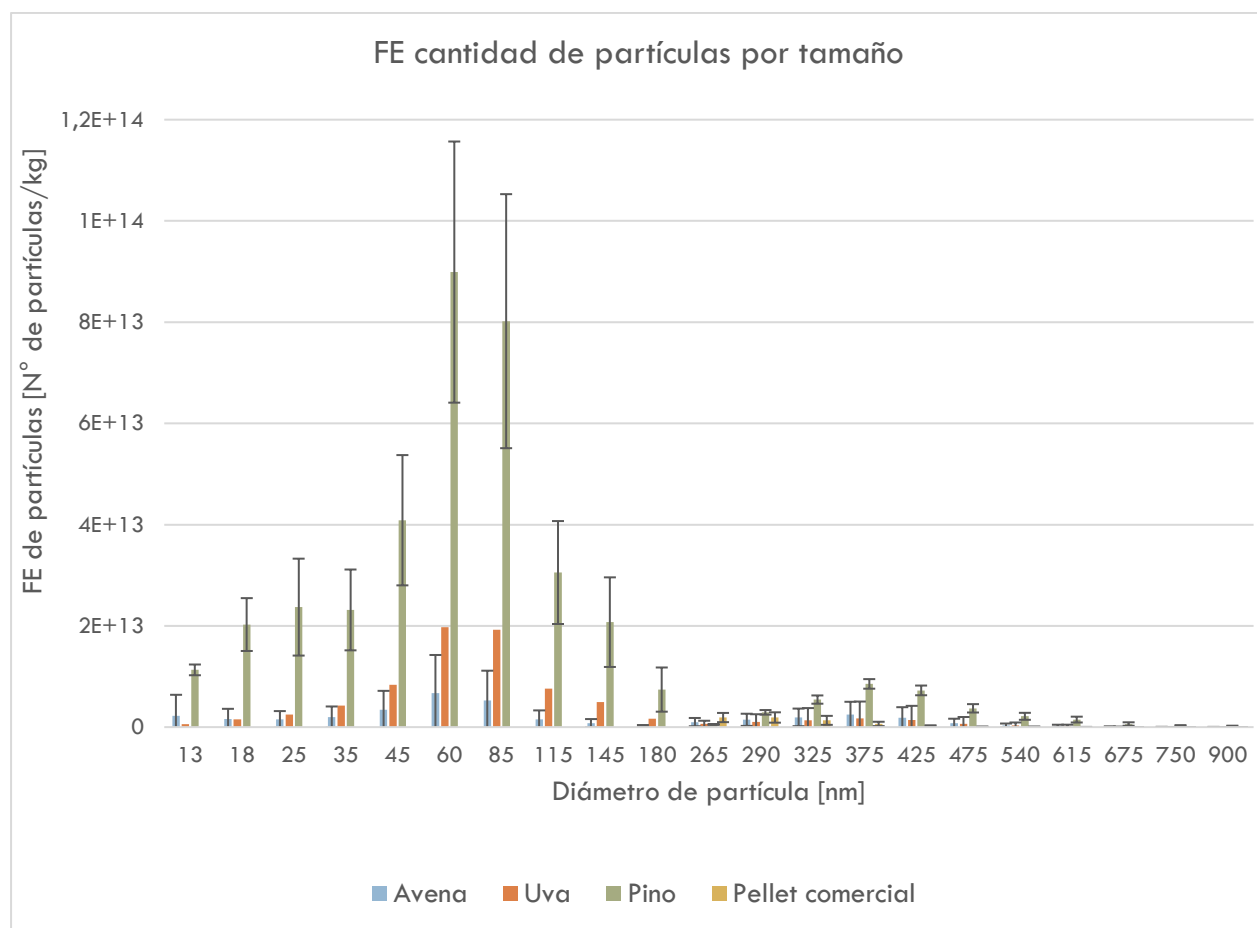


Gráfico 8.31 Distribución FE de cantidad de partículas.

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar de manera cuantitativa las partículas correspondientes a las diferentes modas típicas de distribución, se expone en la Tabla 8.13 el criterio de tamaño para su clasificación según la EPA (1996).

Tabla 8.13 Tamaño de partículas referente a las modas.

Moda	Tamaño
Nucleación	< 0,02 [μm]
Aitken	0,02 – 0,1 [μm]
Acumulación	0,1 – 1 [μm]
Gruesa	> 1 [μm]

Fuente: Elaboración propia con información de Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA. Vol. 1 (EPA, 1996).

A continuación, en el Gráfico 8.32, se presentan las líneas de tendencia que siguen las partículas emitidas, donde se logran distinguir las modas de nucleación, Aitken y acumulación, excluyendo a la moda gruesa debido a que presenta valores que no alcanzan a distinguirse gráficamente. Por lo tanto, se establece que el máximo global identificado anteriormente corresponde a la moda Aitken, y el máximo local, a la moda de acumulación. Con respecto a los resultados obtenidos para pino, que presenta mayores emisiones con respecto a uva y avena, se aprecia que el máximo FE promedio alcanzado en la moda Aitken, específicamente para el tamaño 60 [nm], equivale a $9 \cdot 10^{13}$ [N° de partículas/kg], mientras que el máximo alcanzado en la moda de acumulación, en el tamaño 375 [nm], corresponde a $5,4 \cdot 10^{12}$ [N° de partículas/kg].

Para el caso de la avena, el máximo alcanzado en la moda Aitken equivale en promedio a $1,9 \cdot 10^{13}$ [N° de partículas/kg], mientras que el máximo alcanzado en la moda de acumulación corresponde a $1,9 \cdot 10^{12}$ [N° de partículas/kg].

Según lo referente a los resultados obtenidos con uva, el máximo alcanzado en la moda Aitken equivale en promedio a $6,7 \cdot 10^{12}$ [N° de partículas/kg], el cual solamente se midió para una quema (Q1), ya que el equipo de monitoreo presentó problemas. Mientras que el máximo alcanzado en la moda de acumulación para uva corresponde a $1,7 \cdot 10^{12}$ [N° de partículas/kg].

Con respecto a las emisiones de *pellet* comercial, se determina que a los 290 [nm] ocurre un máximo de emisión de $1,9 \cdot 10^{12}$ [N° de partículas/kg], sin lograr identificarse gráficamente alguna moda típica en su comportamiento, considerando que no se midieron las emisiones en 10 canales.

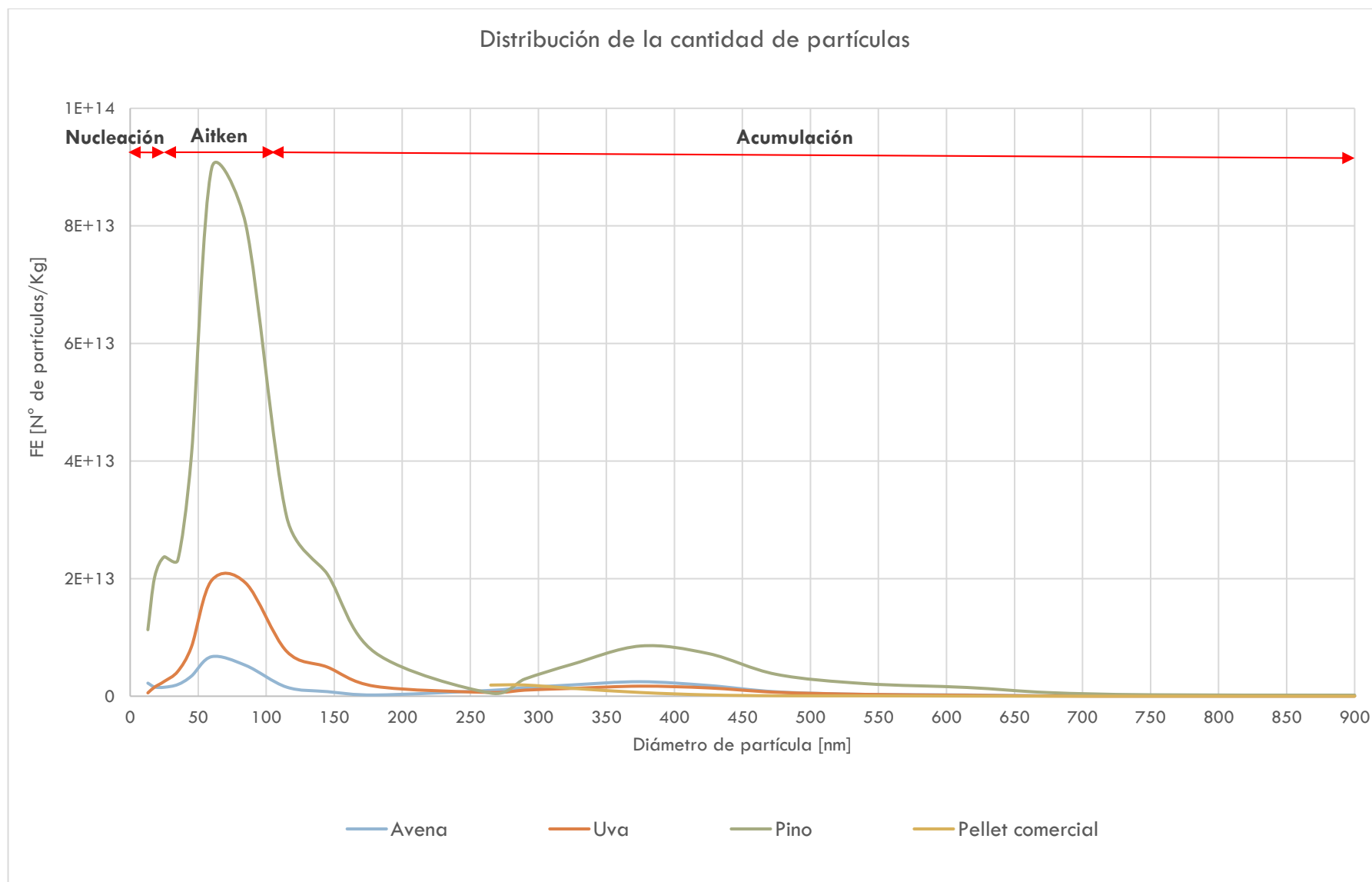


Gráfico 8.32 Cantidad de partículas por tamaño.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el Gráfico 8.33 se esquematiza de manera comparativa la cantidad y el porcentaje de emisión de partículas para las diversas modas de distribución de cada biomasa. Con respecto a la moda gruesa, se aprecia que equivale a un porcentaje mínimo de la totalidad de las partículas, en el caso de los resultados para *pellets* de avena, la moda gruesa equivale al 0,05% del total, para uva equivale al 0,01%, y para pino y pellet comercial, representa un 0,04% del total.

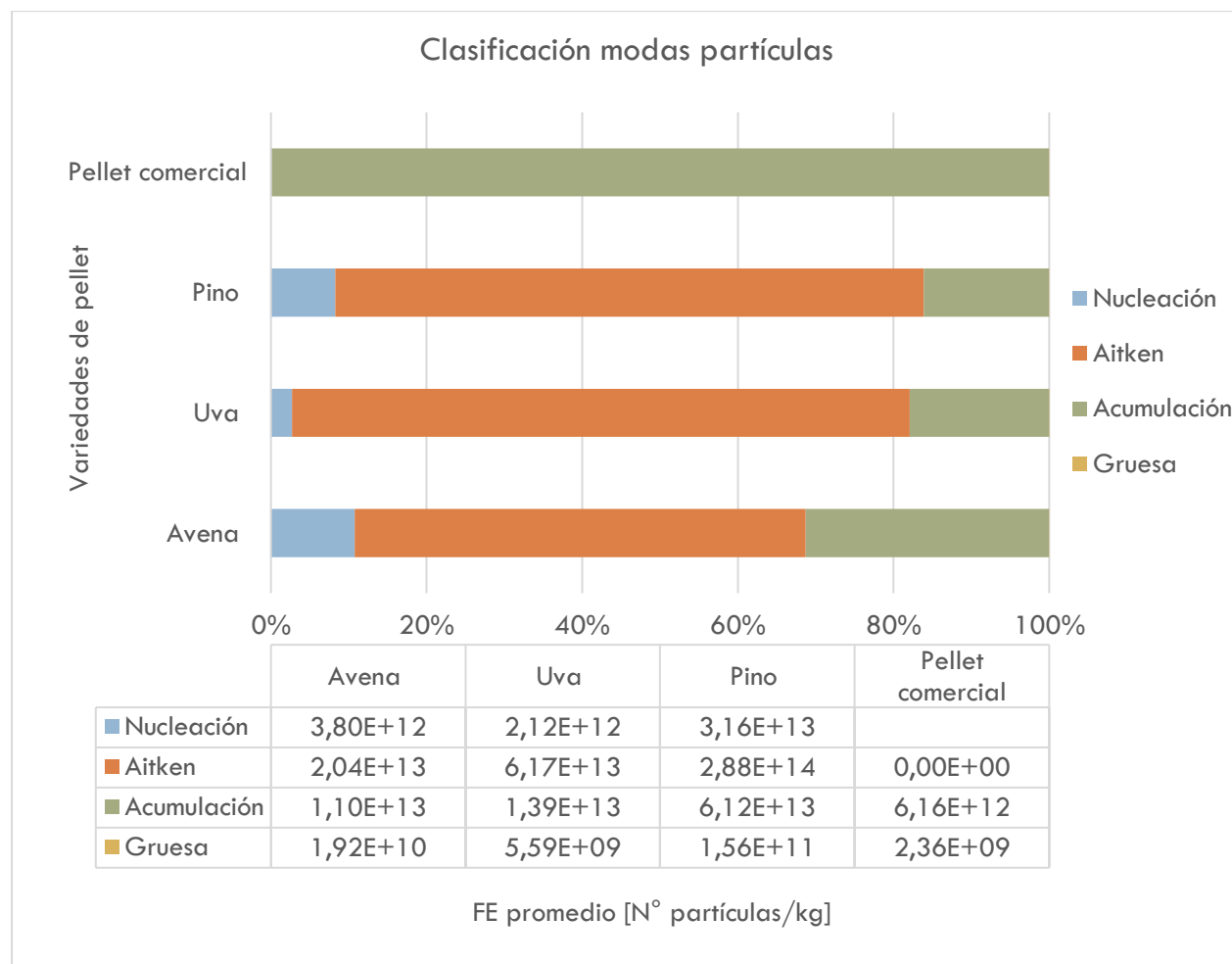


Gráfico 8.33 Clasificación partículas según tamaño.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la moda de nucleación también representa porcentajes bajos con respecto al total de emisiones en comparación con las demás modas, sin embargo, estos resultados pueden estar subestimados para todas las quemas, debido a que el equipo de medición Espectrómetro Grimm (AR – 2 y AR – 3) solamente presenta 2 canales para detectar las partículas pertenecientes a la moda de nucleación, en 13 y 18 [nm], mientras que para las modas Aitken, acumulación y gruesa presenta 6, 13 y 20 canales respectivamente. De todas formas, se calculó la proporción que la moda de nucleación representa con respecto al total.

Para los resultados de avena, la moda de nucleación equivale al 11%, para uva representa el 3%, y para pino equivale al 8% del total de emisiones.

Con respecto a la moda de acumulación, se aprecia que equivale a un porcentaje mayor del total de emisiones de partículas en comparación con la moda de nucleación, y corresponde en el caso de la avena al 31% del total, para uva equivale al 18%, y para pino representa el 16%. Respecto al pellet comercial, resulta un caso especial debido a que para esta variedad solamente fueron medidas partículas dentro de la moda de acumulación y gruesa, de manera que los resultados para la moda de acumulación se encuentran sobreestimados, y equivalen al 99,96% de las emisiones totales generadas por el pellet comercial.

Finalmente, se distingue que la moda Aitken representa un porcentaje importante del total de emisiones para todas las biomásas, sin considerar los resultados para *pellet* comercial, donde no que no midieron estas partículas. En el caso de los resultados para avena, la moda Aitken equivale a un 58%, para uva representa un 79% y para pino equivale a un 76% del total de partículas medidas.

Por lo tanto, puede establecerse que la cantidad de partículas obtenidas en las emisiones para las quemas de avena, uva y pino, se ven representadas principalmente por la moda Aitken en primer lugar, y por la moda de acumulación en segundo lugar, lo cual coincide con lo esperado teóricamente, debido a que las partículas de la moda Aitken de origen primario, corresponden a material carbonoso originado en procesos de combustión (Matter, Siegmann y Burtcher, 1999), lo cual resulta razonable ya que se han estado realizando quemas de biomasa en esta experimentación.

Por otra parte, las partículas presentes en la moda de acumulación se forman como consecuencia del crecimiento de partículas de la moda Aitken mediante diversos mecanismos (Mészáros, 1993), por lo que resulta razonable que estén presentes dentro de las emisiones de los ensayos, ya que existe una gran cantidad de partículas de la moda Aitken que potencialmente pueden transformarse en moda de acumulación.

Resulta importante mencionar, que la baja cantidad de material particulado correspondiente a la moda gruesa resulta coincidente con lo esperado teóricamente, ya que la moda gruesa se representa principalmente partículas formadas mediante fragmentación mecánica (Harrison y Pio, 1983; Querol et al., 2003), lo cual no es el caso de esta experimentación.

8.3.4 Evaluación del impacto del recambio de calefactores en las emisiones de PM

Dado que el Ministerio del Medio Ambiente ha promulgado el Programa de Recambio de Calefactores para disminuir las emisiones de contaminantes generados a partir de la combustión residencial de leña en condiciones poco eficientes (MMA, 2018a), es que se evaluará a continuación el impacto en las emisiones de material particulado, si es que todos o una parte de los equipos a leña existentes en el país se reemplazaran por estufas a *pellet*, donde se queme ya sea pellet comercial, o aquellos *pellets* conformados a partir de residuos de la industria agrícola y forestal estudiados en esta memoria, con el fin de evaluar posteriormente la introducción de estas biomásas al mercado nacional como producto sustituto al pellet comercial, y finalmente determinar si las emisiones generadas cumplen con la normativa vigente, establecida en el Decreto Supremo N°39 (2012), el cual determina los límites de emisión de material particulado para los artefactos nuevos que combustionen o puedan combustionar leña o pellet de madera y que presenten una potencia térmica nominal menor o igual a 25 [kW], cuyos límites permitidos se detallaron en la Tabla 3.14 del Capítulo 3.6.

A continuación, en la Tabla 8.14 se detalla el consumo anual de combustible por parte sector residencial para todas las regiones del país y además las horas anuales de uso, datos que serán necesarios para obtener una tasa de emisión anual.

Tabla 8.14 Consumo anual de combustible y horas de uso del sector residencial.

Regiones	Consumo anual de combustible (CT) [kg/año]	Horas anuales de uso (H) [h/año]
Z. Norte	436	521
V – Valparaíso	1190	1.505
VI – O’Higgins	1586	1.937
VII – Maule	1414	1664
VIII – Biobío	2107	1.801
IX – Araucanía	2913	2643
X – Los Lagos	5214	4.369
XI – Aysén	7003	5371
XII – Magallanes	11980	7.669
RM	1691	2008
XIV – Los Ríos	5404	4.020
TOTAL	40.938	33.508

Fuente: Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Teniendo en consideración la información de la tabla anterior, además de los resultados obtenidos en los ensayos de combustión realizados, es posible calcular la tasa de emisión (TE) para el PM dentro de todas las regiones del país, aplicando el procedimiento descrito por Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015b) y el procedimiento presentado por Guerrero, Yáñez, Vidal y Cereceda-Balic (2019). A continuación, se describe la Ecuación 8.1, la cual determina la tasa de emisión de PM en [g/h].

$$TE \left[\frac{g}{h} \right] = \frac{FE_{PM} \left[\frac{g}{kg} \right] * CT \left[\frac{kg}{año} \right]}{H \left[\frac{h}{año} \right]} \quad (8.1)$$

Dónde,

TE : Tasa de Emisión según Decreto Supremo N°39 (2012).

FE_{PM} : Factor de emisión de PM obtenido en los ensayos de combustión.

CT : Consumo anual de combustible.

H : número de horas al año en que se utilizan los equipos calefactores.

El objetivo final es comparar la tasa de emisión obtenida para los *pellets* estudiados en esta memoria, con las tasas de emisión para leña (eucalipto) presentadas por Guerrero et al. (2019) en el estudio “Effects of wood moisture on emission factors for PM_{2.5}, particle numbers and particulate-phase PAHs from Eucalyptus globulus combustion using a controlled combustion chamber for emissions”. Si bien sus resultados provienen de un análisis gravimétrico de PM_{2.5}, a diferencia de los resultados obtenidos en esta experimentación, que fueron directamente medidos por el equipo Espectrómetro Grimm (AR – 2), de todas formas, estos valores resultan relativamente comparables al estar basados en emisiones medidas dentro de la misma cámara de combustión en condiciones controladas (3CE), y corresponderían una primera aproximación a las tasas de emisión reales que generarían la combustión de estos diversos materiales en estudio.

Considerando que la normativa DS N°39/2012 no especifica el tamaño exacto de partículas para los límites de emisión, se evaluarán los resultados para PM_{2.5}, debido a que este tamaño resulta ser crítico para la salud de las personas (MMA, 2018d).

A continuación, en el Gráfico 8.34 se exponen los resultados obtenidos con respecto a las tasas de emisión calculadas a partir de los FE de PM_{2.5} generados en los ensayos de combustión para las diversas variedades de *pellets*, que fueron quemados con 0% de humedad, en contraste con las tasas de emisión para PM_{2.5} informadas por Guerrero (2019) para leña combustionada también con 0% de humedad.

Al comparar las biomásas en general, se distingue que en todas las regiones las tasas de emisión para las variedades de avena y uva cumplen con todas las normativas vigentes correspondiente a equipos con potencia térmica menor o igual 25 [kW] (L1, L2 y L3), que son aquellos utilizados a nivel domiciliario principalmente. Con respecto a las tasas de emisión para pino, se aprecia que en promedio cumplen con la normativa L3 para todas las regiones, en cambio incumplen la norma L1 y L2 en todas las regiones considerando su desviación estándar, exceptuando la V región.

Se aprecia también que la tasa de emisión promedio del *pellet* comercial, supera a la de todas las biomásas en estudio dentro de cada región, traspasando los límites establecidos para equipos con potencia menor a 8 [kW] (L1) desde la VIII Región hasta la XVII Región considerando el valor promedio, y sobrepasa este límite en todas regiones considerando su desviación estándar. En cambio, las tasas de emisión para leña, considerando su desviación estándar, cumplen con la norma L1 desde la Zona Norte hasta la VII Región.

En general, en todas las regiones las tasas de emisión para *pellets* de avena, uva y pino menores que las tasas de emisión para leña.

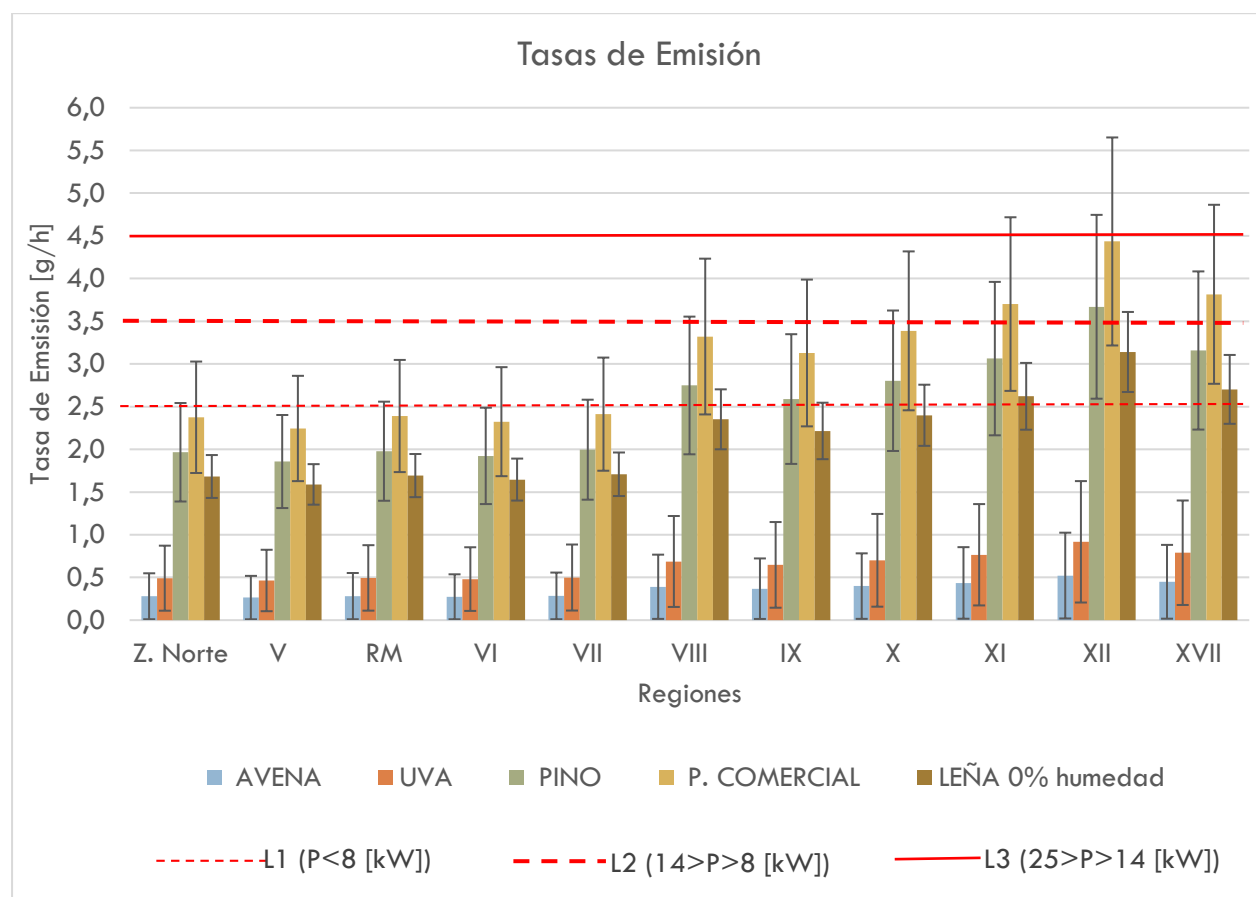


Gráfico 8.34 Tasas de emisión para avena, pino uva y leña.

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por Guerrero (2019) y Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2015b).

A pesar de que los valores para las tasas de emisión de PM_{2,5} pueden estar subestimados, en comparación con los valores usuales de la biomasa comercial que se utiliza a nivel domiciliario, dado que las condiciones de humedad a las que se combustionaron los *pellets* en estudio corresponden a condiciones controladas y con 0% de humedad, lo cual difiere de las condiciones reales con las que operan las estufas a *pellet* o leña. Sin embargo, estos valores representan una estimación de la mejor condición de combustión, considerando además que en general los *pellets*, al ser biomasa estandarizada, presentan una baja humedad, por debajo del 12% si es que son almacenados correctamente (MMA, 2015).

Por lo tanto, puede establecerse que el Programa de Recambio de Calefactores podría resultar satisfactorio en todas las regiones si es que fueran reemplazados todos los equipos de calefacción actuales, por equipos que combustionen *pellets* fabricados a partir de paja de avena u orujo de uva, con la más baja humedad posible (idealmente 0% de humedad), considerando que la potencia térmica de los calefactores entregados por el MMA fluctúa entre 5 – 8,5 [kW] (MMA, 2018a), ocasionando entonces que se cumpla con la normativa L1 respecto a las tasas de emisión establecidas en el DS N°39/2012. De todas formas, resulta conveniente realizar pruebas con *pellets* que presenten humedades más elevadas para determinar si en esos casos se sigue cumpliendo con la normativa, ya que se ha demostrado que el factor asociado a la humedad de la biomasa es fundamental en la generación de emisiones (Guerrero et al., 2019).

Además, si se reemplazaran todos los calefactores actuales, mediante equipos que combustionen pino radiata o *pellet* comercial, en promedio y considerando la desviación estándar de las tasas de emisión, se cumpliría con la normativa para estufas a *pellet* con potencias entre 14 y 25 [kW] (L3), desde la Zona Norte hasta la X Región.

Por otra parte, considerando que las variedades de *pellet* conformados de avena y uva corresponden a biomásas que al combustionarlas resultan potencialmente con menores tasas de emisión que el *pellet* comercial y el pino, entonces las variedades de avena y uva pueden llegar a considerarse como potenciales productos sustitutos al *pellet* comercial, que está fabricado base de pino radiata, y competir directamente con él, considerando también las enormes cantidades de residuos anuales que son emitidos de avena principalmente, como se aprecia en la Tabla 8.15, donde se distingue que el cultivo de avena genera alrededor de 700.000 toneladas anuales de paja y cáscaras, principalmente en las regiones de la Araucanía, Biobío, Los Lagos y Los Ríos, las que en conjunto presentan un consumo anual de combustible de 15.638 [kg/año]. Además, la producción de vino en Chile emite alrededor de 170.000 toneladas anuales de orujos de uva, generadas principalmente en las regiones del Maule, O'Higgins, Metropolitana y Biobío (ODEPA, 2017; Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2015b).

Tabla 8.15 Comparación residuos agrícolas y forestales.

Biomasa residual	Tipo de residuo	Cantidad [t]	Época de disponibilidad del residuo	Ubicación principal
Avena	Paja y cáscaras	713.102	Noviembre - enero	La Araucanía, Biobío, Los Lagos y Los Ríos
Uva	Orujos prensados	173.474	A partir de abril	Maule, O'Higgins, Metropolitana y Biobío
Pino	Aserrín	164.070	Todo el año	Biobío, Maule, La Araucanía y Los Ríos

Fuente: Elaboración propia con información de ODEPA (2017) y Gysling et al. (2018).

8.4 Emisiones de gases de combustión

A continuación, en la Tabla 8.16 se presenta un resumen de los resultados obtenidos respecto a los gases de combustión CO₂, CO, NO_x, NO, SO₂, O₂ y H₂ medidos en los ensayos. Las celdas marcadas en color amarillo indican que durante esa quema en específico el equipo de medición Testo 350XL presentó algún problema, por lo que no fue posible obtener un FE para ese ensayo. Las celdas marcadas en color rojo corresponden a los valores atípicos (*outliers*) dentro del conjunto de datos estudiado, los cuales fueron identificados mediante la elaboración de gráficos de cajas y bigotes detallados en el Anexo B. Cabe destacar que durante las quemas que presentan *outliers* no ocurrieron problemas aparentes en el transcurso del ensayo, ni en los equipos de medición.

Al observar el panorama general de los datos, se aprecia que solo existe un valor atípico en los resultados de las emisiones gaseosas, para los resultados de CO en la quema Q4 de avena.

Tabla 8.16 Resumen resultados gases de combustión.

Biomasa	N° Quema	CO ₂ [g/kg]	CO [g/kg]	NO _x [g/kg]	NO [g/kg]	SO ₂ [g/kg]	H ₂ [g/kg]
Avena	Q1	4314	101,482	5,602	3,492	2,506	0,690
	Q2	4616	96,736	7,722	4,791	1,124	0,442
	Q3	4011	88,272	6,718	4,185	0,278	0,519
	Q4		44,025	5,710	3,546	1,888	0,270
	Q5	2116	76,365	3,471	2,181	2,294	0,558
	Q6	2157		3,151	1,967		0,173
Uva	Q1	2369	236,412	4,676	2,692	0,082	2,855
	Q2	3034	353,862	8,199	4,736	0,100	3,723
	Q3	2763	298,591	6,444	3,734	0,105	3,110
	Q4	5063	71,473	12,304	7,142	2,672	0,351
	Q5	3894	61,419	8,437	4,893	1,785	0,222
	Q6	2757	66,598	5,270	3,053	0,348	0,381
Pino	Q1	4518	152,436	2,095	1,284	4,228	0,291
	Q2	4650	152,944	1,397	0,878	4,844	0,414
	Q3	4987	121,891	0,976	0,607	1,363	1,633
Pellet comercial	Q1		76,361	1,992	1,225	0,000	0,465
	Q2		64,962	1,781	1,099	0,001	0,321
	Q3		60,111	1,467	0,913	0,000	0,317
	Q4		63,027	1,223	0,755	0,000	0,399
	Q5		57,615	1,067	0,668	0,000	0,251
	Q6		54,140	1,302	0,794	0,000	0,275
	Q7		51,329	0,582	0,365	0,000	0,290
	Q8		55,658	0,934	0,583	0,000	0,278

Fuente: Elaboración propia.

8.4.1 Dióxido de carbono y rendimiento

Con respecto específicamente a las emisiones de dióxido de carbono, se expone a continuación en el la Tabla 8.17 y en Gráfico 8.35, los resultados comparativos para este contaminante frente a cada variedad de biomasa, exceptuando *pellet* comercial debido a las razones explicadas anteriormente.

Tabla 8.17 Factores de Emisión de CO₂.

Biomasa	N° Quema	FE CO₂ [g_{CO2}/kg_{pellet}]	FE CO₂ Promedio [g_{CO2}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{CO2}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	4314	3443	1211	35
	Q2	4616			
	Q3	4011			
	Q4	-			
	Q5	2116			
	Q6	2157			
Uva	Q1	2369	3313	998	30
	Q2	3034			
	Q3	2763			
	Q4	5063			
	Q5	3894			
	Q6	2757			
Pino	Q1	4518	4718	242	5
	Q2	4650			
	Q3	4987			
Pellet comercial	Q1	-	-	-	-
	Q2	-			
	Q3	-			
	Q4	-			
	Q5	-			
	Q6	-			
	Q7	-			
	Q8	-			

Fuente: Elaboración propia.

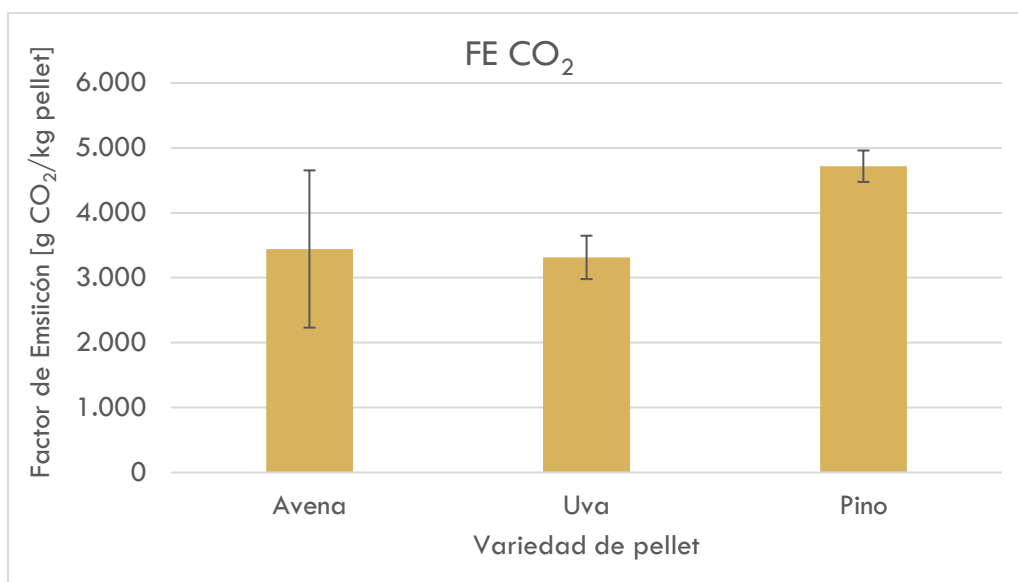


Gráfico 8.35 Factores de Emisión de CO₂.

Fuente: Elaboración propia.

Se establece entonces que la variedad de *pellet* que generó mayor cantidad de emisiones de CO₂ correspondió al pino, con un FE promedio de 4.718 [g/kg], el cual además presentó una variabilidad menor en comparación a las demás biomásas, lo que se refleja en su coeficiente de variación del 5%, no obstante, el pino no corresponde a la biomasa con un mayor contenido de carbono, como se aprecia en la Tabla 8.18, lo cual podría esperarse dadas sus emisiones elevadas de CO₂ con respecto a los *pellets* de avena y pino. Esto se puede explicar debido a que la combustión puede verse afectada por algún factor no controlado como la consolidación del pellet y la granulometría del material previo a la peletización.

Tabla 8.18 %C biomásas.

Biomasa	Análisis elemental
	% C
Avena	46,77
Uva	59,44
Pino	51,91

Fuente: Elaboración propia con información de análisis elemental.

En el caso de la avena, se aprecia que presenta un FE promedio de CO₂ de 3.264 [g/kg], inferior al pino, como se puede esperar dada la menor cantidad de carbono dentro de su estructura, además el FE de avena resulta inferior a las emisiones de CO₂ generadas al quemar uva, la cual presenta un FE promedio de 3.313 [g/kg]. En cuanto a la variabilidad de los FE, la avena presenta un coeficiente de variación del 35%, en contraste con la uva que presenta un 30%.

Para identificar de mejor manera las diferencias obtenidas entre los resultados anteriores, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, como se expone en la Tabla 8.19, que representa los resultados del test de rangos múltiples, obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, dado que el conjunto de datos de las emisiones de CO₂ proviene de una distribución normal, con un 95% de confianza. Mediante el test de rangos múltiples se establece que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de uva, avena y pino con un 95% de confianza.

Tabla 8.19 Test de rangos múltiples para FE de CO₂.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Uva	6	3313,33	X
Avena	5	3442,8	X
Pino	3	4718,33	X

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en los siguientes Gráfico 8.36, Gráfico 8.37 y Gráfico 8.38 se esquematiza el comportamiento del CO₂ en tiempo real para todos los ensayos realizados. Se aprecia que tanto para avena, uva y pino, es posible diferenciar las distintas etapas de la combustión, notando que durante la fase de llama la concentración en línea de CO₂ asciende hasta alcanzar un máximo global, para posteriormente comenzar a descender finalizados los 3 [min] que contempla la etapa de llama, lo cual coincide con lo esperado teóricamente. En general el CO₂ se comporta de forma similar entre cada quema, sin embargo, para la avena existen 2 quemas (Q5 y Q6) que alcanzan máximos globales menores a la tendencia que siguieron de los demás ensayos para la misma biomasa, lo mismo ocurre en el caso de la quema Q1 con uva.

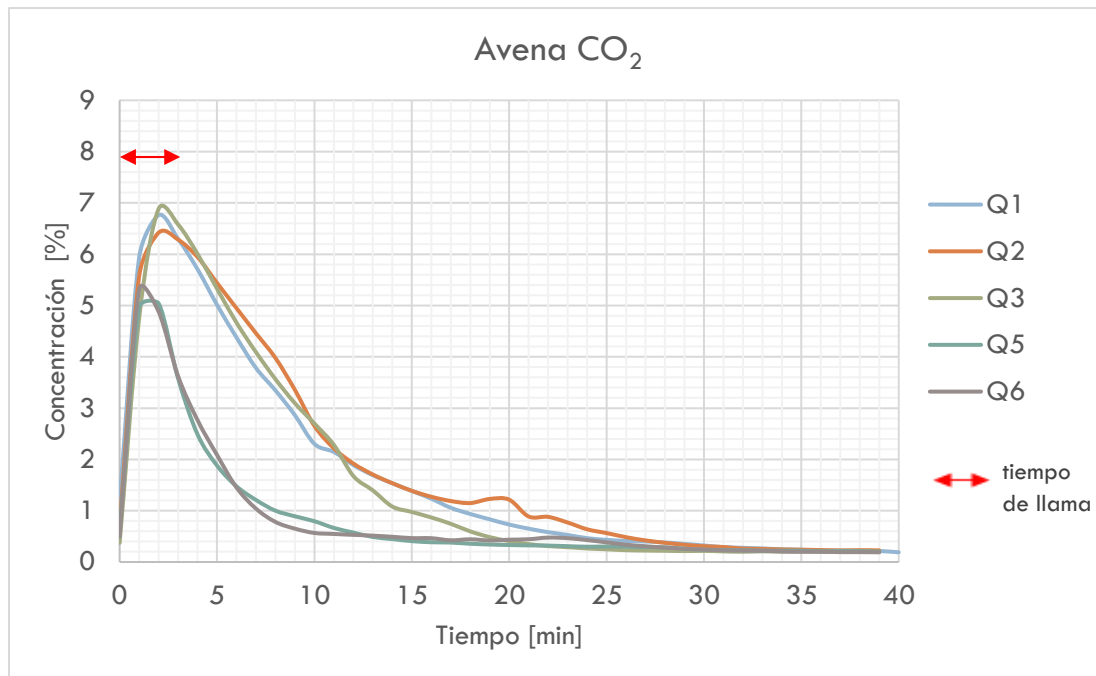


Gráfico 8.36 Emisiones en tiempo real de CO₂ para avena.
Fuente: Elaboración propia.

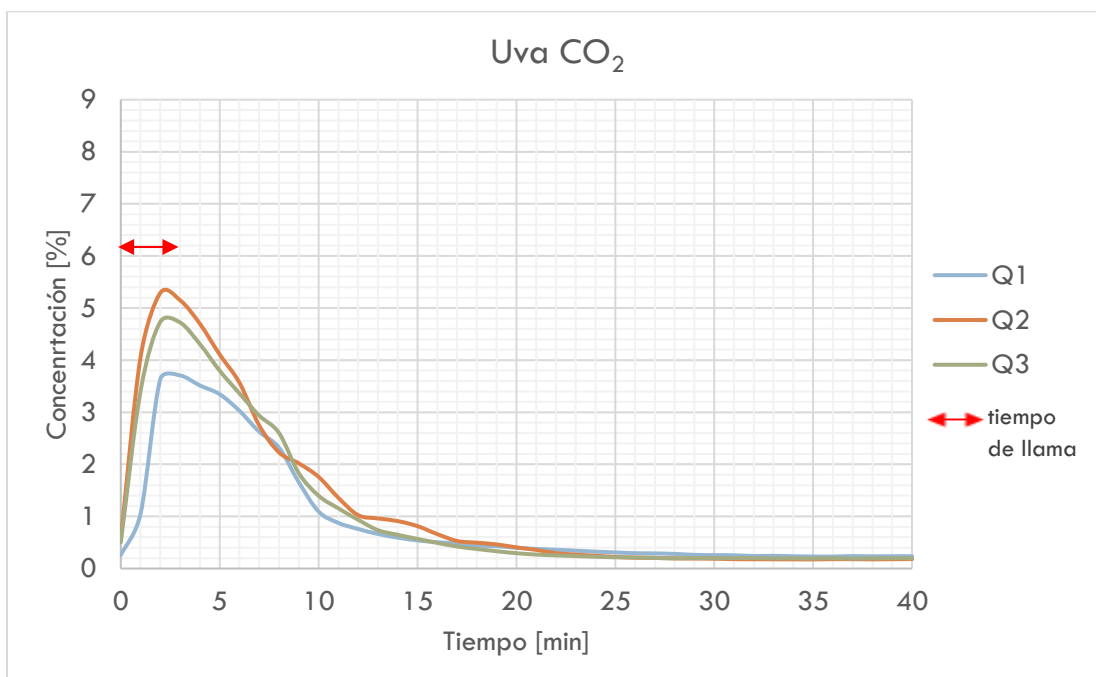


Gráfico 8.37 Emisiones en tiempo real de CO₂ para uva.
Fuente: Elaboración propia.

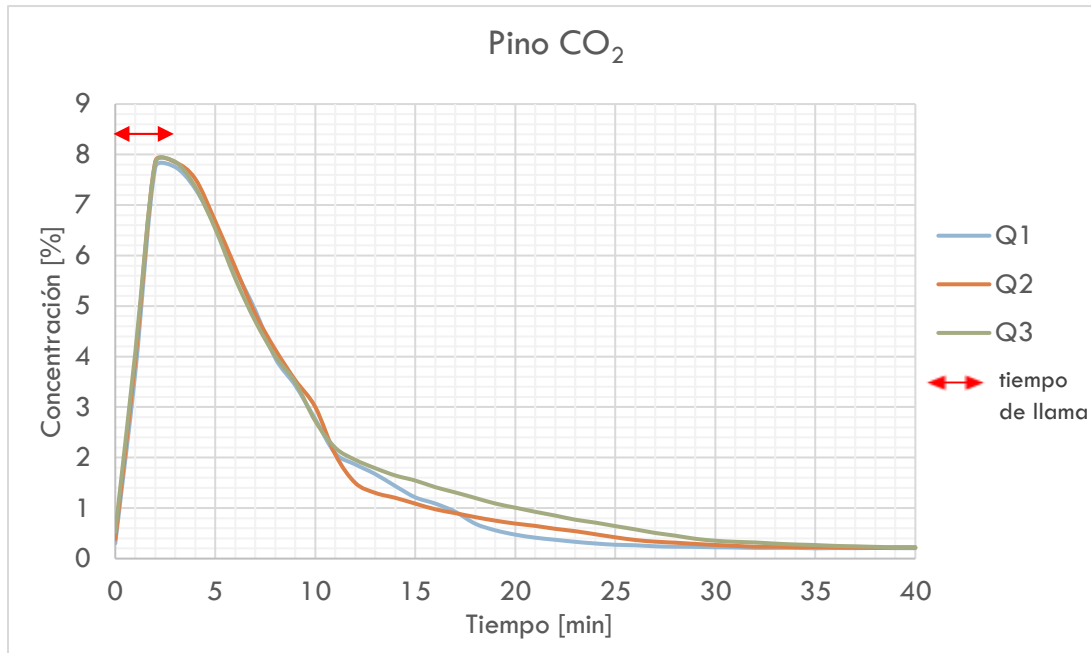


Gráfico 8.38 Emisiones en tiempo real de CO₂ para pellet comercial.

Fuente: Elaboración propia.

8.4.1.1 Rendimiento de combustión

A continuación, en la Tabla 8.20 se resumen los resultados obtenidos para el rendimiento de combustión máximo alcanzado en cada quema. Se distingue principalmente que con la variedad de pino se genera un rendimiento de combustión promedio de 46,24%, mayor que para uva y avena, implicando que las pérdidas de energía asociada al exceso de aire sean mayores para el pino, sin embargo, no corresponde a la variedad quemada con mayor exceso de aire, pero de todas formas presenta un valor elevado del 91%, en comparación con uva.

Con respecto a la uva, se aprecia que su rendimiento de combustión fue en promedio de un 35,56%, lo que se traduce en que existan menores pérdidas de energía debido al exceso de aire, ya que se quemó con el menor de todos los factores lambda en comparación con las demás biomásas.

Para el caso de la avena, se distingue que a pesar de presentar el mayor exceso de aire entre todas las biomásas, de un 105%, sus pérdidas de energía ocasionadas por el exceso de aire no fueron las mayores, ya que presenta un rendimiento de combustión del 41,69%, menor que para el caso del pino.

Tabla 8.20 Rendimiento de combustión.

<i>Biomasa</i>	<i>N° Quema</i>	<i>CO₂ máximo teórico [%]</i>	<i>% CO₂ máximo medido [%]</i>	<i>Rendimiento de combustión máximo [%]</i>	<i>Rendimiento de combustión promedio [%]</i>	<i>Exceso de aire</i>
Avena	Q1	16,79	6,85	40,79	41,69	105%
	Q2		6,71	39,96		
	Q3		7,03	41,87		
	Q4		-	-		
	Q1		7,16	42,64		
	Q2		7,25	43,18		
Uva	Q1	16,77	3,86	23,02	35,56	55%
	Q2		5,40	32,20		
	Q3		4,85	28,92		
	Q4		8,38	49,98		
	Q1		6,46	38,50		
	Q2		4,82	28,73		
Pino	Q1	17,51	8,11	46,32	46,24	91%
	Q2		8,13	46,43		
	Q3		8,05	45,97		

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar las diferencias obtenidas entre los resultados de los rendimientos de combustión, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, cuyos resultados se exponen en la Tabla 8.21, correspondiendo al test de rangos múltiples, considerando que los datos de provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Se establece entonces, mediante el Test de rangos múltiples LSD, que no existen diferencias estadísticamente significativas para las medias de los rendimientos de quemado entre uva y avena, y entre pino y avena, con un 95% de confianza.

Tabla 8.21 Test de rangos múltiples para rendimientos de combustión.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Uva	6	33,5583	X
Avena	5	41,688	XX
Pino	3	46,24	X

Fuente: Elaboración propia.

8.4.1.2 Rendimiento de quemado

Por otra parte, refiriéndose entonces al rendimiento de quemado, se aprecia en la Tabla 8.22, la cual resume los valores de rendimientos de quemado máximos obtenidos, que en los ensayos con pellets de pino se logra quemar en promedio un 90,10% del combustible inicial, en cambio la avena alcanza a quemarse como máximo en un 87,63% y finalmente en los ensayos con uva solamente se logra quemar un 52,97% de la biomasa inicial, lo cual se refleja en sus menores emisiones de CO₂ con respecto a los demás tipos de *pellets*.

Tabla 8.22 Rendimiento de quemado.

<i>Biomasa</i>	<i>N° Quema</i>	<i>CO₂ máximo teórico [%]</i>	<i>% CO₂ máximo medido [%]</i>	<i>Rendimiento de quemado máximo [%]</i>	<i>Rendimiento de quemado promedio [%]</i>
Avena	Q1	7,99	6,85	85,76	87,63
	Q2		6,71	84,00	
	Q3		7,03	88,01	
	Q4		-	-	
	Q1		7,16	89,64	
	Q2		7,25	90,76	
Uva	Q1	10,62	3,86	36,33	52,97
	Q2		5,40	50,83	
	Q3		4,85	45,65	
	Q4		8,38	78,90	
	Q1		6,46	60,78	
	Q2		4,82	45,35	
Pino	Q1	8,99	8,11	90,25	90,10
	Q2		8,13	90,47	
	Q3		8,05	89,58	

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar la existencia de diferencias significativas entre rendimientos de quemado, se llevó a cabo el Test de Kruskal-Wallis, considerando que los datos en no provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Se aprecia entonces que sí existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza entre todos los rendimientos de quemado para las variedades de *pellets* en estudio.

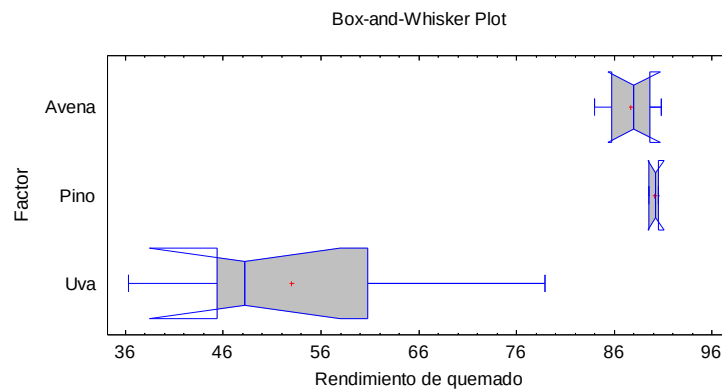


Gráfico 8.39 Gráfico de cajas y bigotes para el rendimiento de quemado.
Fuente: Elaboración propia.

8.4.2 Monóxido de carbono

Con respecto a las emisiones de monóxido de carbono, se expone a continuación en la Tabla 8.23 y en el Gráfico 8.40, los resultados comparativos para este contaminante frente a cada variedad de biomasa. Se aprecia que para este conjunto de datos existe un valor atípico, para la quema Q4 con avena, el cual no fue considerado en el cálculo del promedio ni desviación estándar.

Tabla 8.23 Factores de Emisión de CO.

Biomasa	N° Quema	FE CO [g_{co}/kg_{pellet}]	FE CO Promedio [g_{co}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{co}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	101,48	90,71	11,02	12,14
	Q2	96,74			
	Q3	88,272			
	Q4	44,02 (Outlier)			
	Q5	76,36			
	Q6	-			
Uva	Q1	236,41	181,39	131,27	72
	Q2	353,86			
	Q3	298,59			
	Q4	71,47			
	Q5	61,42			
	Q6	66,60			
Pino	Q1	152,44	142,42	17,78	12
	Q2	152,94			
	Q3	121,89			
Pellet comercial	Q1	76,36	60,40	7,88	13
	Q2	64,96			
	Q3	60,11			
	Q4	63,03			
	Q5	57,61			
	Q6	54,14			
	Q7	51,33			
	Q8	55,66			

Fuente: Elaboración propia.

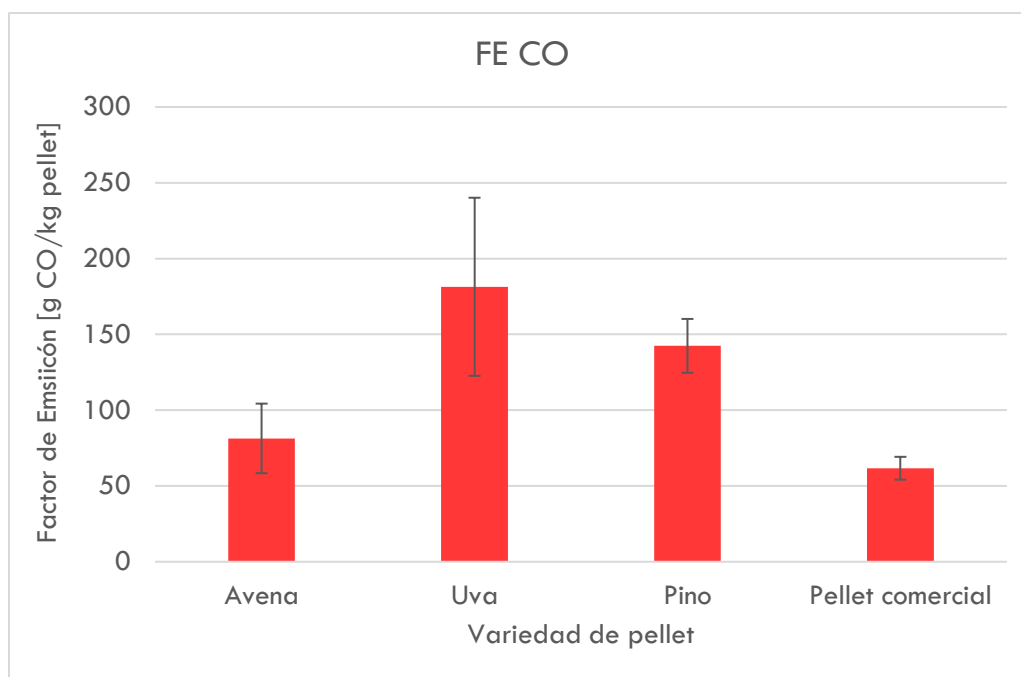


Gráfico 8.40 Factores de Emisión de CO.

Fuente: Elaboración propia.

Se establece entonces que la variedad de uva emitió comparativamente una mayor cantidad de CO durante los ensayos, con un FE promedio de 181 [g/kg], lo que da indicio de una combustión menos eficiente con respecto a las demás biomásas, como se respalda también con los resultados expuestos anteriormente sobre su bajo rendimiento de quemado, del 56%, el cual resultó menor comparados con el de pino y avena. Por otra parte, los FE para uva presentan un coeficiente de variación del 72%.

En el caso del pino, sus resultados presentan el segundo FE de CO más alto, con un valor promedio de 142 [g/kg] y una variabilidad menor que para uva, con un coeficiente de variación del 12%. No obstante, con pino se obtuvo un rendimiento de quemado más alto comparado con las demás biomásas.

Con respecto a las emisiones de CO para avena y *pellet* comercial, en promedio resultaron menores que para las demás biomásas, con FE de 90,7 [g/kg] y 60,4 [g/kg] respectivamente, por lo que puede establecerse que la combustión en estos casos se llevó a cabo de manera más completa que para las demás variedades de *pellets*, lo cual coincide con el elevado rendimiento de quemado que presentaron las quemas con avena, del 88%, y un porcentaje de pérdidas de energía por el exceso de aire de un 41%.

Para identificar la existencia de diferencias significativas entre las emisiones de CO, se llevó a cabo el Test de Kruskal-Wallis, considerando que los datos en no provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Se aprecia entonces, en el Gráfico 8.41 que entre las medianas de los FE de CO para uva y pino no existen diferencias estadísticamente

significativas con un 95% de confianza, lo cual también ocurre para las medianas de los FE de avena con uva. Sin embargo, es posible afirmar que sí existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza entre las medianas de los FE de *pellet* comercial con uva, *pellet* comercial con avena y *pellet* comercial con pino. Resulta importante mencionar que la variedad de avena es la única que presenta un *outlier* dentro de sus FE, con un valor de 44,02 [g/kg], correspondiente a la quema Q4.

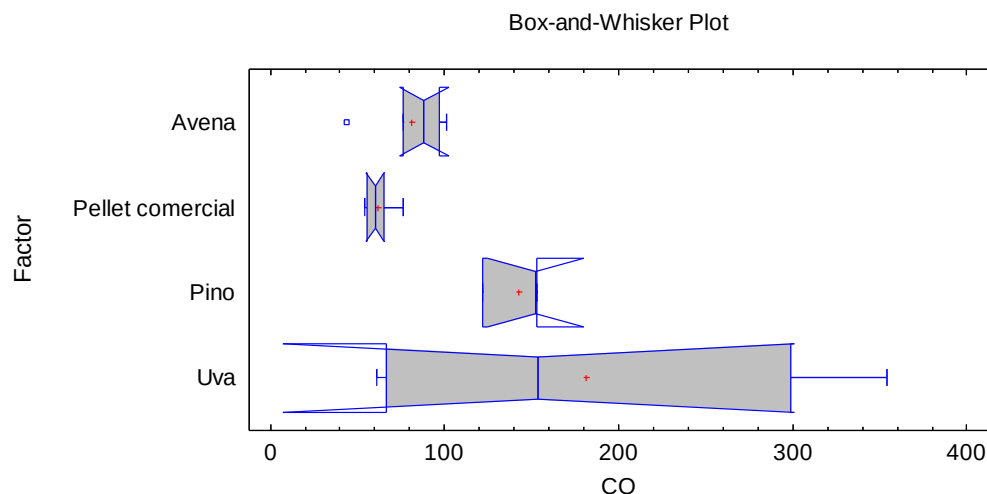


Gráfico 8.41 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de CO.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en el Gráfico 8.42, Gráfico 8.43, Gráfico 8.44 y Gráfico 8.45 se presenta el comportamiento en tiempo real del CO durante los ensayos realizados. Se distingue que para todas las variedades de biomasa se produce un máximo global de emisiones de CO entre los 7 primeros minutos de la combustión, donde en algunos casos se genera durante la fase se llama (para todas las quemas con pino y para la quema Q5 con avena), y en otros casos se produce luego de terminada esta etapa. Posteriormente, en la fase humeante, las emisiones de CO van en descenso hasta completar los ensayos. Se aprecia que los máximos globales alcanzados oscilan entre 1.500 – 9.200 [ppm] de CO.

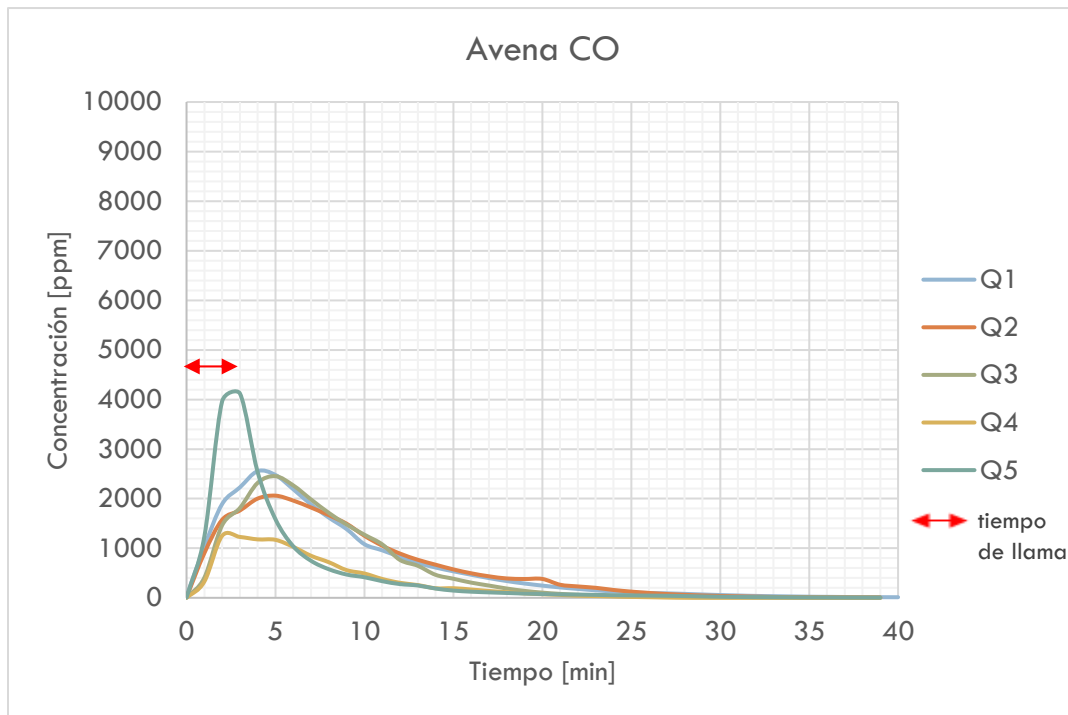


Gráfico 8.42 Emisiones en tiempo real de CO para avena.

Fuente: Elaboración propia.

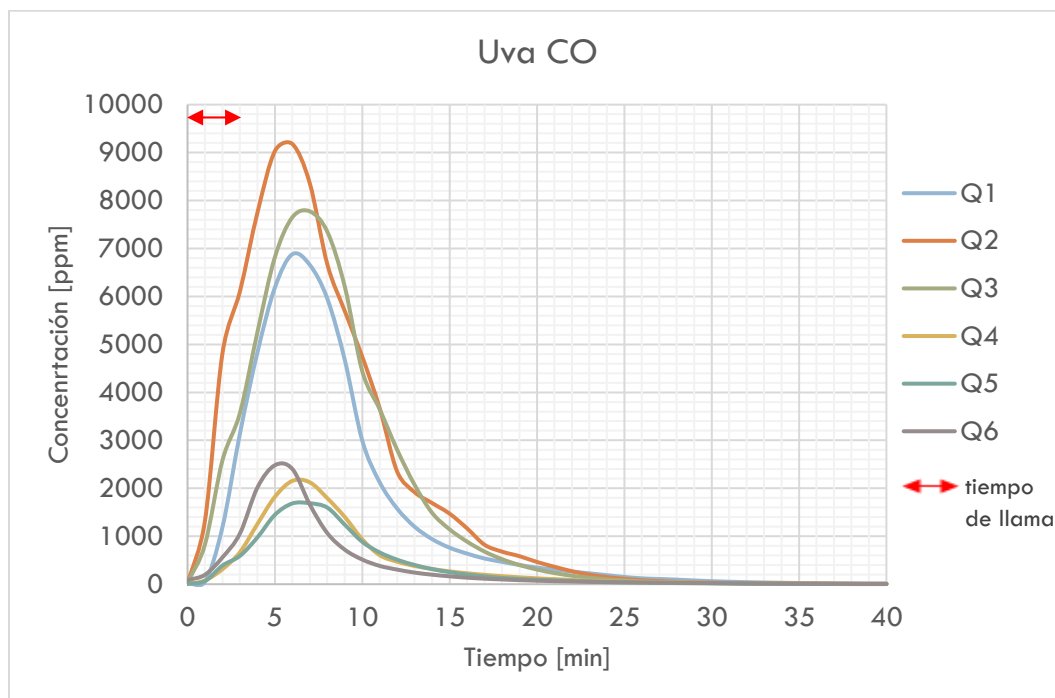


Gráfico 8.43 Emisiones en tiempo real de CO para uva.

Fuente: Elaboración propia.

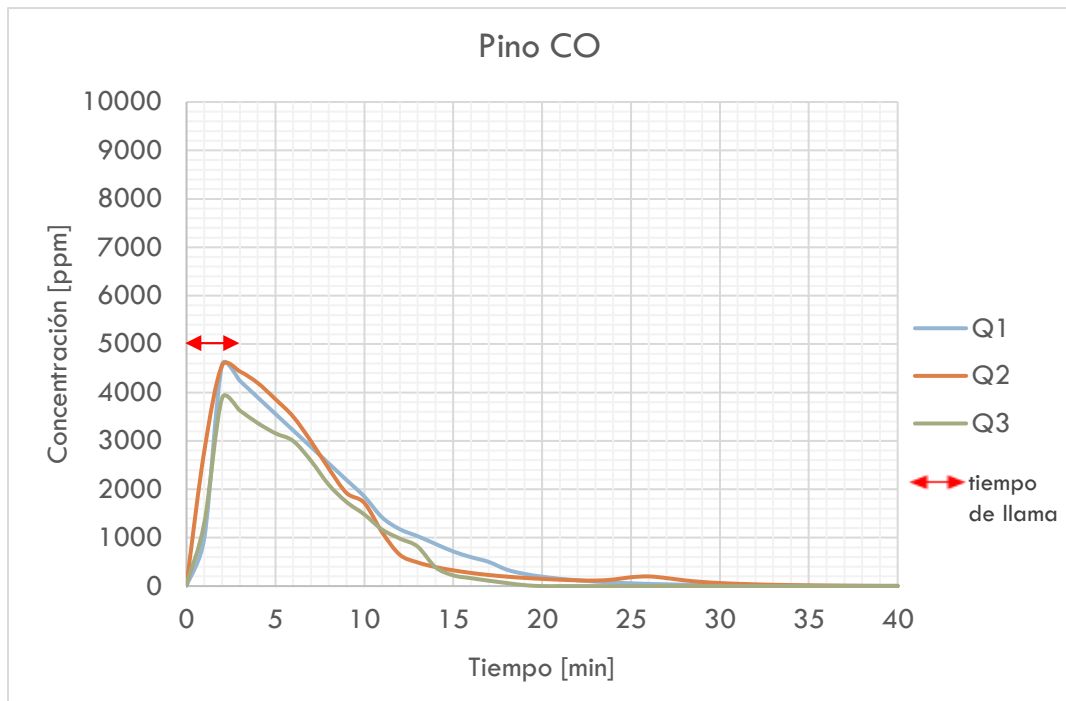


Gráfico 8.44 Emisiones en tiempo real de CO para pino.

Fuente: Elaboración propia.

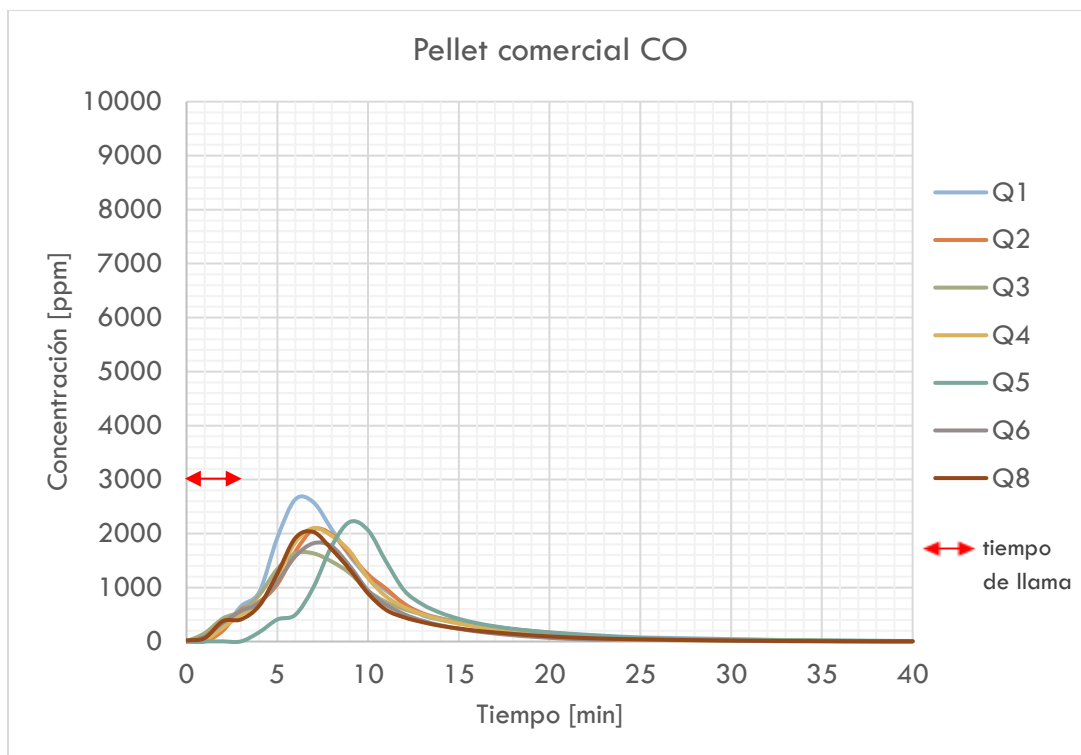


Gráfico 8.45 Emisiones en tiempo real de CO para pellet comercial.

Fuente: Elaboración propia.

8.4.3 Óxidos de nitrógeno

Con respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, se presenta a continuación en el Gráfico 8.46 y en la Tabla 8.24, los resultados obtenidos respecto a los FE de NO_x para los diferentes *pellets* ensayados.

Tabla 8.24 Factores de Emisión de NO_x.

Biomasa	N° Quema	FE NO_x [g_{NOx}/kg_{pellet}]	FE NO_x Promedio [g_{NOx}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{NOx}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	5,602	5,29	1,79	34
	Q2	7,722			
	Q3	6,718			
	Q4	5,710			
	Q5	3,471			
	Q6	3,151			
Uva	Q1	4,676	7,56	2,77	37
	Q2	8,199			
	Q3	6,444			
	Q4	12,304			
	Q5	8,437			
	Q6	5,270			
Pino	Q1	2,095	1,49	0,57	38
	Q2	1,397			
	Q3	0,976			
Pellet comercial	Q1	1,992	1,29	0,46	35
	Q2	1,781			
	Q3	1,467			
	Q4	1,223			
	Q5	1,067			
	Q6	1,302			
	Q7	0,582			
	Q8	0,934			

Fuente: Elaboración propia.

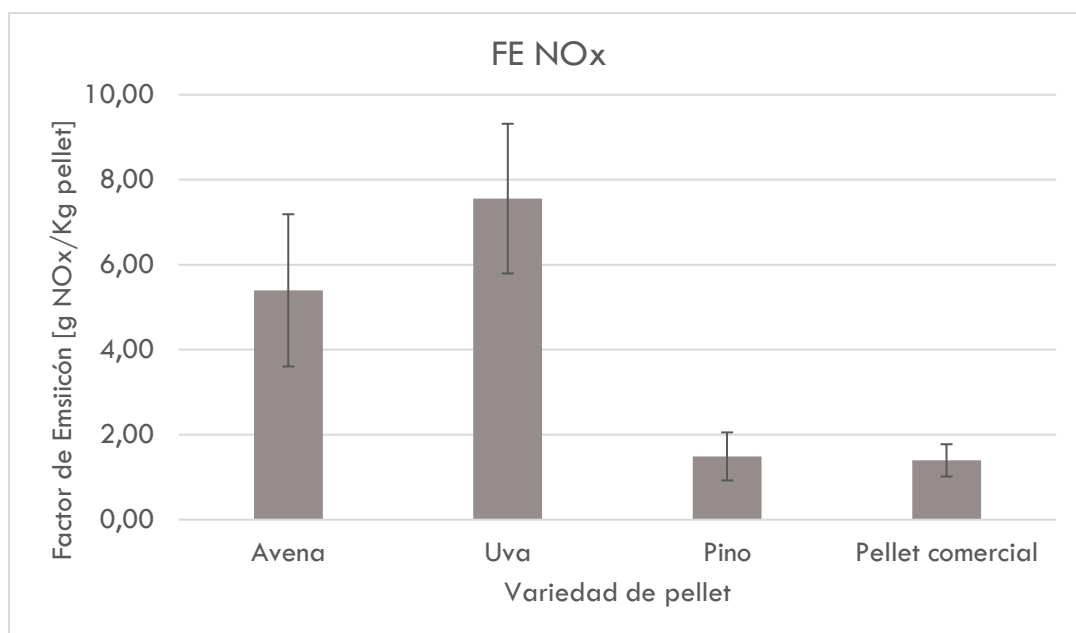


Gráfico 8.46 Factores de Emisión promedio de NO_x.

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que la variedad de uva emitió comparativamente una mayor cantidad de NO_x durante las quemas, con un FE promedio de 7,56 [g/kg], y un coeficiente de variación del 37%, a pesar de que presenta un contenido de nitrógeno menor que la avena, de un 0,08%, esto puede deberse a que en los ensayos de avena se generaron otro tipo de compuestos nitrogenados, que no pertenecen al NO_x.

Tabla 8.25 %N biomasa.

Biomasa	Análisis elemental
	%N
Avena	0,49
Uva	0,08
Pino	0,07
Pellet comercial	0,07

Fuente: Elaboración propia con información de análisis elemental.

Para el caso de los pellets de avena, sus resultados presentan el segundo FE de NO_x más elevado, con un promedio de 5,29 [g/kg], a pesar de que la avena contiene mayor cantidad de nitrógeno según la Tabla 8.25, en comparación con las demás biomásas, con un valor del 0,49%. Los FE de NO_x presentaron un coeficiente de variación del 34%.

Con respecto a las emisiones de NO_x para pino y *pellet* comercial, en promedio resultaron menores que para uva y avena, con FE de 1,49 [g/kg] y 1,29 [g/kg] respectivamente, coincidiendo con los bajos %N en su composición. Sus coeficientes de variación resultaron de un 38% para pino y de un 35% para pellet comercial.

Para identificar las diferencias obtenidas entre los FE de NO_x, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, cuyos resultados se exponen en la Tabla 8.26 correspondiendo al test de rangos múltiples obtenido mediante en base a la diferencia mínima LSD de Fisher, dado que el conjunto de datos de las emisiones de NO_x proviene de una distribución normal, con un 95% de confianza. Se establece entonces, mediante el test de rangos múltiples LSD que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de los siguientes pares de FE, de uva con avena y de pino con *pellet* comercial un 95% de confianza.

Tabla 8.26 Test de rangos múltiples para FE de NO_x.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Pellet comercial	7	0,300902	X
Pino	3	0,351145	X
Avena	6	1,63424	X
Uva	6	1,9691	X

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en el Gráfico 8.47, Gráfico 8.48, Gráfico 8.49 y Gráfico 8.50 se presenta el comportamiento en tiempo real del NO_x durante los ensayos de combustión. Se aprecia en general el NO_x se comporta de forma similar para todas las variedades de biomasa. Se distingue que durante la fase de llama ocurre un máximo global de emisiones en línea de NO_x que oscila entre 20 – 220 [ppm] dependiendo de la biomasa combustionada, y durante la fase humeante los niveles de NO_x descienden constantemente hasta el final de los ensayos. Resulta relevante notar que la variedad de *pellet* que generó el mayor máximo global en línea de NO_x corresponde a la uva, la cual también generó el mayor FE.

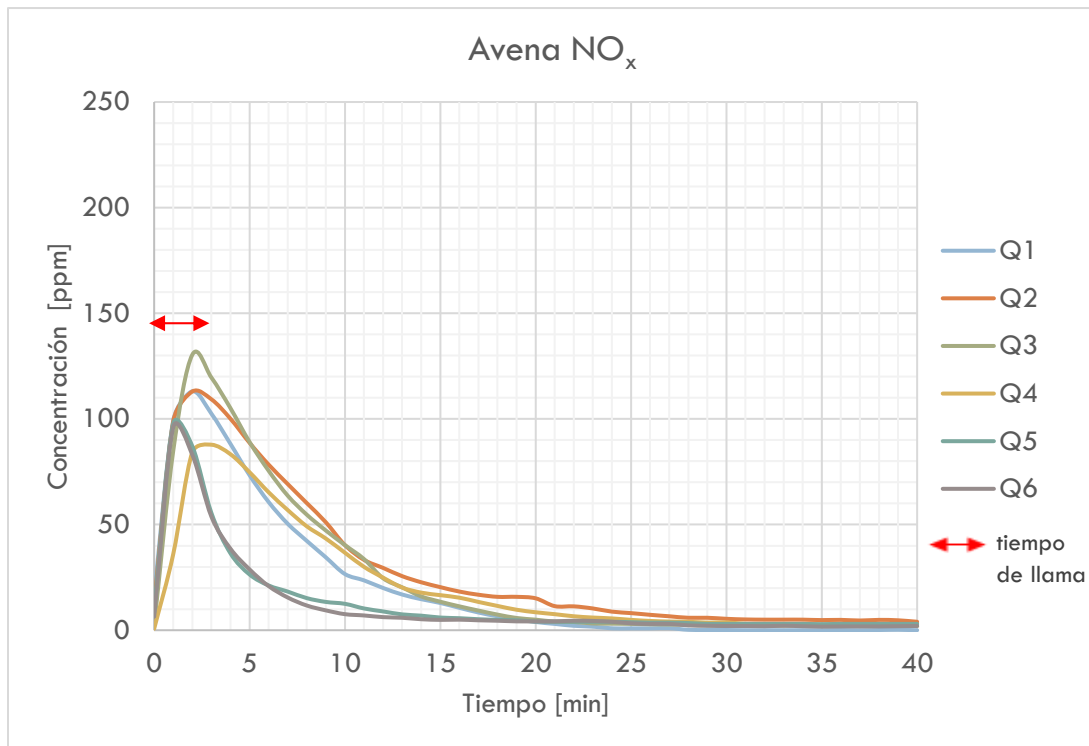


Gráfico 8.47 Emisiones en tiempo real de NO_x para avena.
Fuente: Elaboración propia.

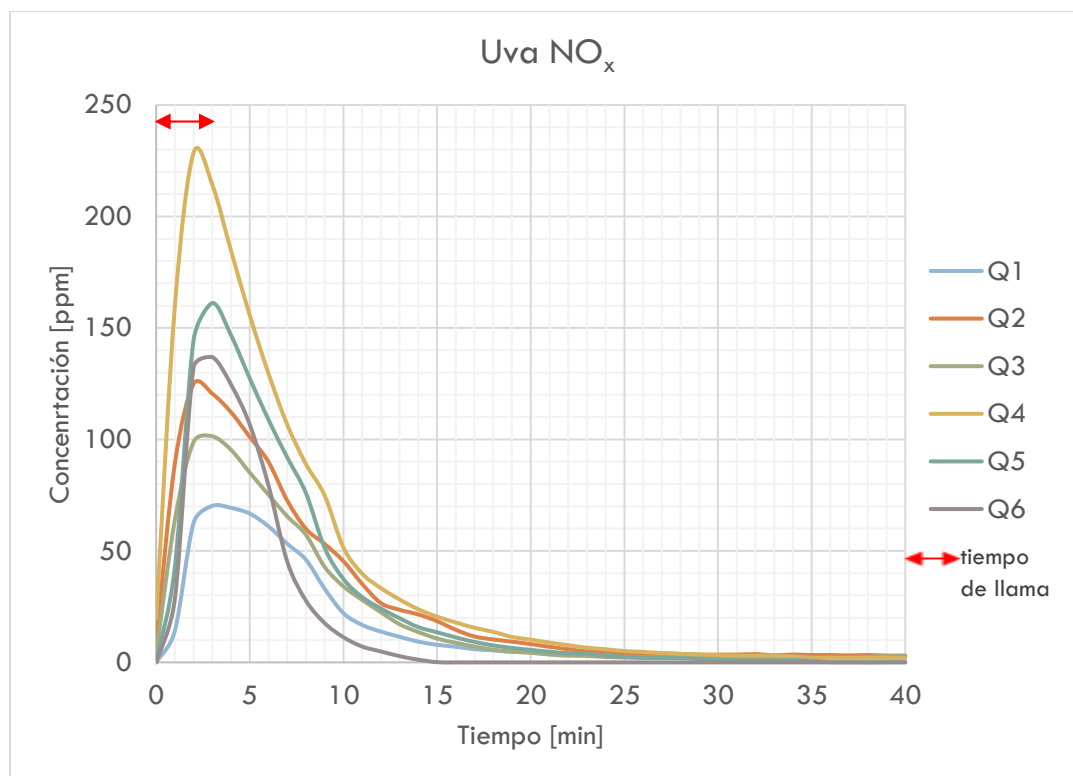


Gráfico 8.48 Emisiones en tiempo real de NO_x para uva.
Fuente: Elaboración propia.

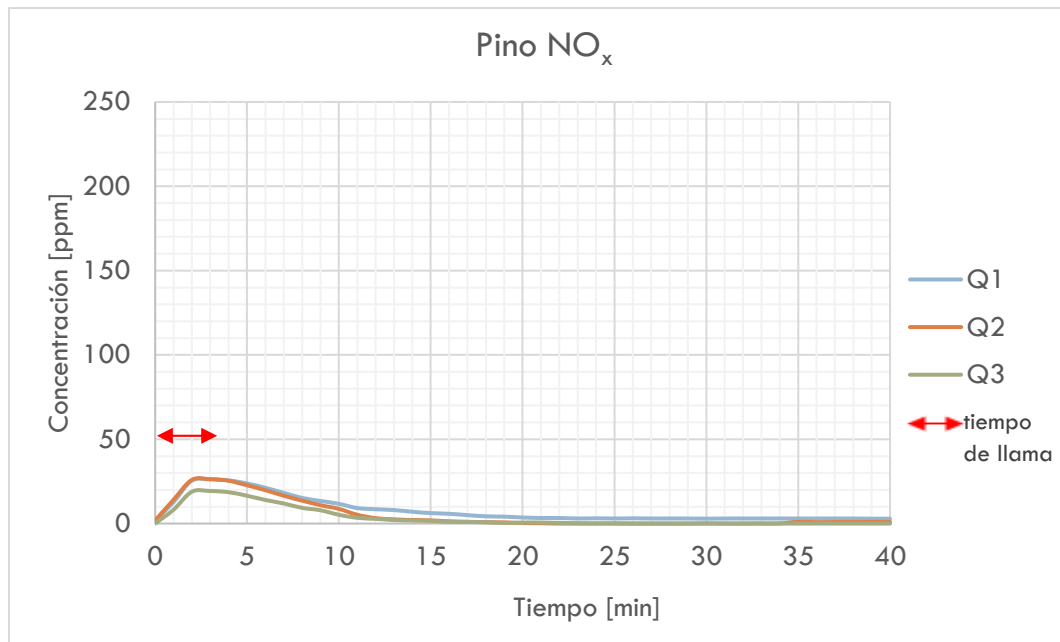


Gráfico 8.49 Emisiones en tiempo real de NO_x para pino.
Fuente: Elaboración propia.

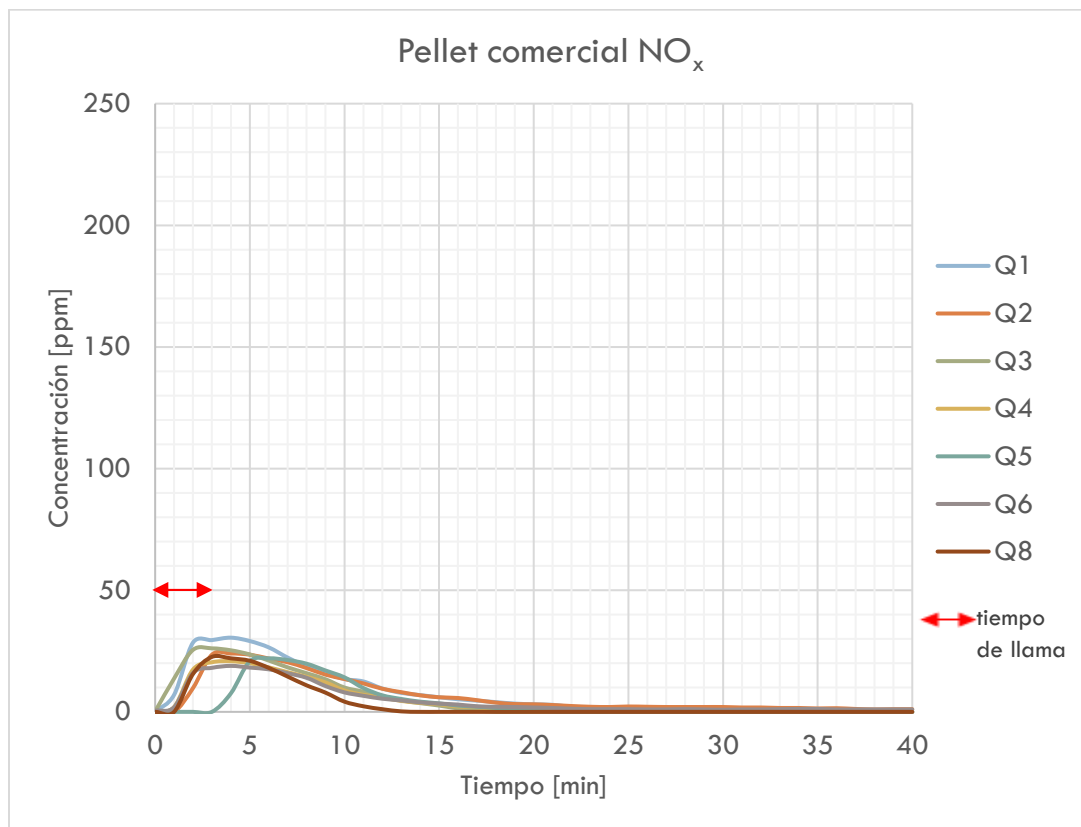


Gráfico 8.50 Emisiones en tiempo real de NO_x para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

8.4.4 Monóxido de nitrógeno

Se presenta a continuación en el Gráfico 8.51 y en la Tabla 8.32, los resultados de los FE promedio para NO con las diferentes biomásas ensayadas.

Tabla 8.27 Factores de Emisión de NO.

Biomasa	N° Quema	FE NO [g_{NO}/kg_{pellet}]	FE NO Promedio [g_{NO}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{NO}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	3,492	3,27	1,11	34
	Q2	4,791			
	Q3	4,185			
	Q4	3,546			
	Q5	2,181			
	Q6	1,967			
Uva	Q1	2,692	4,38	1,62	37
	Q2	4,736			
	Q3	3,734			
	Q4	7,142			
	Q5	4,893			
	Q6	3,053			
Pino	Q1	1,284	0,92	0,34	37
	Q2	0,878			
	Q3	0,607			
Pellet comercial	Q1	1,225	0,80	0,28	35
	Q2	1,099			
	Q3	0,913			
	Q4	0,755			
	Q5	0,668			
	Q6	0,794			
	Q7	0,365			
	Q8	0,583			

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que en las quemas con uva se emitió una mayor cantidad de NO, con un FE promedio de 4,38 [g/kg], y un coeficiente de variación de 37%. Cabe destacar que las emisiones de NO para uva representan el 58% de las emisiones de NO_x con esta biomasa, el resto de NO_x correspondería a los demás óxidos de nitrógeno conocidos, dentro de los que destacan principalmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), ya que los demás óxidos se encuentran en equilibrio con estos dos contaminantes en concentraciones muy bajas que resultan despreciables (Carnicer, 2008).

Con respecto a la avena, esta variedad presenta un FE para NO menor que el resultado para uva, pero más elevado que para pino y *pellet* comercial, con un promedio de 3,27 [g/kg] y un coeficiente de variación del 34%. Las emisiones de NO generadas por las quemas con uva representan el 62% de las emisiones de NO_x para este material.

Para el caso de las emisiones de NO para pino y *pellet* comercial, en promedio resultaron menores que para uva y avena, con FE de 0,92 [g/kg] y 0,80 [g/kg] respectivamente, presentando coeficientes de variación de un 37% para pino y de un 35% para *pellet* comercial. Las emisiones de NO para pino equivalen al 62 % de las emisiones de NO_x para esta variedad de biomasa, en cambio con respecto a *pellet* comercial, las cantidades generadas de NO equivalen al 89% del NO_x.

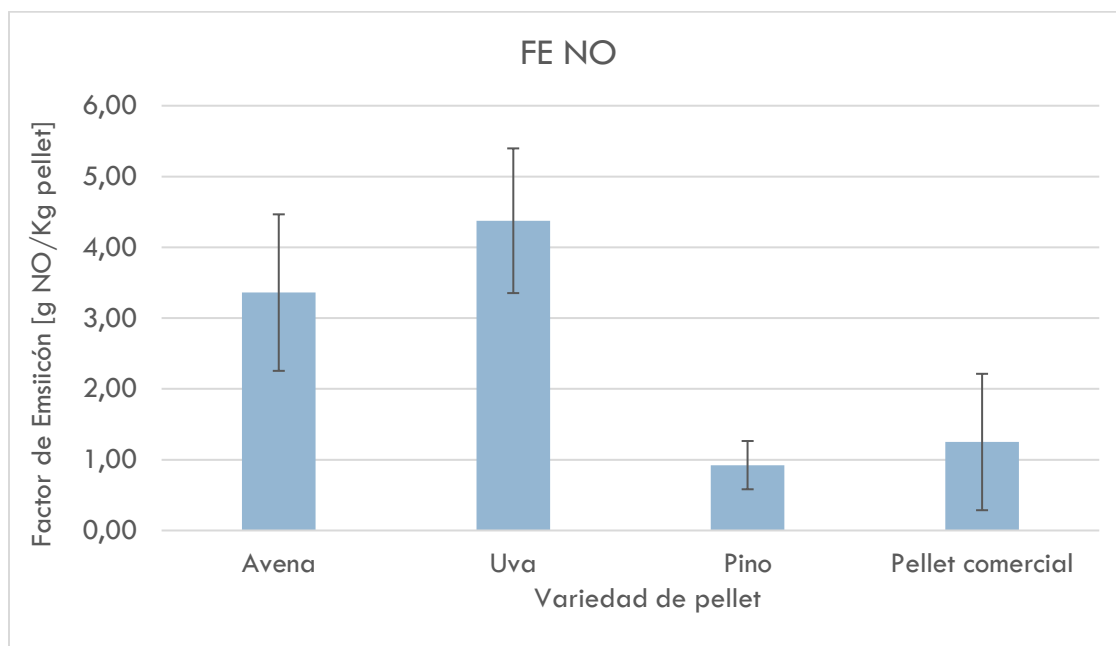


Gráfico 8.51 Factores de Emisión promedio de NO.

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar de mejor manera las diferencias obtenidas entre los resultados de NO, se llevó a cabo el Test de rangos múltiples LSD, dado que los datos de las emisiones de NO provienen de una distribución normal con un 95% de confianza, cuyos resultados se exponen

en la Tabla 8.28. Se establece entonces que no existen diferencias estadísticamente significativas para las medias de los FE de NO entre avena y uva, y entre pino y *pellet* comercial, con un 95% de confianza.

Tabla 8.28 Test de rangos múltiples para FE de NO.

Method: 95,0 percent LSD

Factor	Count	Mean	Homogeneous Groups
Pino comercial	7	-0,179359	X
Pino	3	-0,12509	X
Avena	6	1,16184	X
Uva	6	1,42167	X

Fuente: Elaboración propia mediante Statgraphics.

A continuación en el Gráfico 8.52, Gráfico 8.53, Gráfico 8.54 y Gráfico 8.55 se esquematizan las emisiones de NO en tiempo real durante los ensayos de combustión. Se aprecia que en general el NO se comporta de forma similar entre las quemas, y también de manera similar al NO_x para todas las variedades de biomasa. Se distingue que durante la fase de llama ocurre también un máximo global de emisiones de NO_x que oscila entre 20 – 220 [ppm] dependiendo de la biomasa combustionada, al igual que ocurre con NO_x. Durante la fase humeante los niveles de NO descienden paulatinamente hasta finalizar los ensayos.

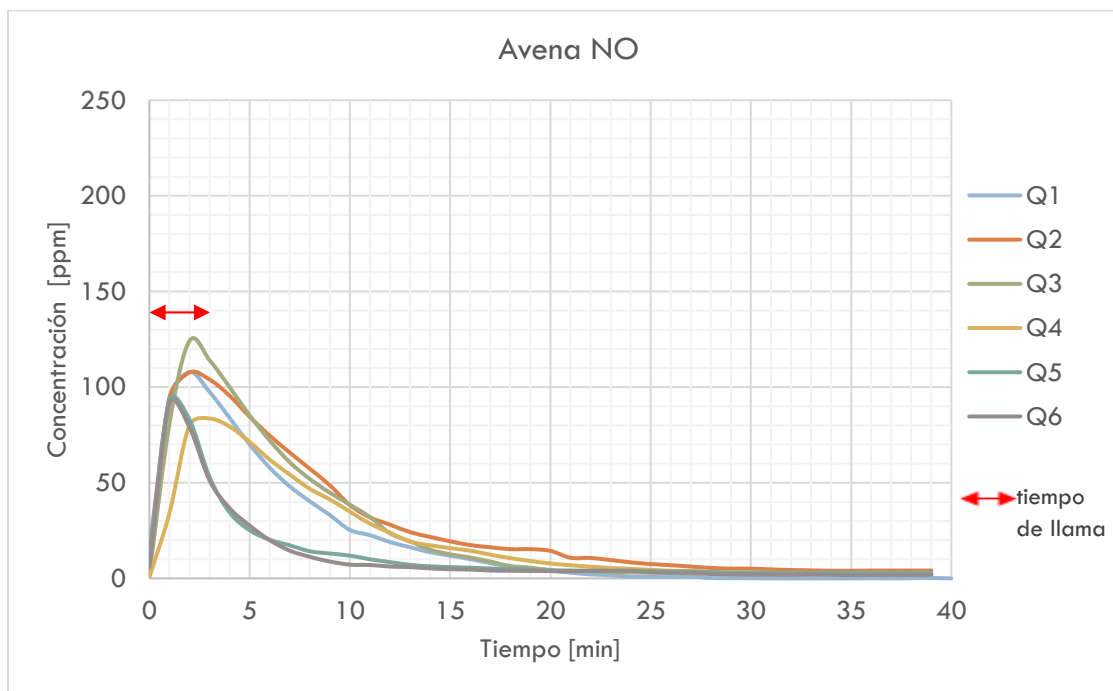


Gráfico 8.52 Emisiones en tiempo real de NO para avena.

Fuente: Elaboración propia.

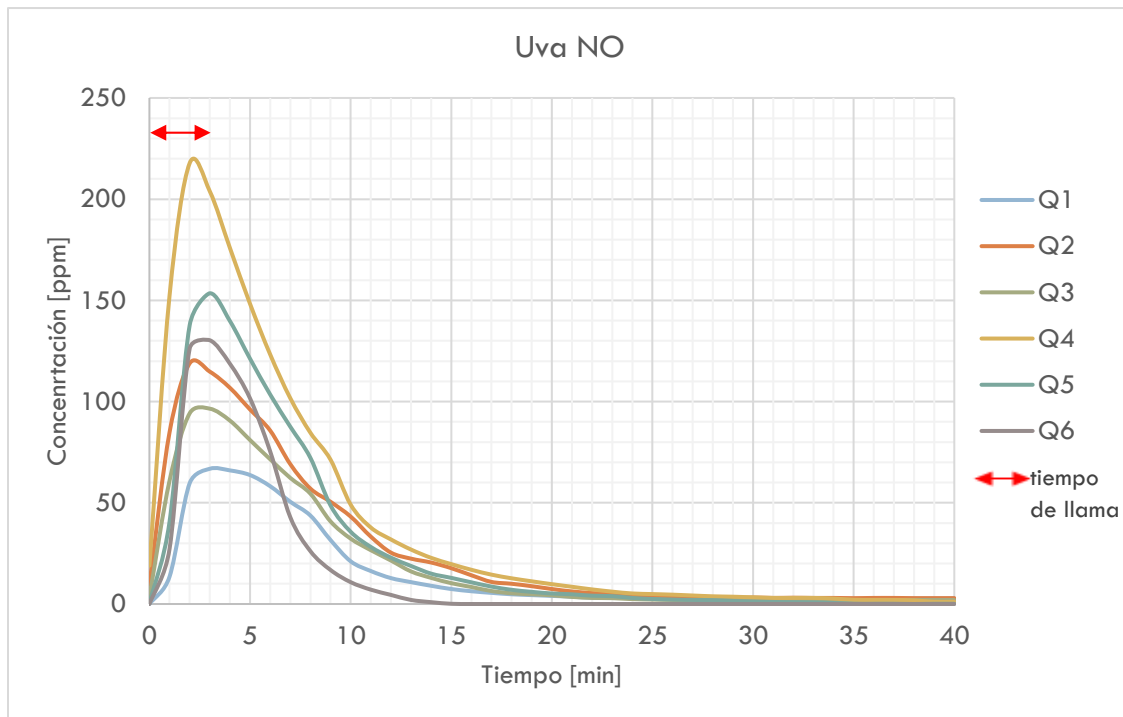


Gráfico 8.53 Emisiones en tiempo real de NO para uva.

Fuente: Elaboración propia.

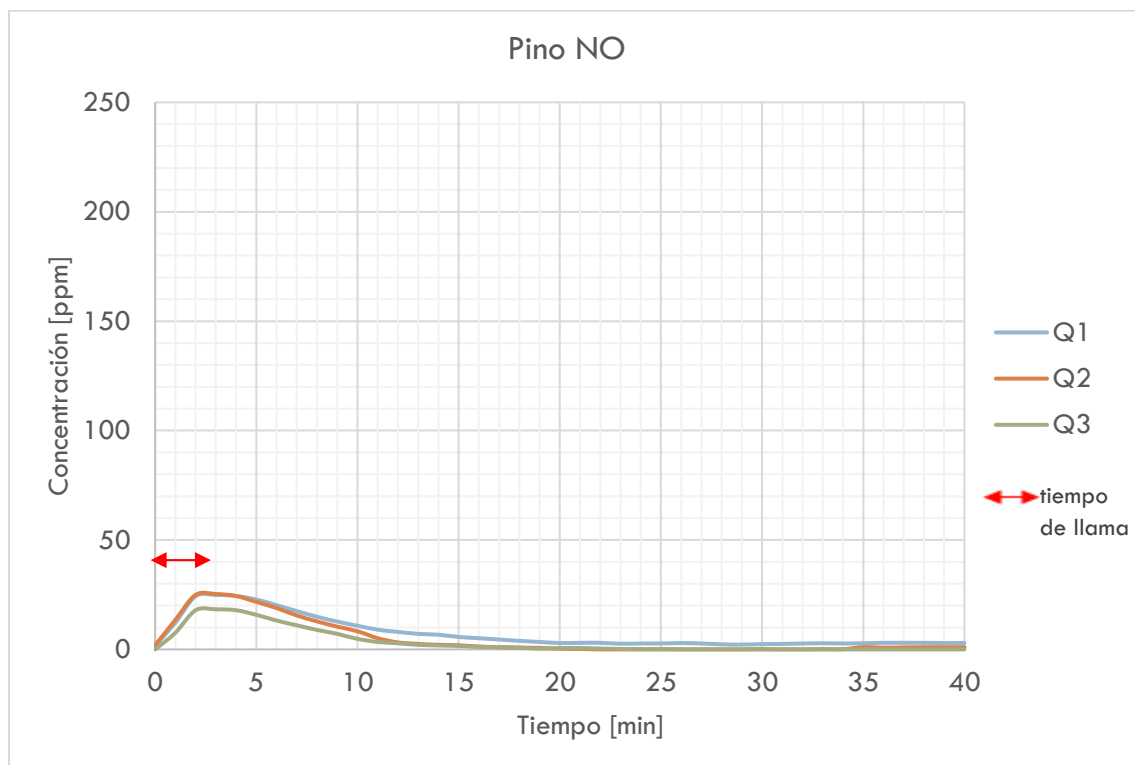


Gráfico 8.54 Emisiones en tiempo real de NO para pino.

Fuente: Elaboración propia.

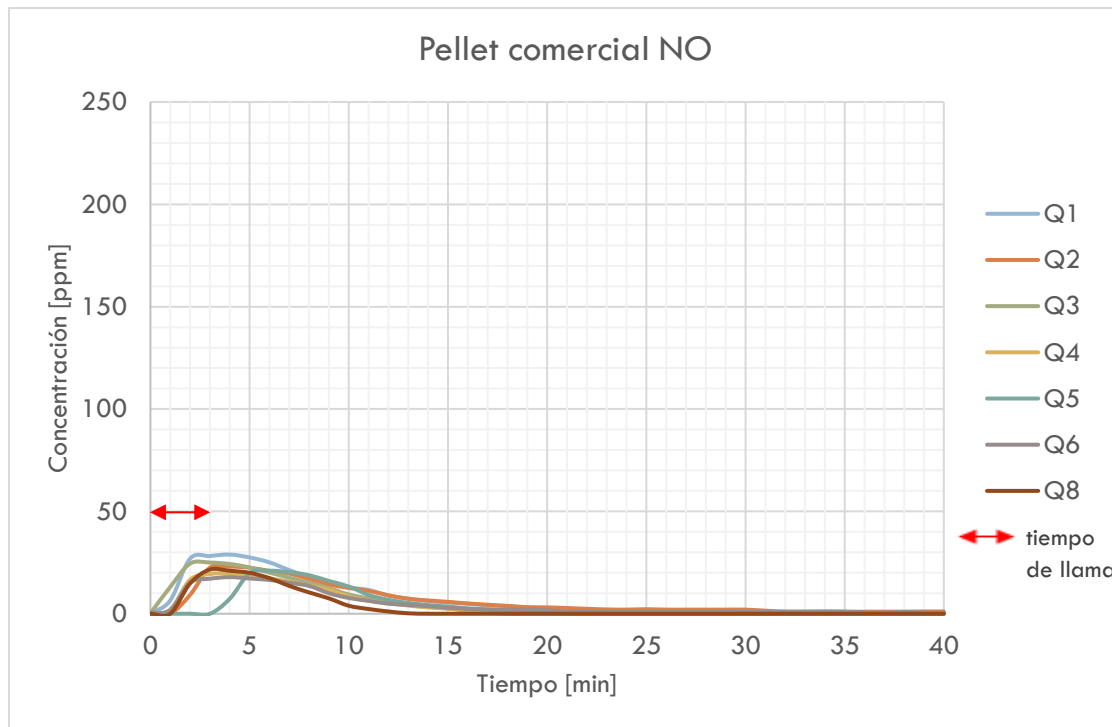


Gráfico 8.55 Emisiones en tiempo real de NO para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

8.4.5 Dióxido de azufre

A continuación, en el Gráfico 8.56 y en la Tabla 8.29 se presentan los resultados obtenidos respecto a los FE de SO₂ para las diferentes biomásas en estudio.

Tabla 8.29 Factores de Emisión de SO₂.

Biomasa	N° Quema	FE SO₂ [g_{SO2}/kg_{pellet}]	FE SO₂ Promedio [g_{SO2}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{SO2}/kg_{pellet}]	Coeficiente de variación [%]
Avena	Q1	2,506	1,62	0,92	57
	Q2	1,124			
	Q3	0,278			
	Q4	1,888			
	Q5	2,294			
	Q6	-			
Uva	Q1	0,082	0,85	1,11	131
	Q2	0,100			
	Q3	0,105			
	Q4	2,672			
	Q5	1,785			
	Q6	0,348			
Pino	Q1	4,228	3,48	1,86	53
	Q2	4,844			
	Q3	1,363			
Pellet comercial	Q1	0,000	0,00013	0,00	283
	Q2	0,001			
	Q3	0,000			
	Q4	0,000			
	Q5	0,000			
	Q6	0,000			
	Q7	0,000			
	Q8	0,000			

Fuente: Elaboración propia.

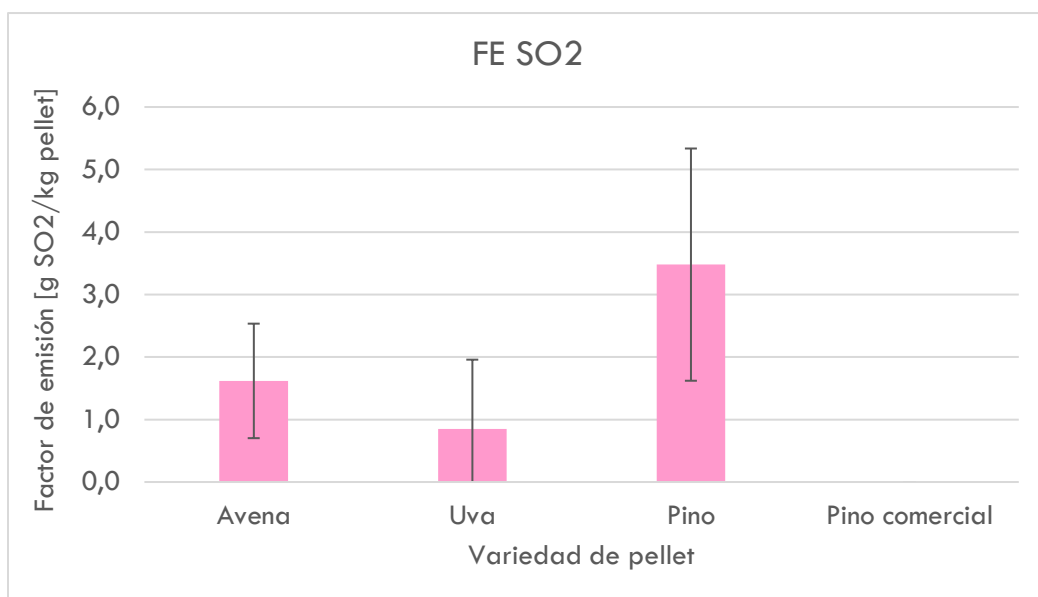


Gráfico 8.56 Factores de Emisión promedio de SO₂.

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que la variedad de pino genera mayores emisiones de SO₂ con respecto a los demás materiales, con un FE promedio de 3,48 [g/kg], y un coeficiente de variación del 53%, lo cual resulta razonable teniendo en consideración el pino presenta un mayor contenido de azufre con respecto a las demás biomásas.

Tabla 8.30 %S biomásas.

Biomasa	Análisis elemental
	% S
Avena	0,05
Uva	0,04
Pino	0,08
Pellet comercial	0,008

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los *pellets* de avena, sus resultados presentan el segundo FE de SO₂ más elevado, con un promedio de 1,62 [g/kg] y un coeficiente de variación del 57%. En cambio, en el caso de la uva, se presenta un FE promedio de 0,85 [g/kg] y un coeficiente de variación del 131%. Finalmente, para el caso del *pellet* comercial, las emisiones de SO₂ resultan muy pequeñas, considerando también su bajo contenido en azufre, cuyo FE no alcanza a distinguirse en el Gráfico 8.56, ya que presenta un valor de 0,00013 [g/kg].

Con el fin de identificar la existencia de diferencias significativas entre las emisiones de SO₂, se llevó a cabo el Test de Kruskal-Wallis, teniendo en cuenta que los datos no provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Se aprecia entonces, en el Gráfico 8.57 que entre las medianas de los FE de SO₂ para avena y pino no existen

diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza. En cambio, con respecto a las medianas de los FE de SO₂ para uva con *pellet* comercial, uva con avena, uva con pino, avena con *pellet* comercial y pino con *pellet* comercial, es posible afirmar que sí existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza.

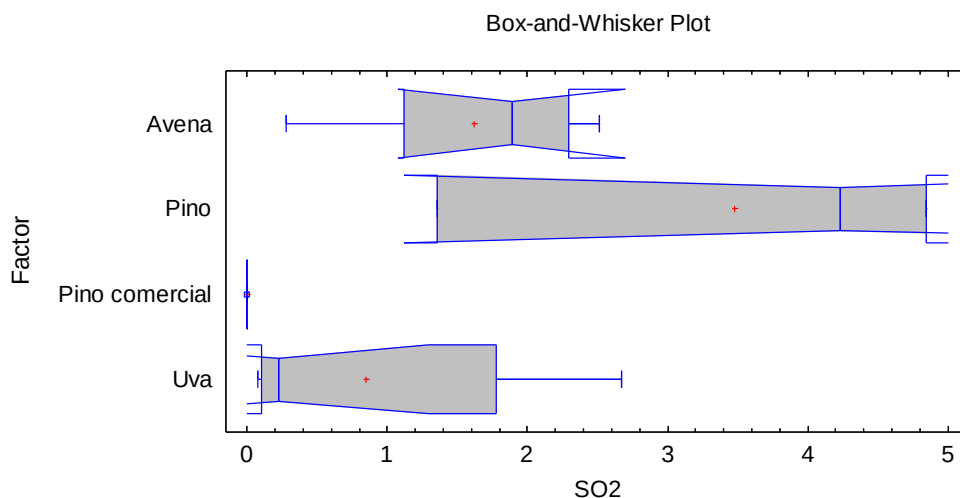


Gráfico 8.57 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de SO₂.

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta a continuación, en el Gráfico 8.58, Gráfico 8.59, Gráfico 8.60 y Gráfico 8.61 las emisiones de SO₂ en tiempo real para cada biomasa en estudio. Se aprecia que el SO₂ se comporta de manera diferente dependiendo de la biomasa que se combustione, sin embargo, para las variedades de avena, uva y pino se distingue en común la emisión de un máximo global de carga contaminante durante la fase de llama, que fluctúa entre 20 – 115 [ppm].

Para el caso de la avena específicamente, durante la fase humeante se genera un máximo local que equivale a lo más al 20% del máximo global de la fase de llama.

En la situación de la uva, se distingue que durante la fase humeante, cerca del minuto 32 del ensayo, se elevan ligeramente las emisiones, sin embargo alcanzan valores por debajo de 4 [ppm].

Respecto al comportamiento del SO₂ en línea para pino, se distingue que durante la fase de llama se produce un segundo máximo de emisiones, pero de menor magnitud que el primero, que cubre aproximadamente el 50% del anterior, y además en la fase humeante se genera un tercer máximo local de emisiones alrededor del minuto 12 del ensayo, con un valor límite que equivale aproximadamente al 25% del máximo global.

Para el caso del *pellet* comercial, las emisiones de SO₂ resultan muy bajas en todo el ensayo y no alcanzan a distinguirse en el gráfico, debido a que durante gran parte de las quemas las emisiones medidas por el Analizador de gases Testo 350XL para SO₂ se encuentran por debajo de su límite de detección.

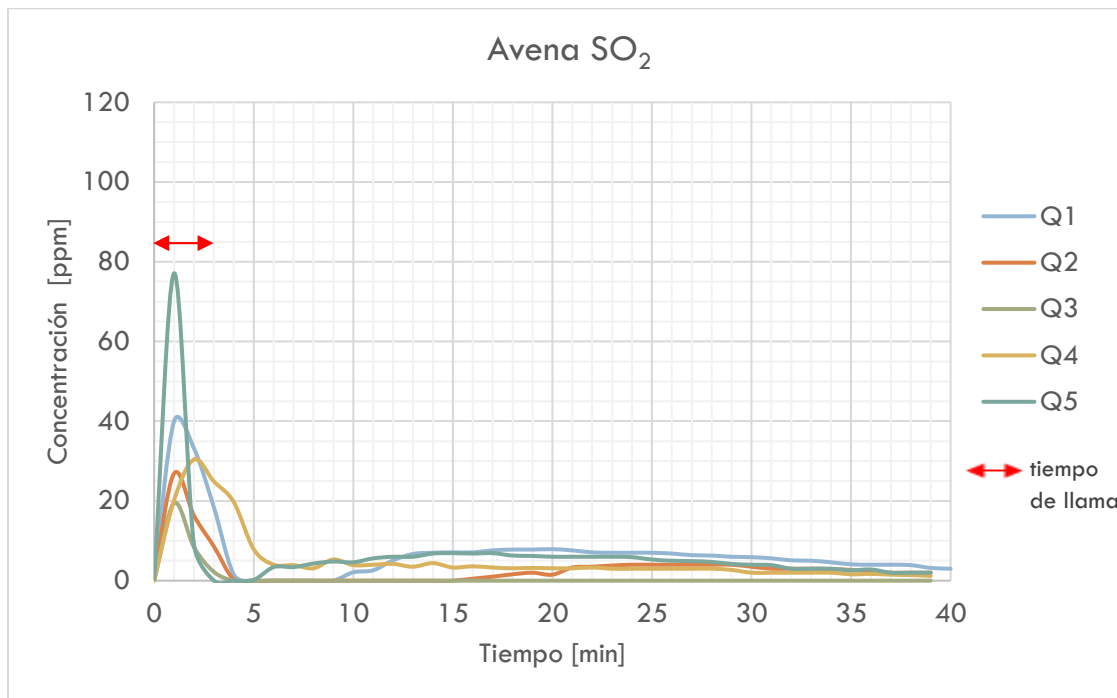


Gráfico 8.58 Emisiones en tiempo real de SO₂ para avena.
Fuente: Elaboración propia.

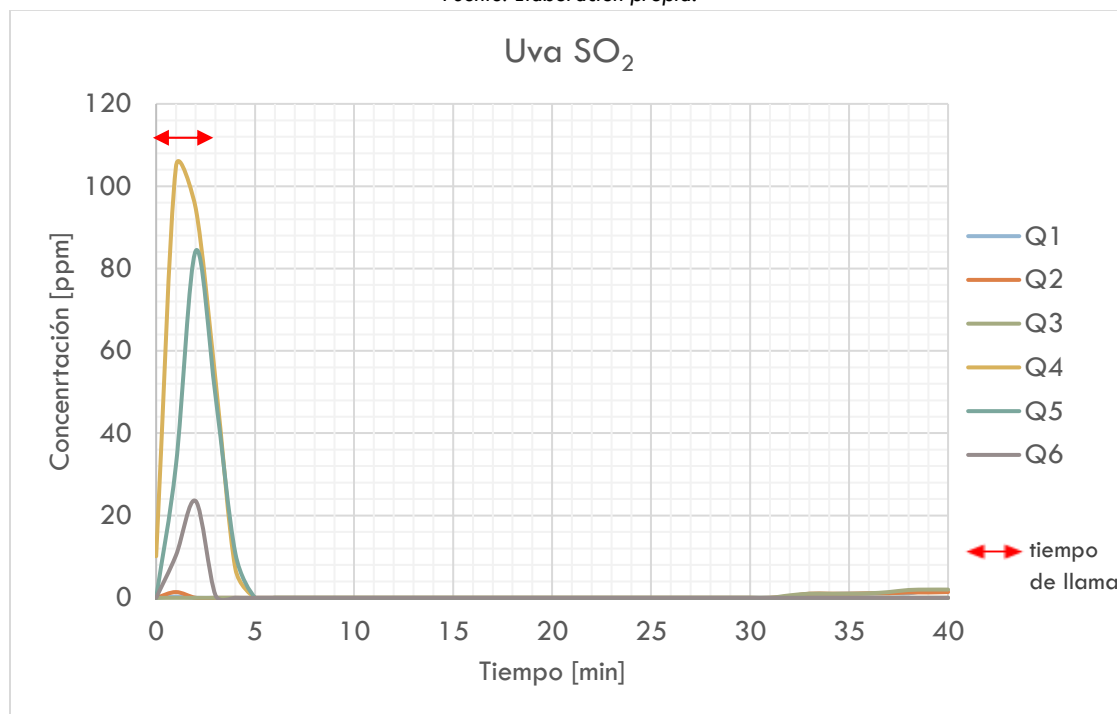


Gráfico 8.59 Emisiones en tiempo real de SO₂ para uva.
Fuente: Elaboración propia.

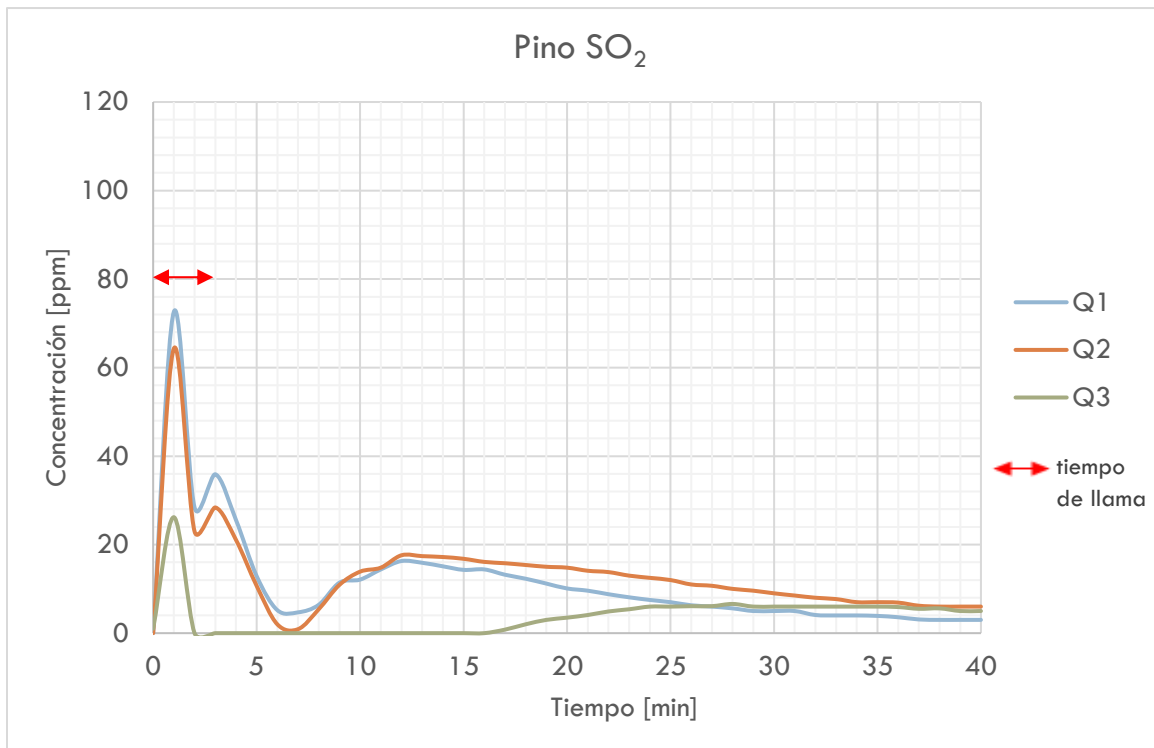


Gráfico 8.60 Emisiones en tiempo real de SO_2 para pino.

Fuente: Elaboración propia.

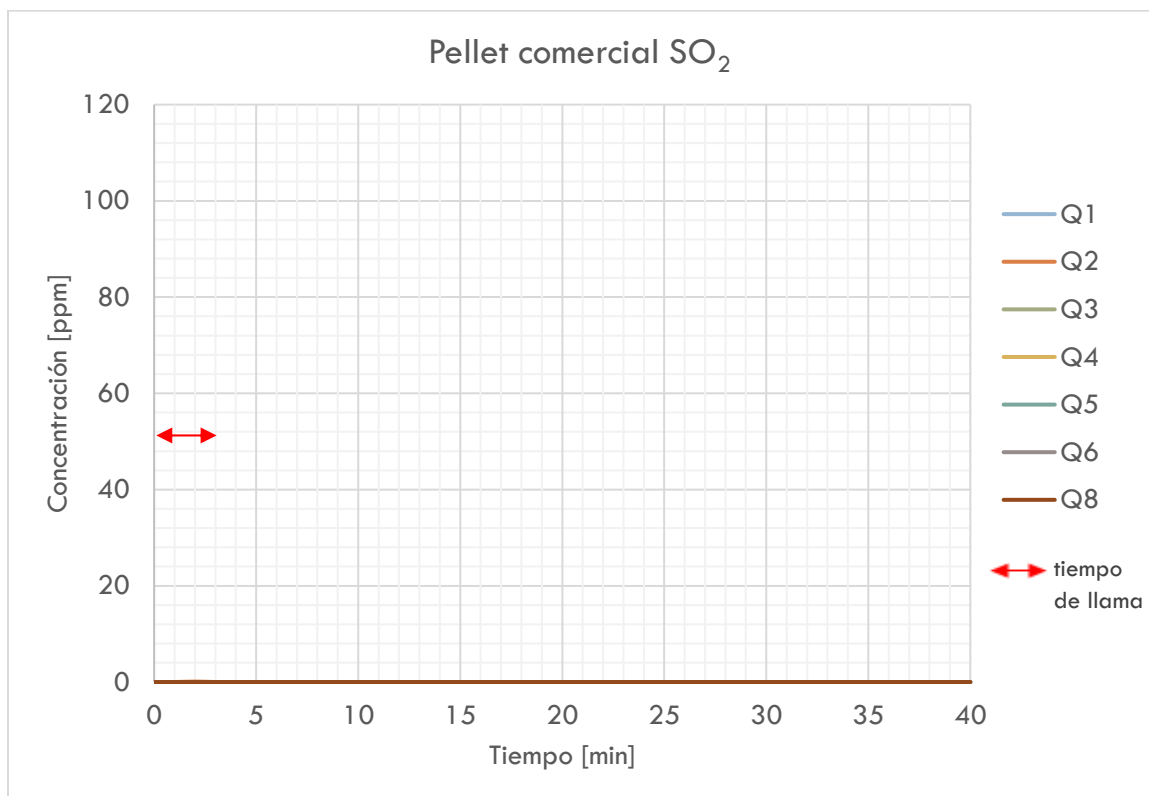


Gráfico 8.61 Emisiones en tiempo real de SO_2 para pellet comercial.

Fuente: Elaboración propia.

8.4.6 Hidrógeno molecular

Con respecto a las emisiones hidrógeno molecular, se presenta a continuación en el Gráfico 8.62 y en la Tabla 8.29 los resultados obtenidos respecto a los FE promedio de H₂ para las diferentes biomásas en estudio.

Tabla 8.31 Factores de Emisión de SO₂.

Biomasa	N° Quema	FE SO₂ [g_{SO2}/kg_{pellet}]	FE SO₂ Promedio [g_{SO2}/kg_{pellet}]	Desviación Estándar [g_{SO2}/kg_{pellet}]	Coefficiente de variación [%]
Avena	Q1	0,690	0,44	0,19	24
	Q2	0,442			
	Q3	0,519			
	Q4	0,270			
	Q5	0,558			
	Q6	0,173			
Uva	Q1	2,855	1,77	1,62	91
	Q2	3,723			
	Q3	3,110			
	Q4	0,351			
	Q5	0,222			
	Q6	0,381			
Pino	Q1	0,291	0,78	0,74	95
	Q2	0,414			
	Q3	1,633			
Pellet comercial	Q1	0,465	0,32	0,072	22
	Q2	0,321			
	Q3	0,317			
	Q4	0,399			
	Q5	0,251			
	Q6	0,275			
	Q7	0,290			
	Q8	0,278			

Fuente: Elaboración propia.

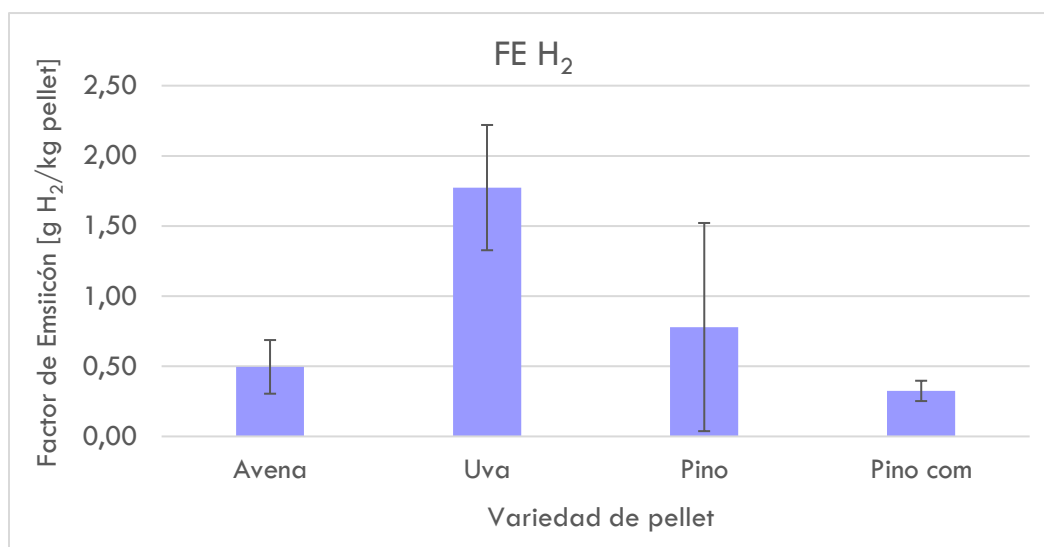


Gráfico 8.62 Factores de Emisión promedio de H₂.

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que la variedad de uva generó comparativamente una mayor cantidad de H₂ durante las quemas, con un FE promedio de 1,8 [g/kg], y un coeficiente de variación del 25%, notando también que esta variedad presenta un contenido de hidrógeno en su estructura inicial mayor con respecto a los demás materiales, como se aprecia en la Tabla 8.32.

Tabla 8.32 %H biomásas.

Biomasa	Análisis elemental
	%H
Avena	7,25
Uva	7,78
Pino	6,89
Pellet comercial	-

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los pellets de pino, sus resultados presentan el segundo FE más elevado para H₂, con un promedio de 0,78 [g/kg] y un coeficiente de variación del 95%, sin embargo, esta variedad no presenta la segunda mayor cantidad de hidrógeno en su composición elemental. Esto puede deberse a que durante esta quema no se favoreció la formación de agua como producto deseado en la combustión y la reacción se inclinó a formar H₂, debido a alguna condición en la combustión, como por ejemplo la temperatura alcanzada por la llama, la cual si no es lo suficientemente elevada la reacción no favorece la oxidación del hidrógeno para formación de agua, y se favorece la formación H₂.

Según los resultados para avena y *pellet* comercial, en promedio sus FE fueron de menor magnitud que para uva y pino, con un FE de 0,44 [g/kg] para avena y 0,32 [g/kg] para *pellet* comercial, además sus coeficientes de variación resultaron de un 24% y de un 22% respectivamente.

Para identificar la existencia de diferencias significativas entre las emisiones de H₂, se llevó a cabo el Test de Kruskal-Wallis, considerando que los datos no provienen de una distribución normal con un 95% de confianza. Se determina entonces, de acuerdo con los resultados observados en el Gráfico 8.63, que entre las medianas de los FE para H₂ de avena, pino y *pellet* comercial no existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza, de la misma forma que ocurre entre los FE de H₂ para pino y uva.

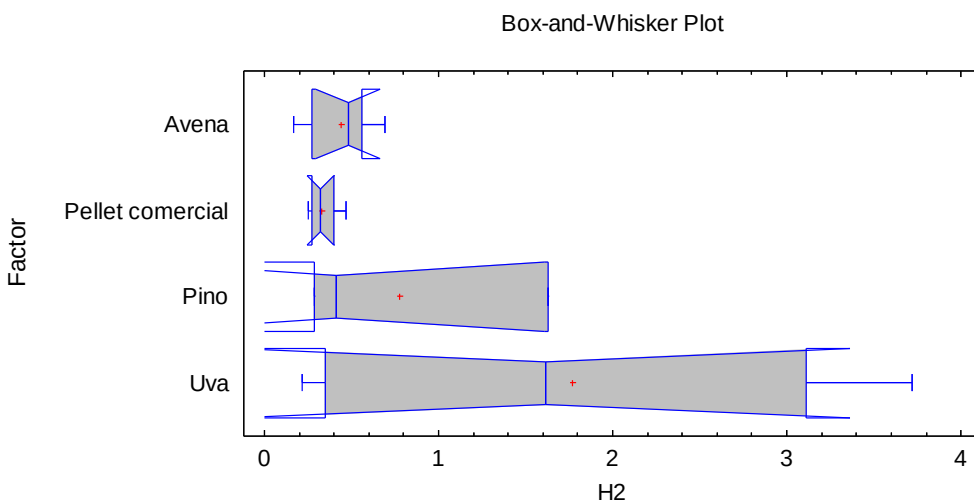


Gráfico 8.63 Gráfico de cajas y bigotes para los FE de H₂.

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta a continuación en el Gráfico 8.64, Gráfico 8.65, Gráfico 8.66 y Gráfico 8.67 el comportamiento en tiempo real del H₂ durante los ensayos de combustión. Se aprecia que en general este gas se comporta de forma similar para todas las variedades de biomasa., distinguiéndose un máximo local de emisiones en línea posterior a la fase de llama, entre los minutos 3 – 12 del ensayo. Este máximo global alcanzado durante la fase humeante de la combustión oscila entre 80 – 1.600 [ppm] dependiendo de la variedad de *pellet* quemada.

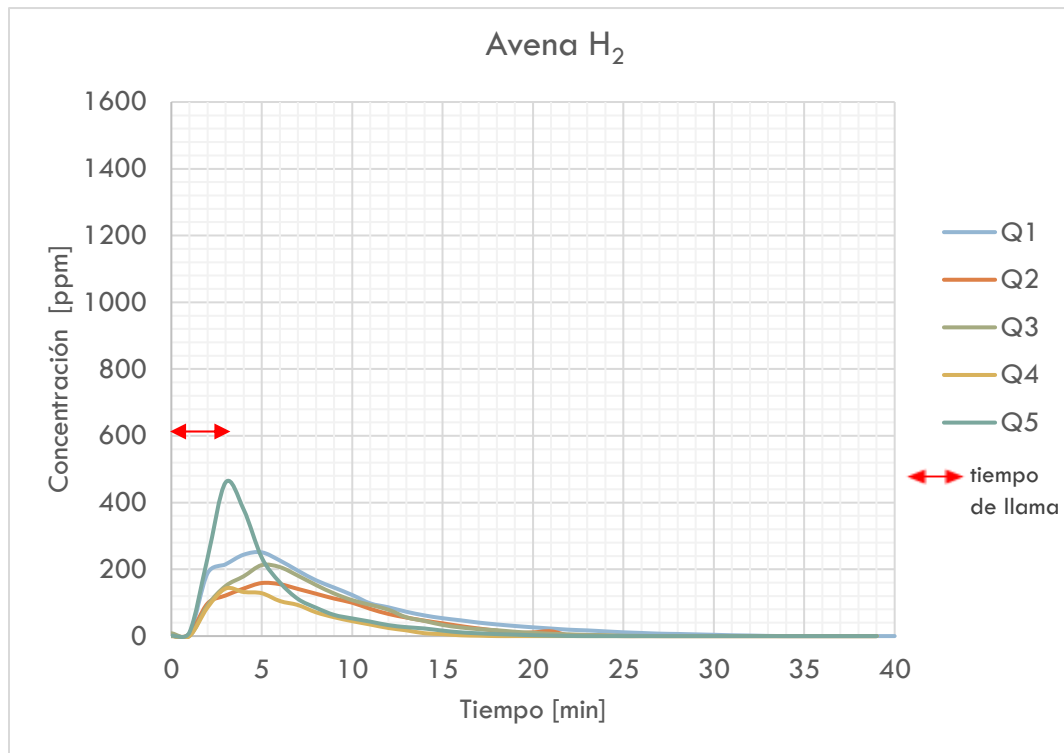


Gráfico 8.64 Emisiones en tiempo real de H_2 para avena.

Fuente: Elaboración propia.

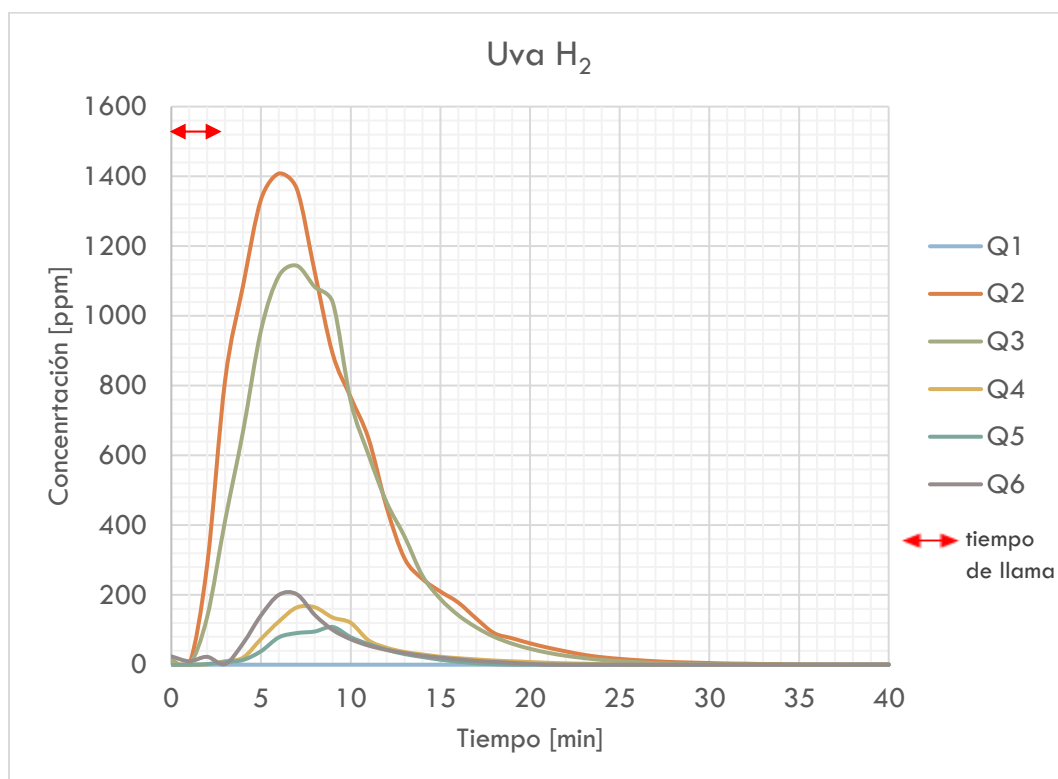


Gráfico 8.65 Emisiones en tiempo real de H_2 para uva.

Fuente: Elaboración propia.

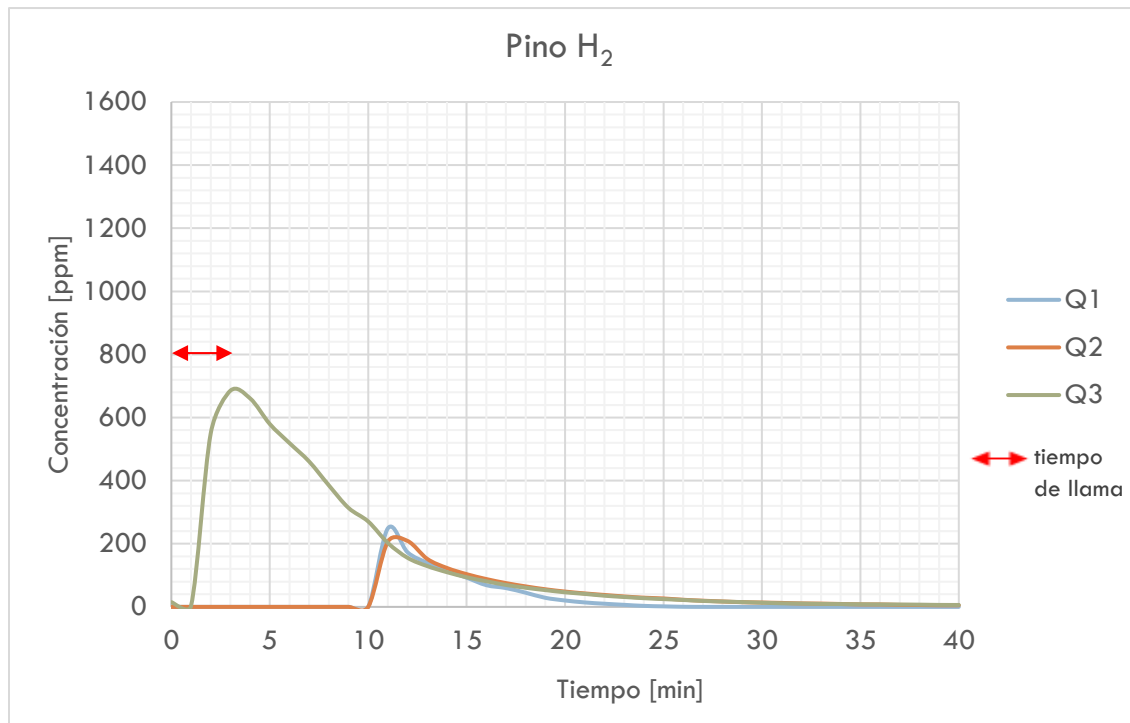


Gráfico 8.66 Emisiones en tiempo real de H_2 para pino.
Fuente: Elaboración propia.

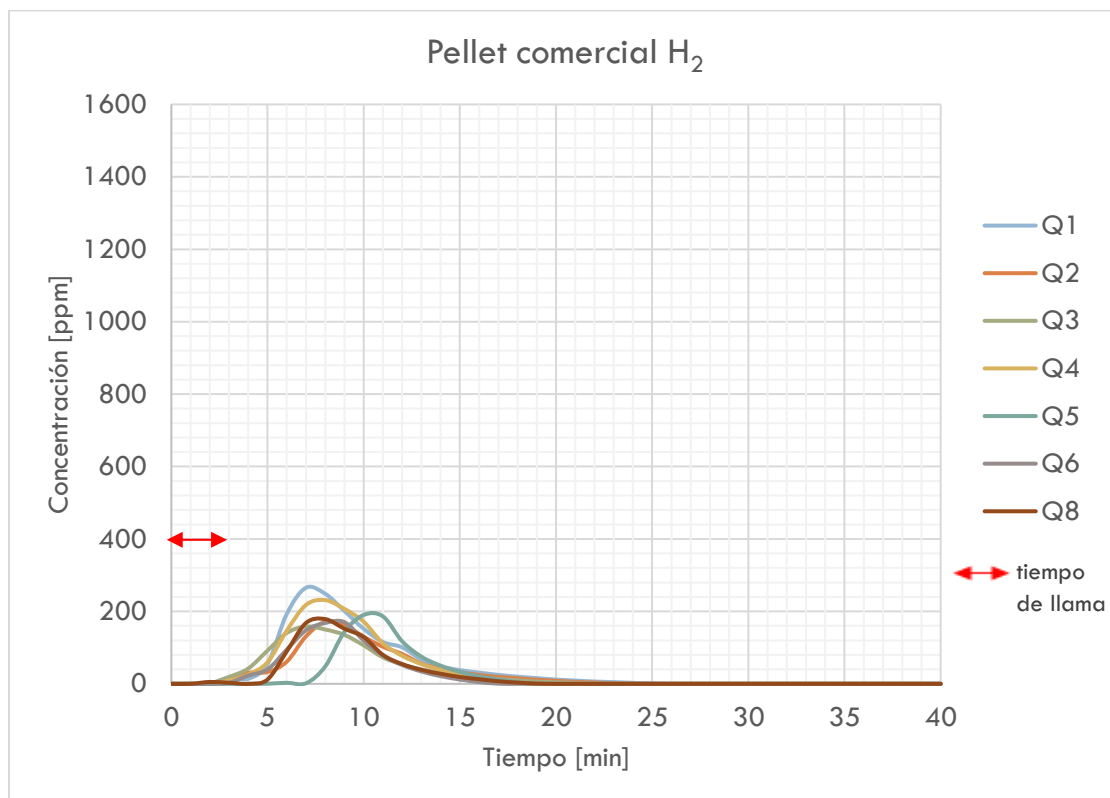


Gráfico 8.67 Emisiones en tiempo real de H_2 para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

8.4.7 Oxígeno molecular

A continuación en el Gráfico 8.68, Gráfico 8.69, Gráfico 8.70 y Gráfico 8.71 se presenta el comportamiento en tiempo real del O_2 durante los ensayos de combustión. Se aprecia que en general este gas se comporta de forma similar para todas las variedades de biomasa, de acuerdo con lo esperado teóricamente, ya que, al ser el comburente del proceso, comienza a agotarse durante la fase de llama, hasta alcanzar un mínimo global de concentración, que oscila entre 13 – 16 %. Posteriormente, finalizada esta etapa, las concentraciones de O_2 comienzan a aumentar hasta alcanzar la concentración habitual de oxígeno en el aire, lo cual ocurre aproximadamente transcurridos los primeros 25 minutos de la quema.

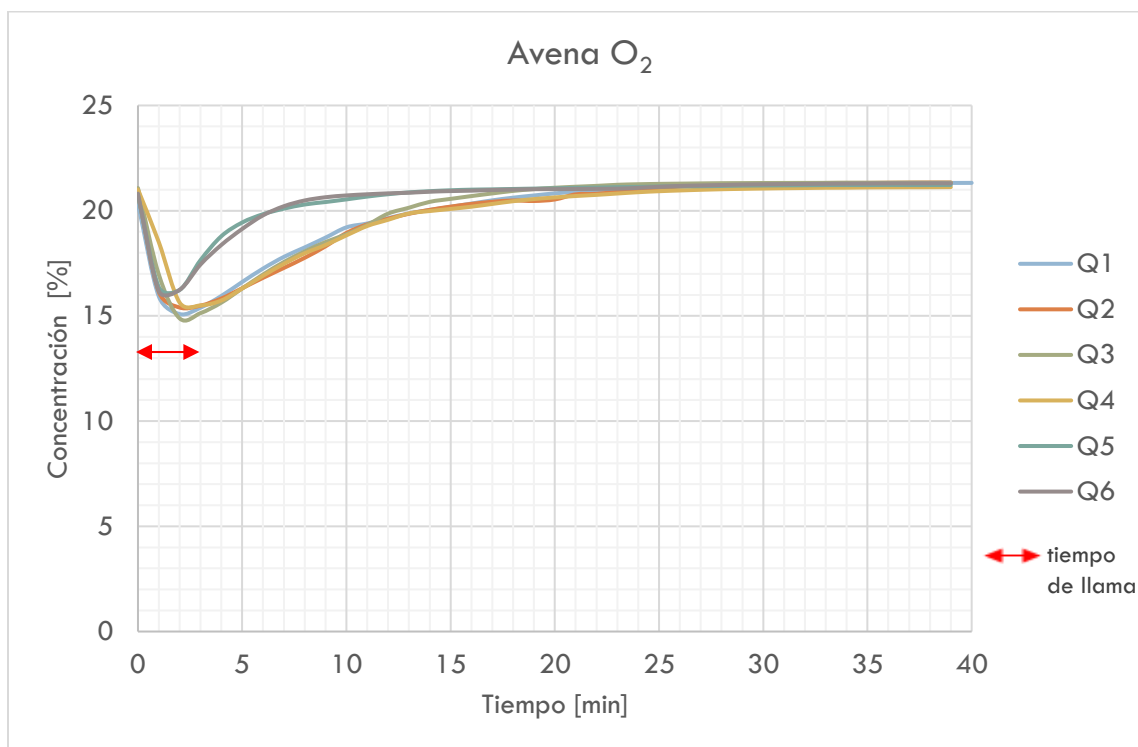


Gráfico 8.68 Emisiones en tiempo real de O_2 para avena.

Fuente: Elaboración propia.

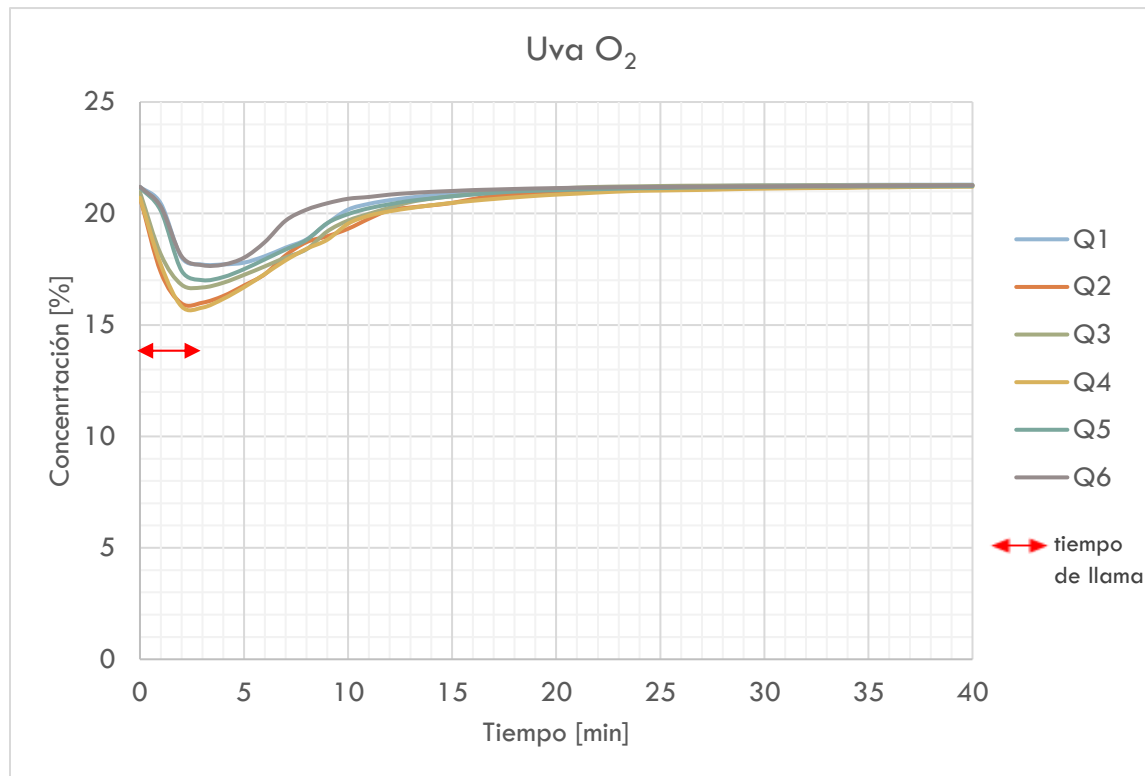


Gráfico 8.69 Emisiones en tiempo real de O₂ para uva.

Fuente: Elaboración propia.

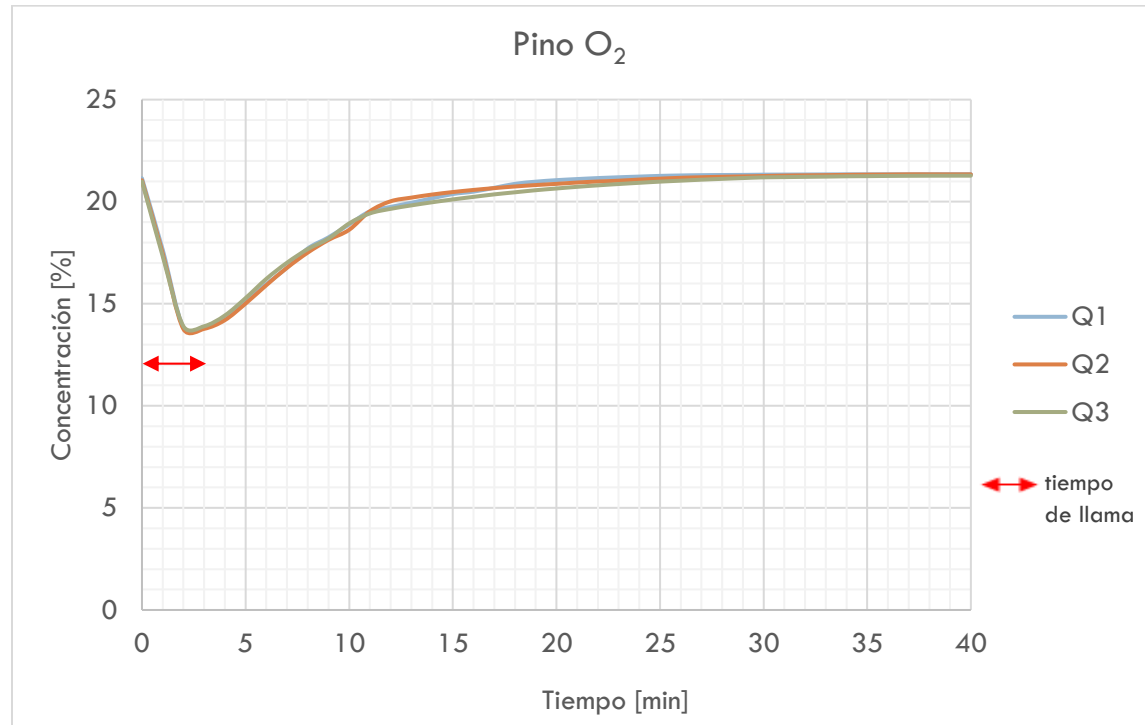


Gráfico 8.70 Emisiones en tiempo real de O₂ para pino.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 8.71 Emisiones en tiempo real de O₂ para pellet comercial.
Fuente: Elaboración propia.

8.5 Temperatura de llama

En la Tabla 8.33 se detallan los resultados medidos para las temperaturas máximas de llama alcanzadas en las quemas con avena, uva y pino, sin embargo, para *pellet* comercial no fue posible medirla debido a un problema en el termómetro que se disponía. Se aprecia que en promedio las quemas alcanzan temperaturas máximas por sobre los 600 [°C]. Al comparar las temperaturas de llama alcanzadas con los coeficientes de exceso de aire, se puede establecer que en apariencia existe una relación entre estos valores, ya que mientras mayor fue el exceso de aire ocupado, se generó una mayor temperatura de llama, por ejemplo, en el caso de la avena se ocupó un λ de 2,05, el mayor entre todas las biomásas, cuyas combustiones generaron en promedio temperaturas más elevadas que con uva y pino. De igual manera se corroborará esta afirmación realizando posteriormente un análisis de correlación de Spearman.

Tabla 8.33 Temperaturas máximas de llama.

Biomasa	N° Quema	T° máxima de llama [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Desv. Estándar	Coeficiente de variación [%]	λ
Avena	Q1	681,3	638,00	31,64	5	2,05
	Q2	634,8				
	Q3	628,9				
	Q4	-				
	Q5	650,4				
	Q6	594,6				
Uva	Q1	593,7	618,90	68,21	11	1,55
	Q2	615,4				
	Q3	616,2				
	Q4	511,3				
	Q5	662,2				
	Q6	714,6				
Pino	Q1	621,2	635,87	13,18	2	1,91
	Q2	639,7				
	Q3	646,7				

Fuente: Elaboración propia.

Para identificar las diferencias obtenidas con respecto a las temperaturas de llama, se llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, cuyos resultados se exponen en la Tabla 8.34, la que representa el test de rangos múltiples obtenido mediante el procedimiento de diferencia mínima LSD de Fisher, dado que el conjunto de datos de las temperaturas proviene de una distribución normal, con un 95% de confianza. Mediante esta prueba se establece que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las

temperaturas máximas alcanzadas durante las quemas con uva, avena y pino, con un 95% de confianza.

Tabla 8.34 Test de rangos múltiples para T° de llama.

Method: 95,0 percent LSD

<i>Factor</i>	<i>Count</i>	<i>Mean</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
Uva	6	618,9	X
Pino	3	635,867	X
Avena	5	638,0	X

Fuente: Elaboración propia.

8.6 Caracterización de cenizas

En la Tabla 8.35 se resumen los resultados obtenidos mediante el análisis XRF realizado a las cenizas de avena, uva y *pellet* comercial, donde se distinguen todos los elementos y óxidos detectados, sin embargo el equipo XRF también es capaz de medir Co, As, Se, Y, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th y U, los cuales resultaron mostrar concentraciones por debajo del límite de detección del equipo para todas las cenizas estudiadas.

Tabla 8.35 Resultados análisis XRF para cenizas.

%	Avena	Uva	Pellet comercial
MgO	1,73	2,79	5,33
Al₂O₃	0,00	1,10	1,37
SiO₂	34,89	0,00	0,00
P₂O₅	1,02	2,60	1,78
S	0,12	0,58	0,40
Cl	0,09	0,48	0,02
K₂O	7,88	22,07	7,38
CaO	1,36	2,94	10,48
Ti	0,01	0,01	0,00
V	0,00	0,01	0,06
Cr	0,21	0,47	7,07
Mn	0,05	0,06	0,37
Fe	0,91	1,98	20,00
Ni	0,20	0,25	5,21
Cu	0,02	0,02	0,15
Zn	0,05	0,01	0,03
Rb	0,05	0,02	0,04
Sr	0,01	0,05	0,08
Zr	0,00	0,01	0,01
Mo	0,00	0,00	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que las cenizas de avena presentaron un contenido importante de SiO₂, en un 34,89% y de K₂O en un 7,88%, de igual manera las cenizas de uva presentan K₂O con un porcentaje elevado del 22,07%. Por otra parte, con respecto al *pellet* comercial, se distingue que sus cenizas presentan altos porcentajes de Fe con un 20%, de CaO con un 10,48, de K₂O con 7,38%, de Cr con 7,07%, de Ni con 5,21%. A continuación, en el

Gráfico 8.72 se expone un esquema de los componentes principales que se detectaron en las cenizas para cada biomasa con el fin de visualizar más claramente su composición.

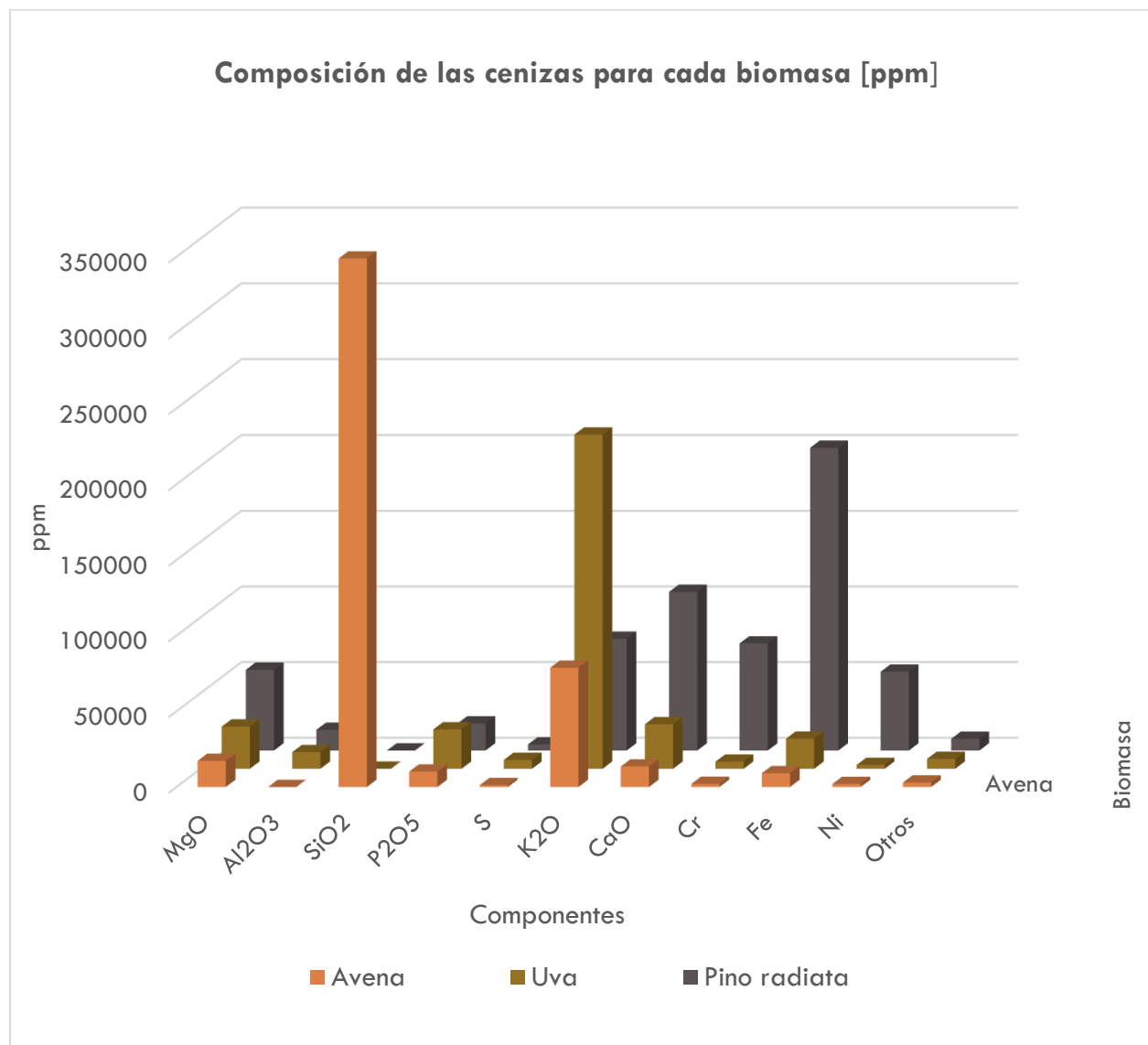


Gráfico 8.72 Caracterización de cenizas.

Fuente: Elaboración propia.

Resulta llamativo el gran porcentaje de metales contenidos en las cenizas del *pellet* comercial (pino radiata), considerando que la empresa Ecomas informa en sus análisis de laboratorio que esta biomasa presenta índices de Cr y Ni por debajo del 1%, de manera que en un principio podría suponerse que estas cenizas estuvieran contaminadas con algún elemento externo. Al verificar la composición de acero inoxidable 316, que conforma la 3CE y el soporte donde se quema la biomasa, se aprecia que sus componentes principales son Fe, Cr y Ni (Carbone, 2019), los que coinciden con los altos índices detectados de estos metales en la ceniza del *pellet* comercial, lo cual resulta muy coincidente teniendo en cuenta

que el *pellet* comercial generó muy poca cantidad de ceniza, por lo que para recolectarla se debía arrastrar enérgicamente con una brocha la poca cantidad que quedaba en el soporte de biomasa tras la combustión, en ese proceso la ceniza se pudo haber contaminado con desechos metálicos producto del calentamiento del soporte, efecto que no alcanza a evidenciarse con las demás cenizas, dado que eran mucho más abundantes, y para recolectarlas no se requería arrastrarlas enérgicamente del soporte. Además, el hecho de que las cenizas de uva y avena hayan sido más abundantes puede haber provocado que al disponerlas en el porta muestra para la lectura con la pistola XRF, si es que hubieran estado igualmente contaminadas, el porcentaje de los metales detectados hubiera resultado en menor concentración ya que la ceniza original se encontraba en gran cantidad, por lo que la supuesta contaminación pudo haberse enmascarado.

8.6.1 Porcentajes de volatilización

Debido a que el azufre (S) y el cloro (Cl) corresponden a los únicos elementos medidos tanto en la biomasa inicial sin quemar, y a la vez en las cenizas, es posible calcular los porcentajes de volatilización para estos elementos. En la Tabla 8.36 se resumen los resultados de este cálculo, y en el Gráfico 8.73 y Gráfico 8.74 se esquematizan esta diferencias.

Tabla 8.36 %Volatilización S y Cl.

Biomasa	% Volatilización S	% Volatilización Cl
Avena	89,06	98,37
Uva	85,44	88,85
Pellet comercial	79,85	99,26

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que en general los %Volatilización de S y Cl para todas las biomásas estudiadas, resultan muy elevados con valores que igualan o superan el 80% en todos los casos. No obstante, es posible notar que el Cl se volatiliza ligeramente en un porcentaje mayor con respecto al S para cada biomasa ensayada, superando el 88% de volatilización, resulta importante destacar para el caso del *pellet* comercial, el Cl resulta volatilizado casi por completo, con un porcentaje de volatilización del 99,26%.

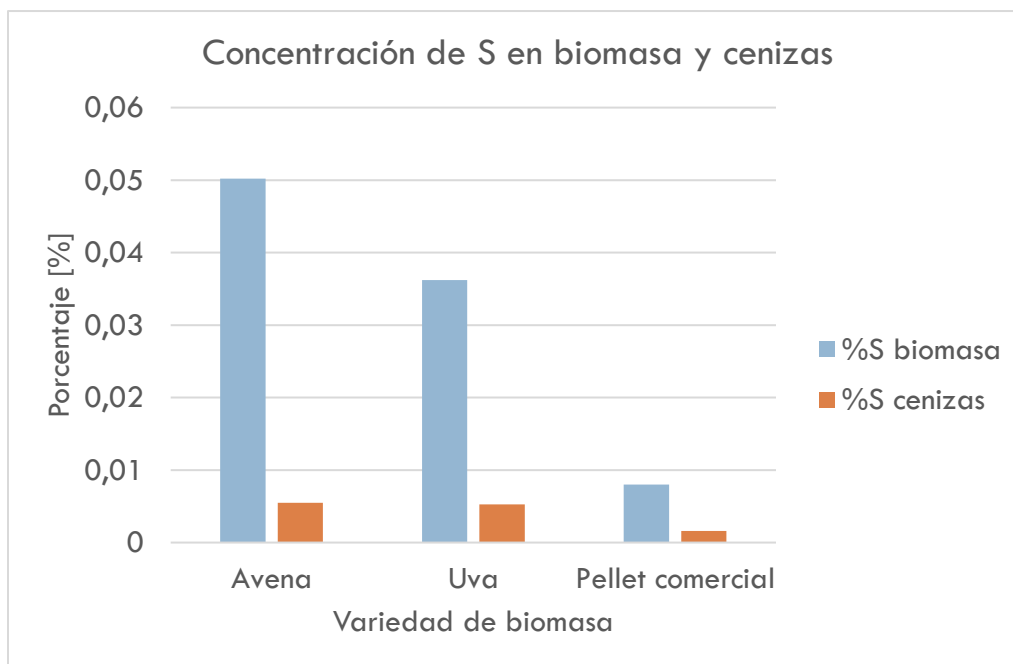


Gráfico 8.73 Comparación %S en cenizas y biomasa.
Fuente: Elaboración propia.

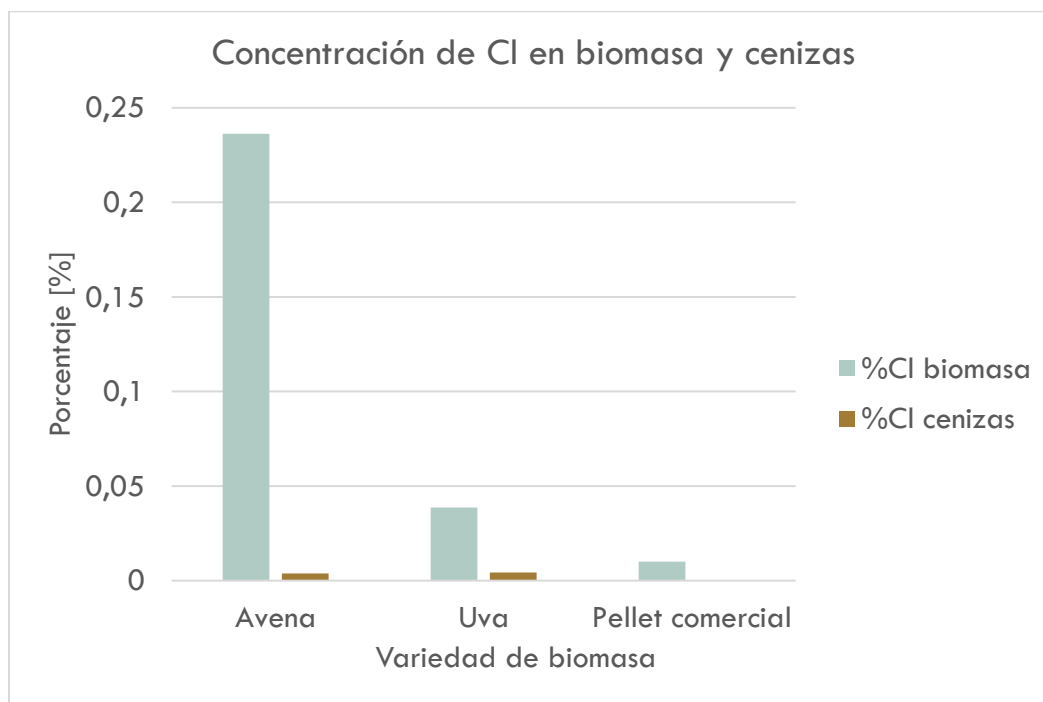


Gráfico 8.74 Comparación %Cl en cenizas y biomasa.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los Gráfico 8.73 y Gráfico 8.74, se distingue que existe una cantidad inicial de Cl en cada biomasa superior a la cantidad de S que presenta, de manera que considerando sus elevados índices de volatilización, se espera que en las emisiones tanto de

uva, avena y *pellet* comercial existe una mayor cantidad de compuestos derivados del Cl, en comparación con la cantidad de componentes derivados del S.

A pesar de que las concentraciones de Cl y S en la biomasa sin quemar hayan sido medidas con análisis elemental, técnica diferente a la utilizada para analizar las cenizas (XRF), de todas formas, los resultados resultan consistentes.

8.6.2 Grado de escorificación

Para determinar el grado de escorificación que presentan las cenizas, Niu et al. (2014) establece los siguientes criterios de clasificación:

Tabla 8.37 Criterio grado de escorificación.

Grado de escorificación	Ratio Cl	Ratio S
Baja	< 1	< 0,5
Media	1 – 2,4	0,5 – 1,9
Severa	> 2,4	> 1,9

Fuente: Elaboración propia con datos de Niu et al. (2014).

Para el cálculo de los índices de escorificación se requiere conocer la composición con respecto a los siguientes óxidos presentes en las cenizas: Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 y K_2O . Si bien el equipo Analizador XRF S1 Titan Bruker es capaz de detectar Al_2O_3 , SiO_2 y K_2O , no presenta la capacidad de determinar el Na_2O , de manera que para el cálculo de las ratios se utilizó una concentración referencial de Na_2O diferente para cada tipo de biomasa. Para el cálculo para avena se ocupó la concentración de Na_2O obtenida por Acharya et al. (2014) con respecto a cenizas de paja de avena, para uva se utilizó el dato informado por Van Eyk y Ashman (2010) con respecto a cenizas de orujos de uva, y finalmente para *pellet* comercial se utilizó la información entregada por Nogués, García-Galindo y Rezeau (2010), respecto a cenizas de pino radiata.

A continuación, en la Tabla 8.38 se presentan los resultados obtenidos respecto a los índices de escorificación, denominados ratio S y ratio Cl. Se establece que la avena resulta ser la única variedad de biomasa estudiada que presenta un bajo índice de escorificación, en cambio, tanto la uva como el *pellet* comercial resultan con una tendencia severa a formar escoria, esto ocurre debido a la elevada composición de sus cenizas respecto a K_2O , el cual da lugar a la formación de KCl y $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$, componentes que aceleran la creación de una capa inicial de escoria y contribuyen al desarrollo de capas previamente formadas. Si

bien, la ceniza de avena presenta un mayor porcentaje de K_2O (7,88%) que el *pellet* comercial (7,38%), el ratio Cl y ratio S resultan menores debido a que las cantidades de K_2O se ven compensadas por la alta concentración de SiO_2 (34,89%), lo cual inhibe la formación de KCl y $K_3Na(SO_4)_2$, retardando entonces la formación de escoria (Niu et al., 2014).

Si bien la uva y el *pellet* comercial son clasificados con tendencia severa a la escorificación, comparativamente entre ambos la uva presenta una tendencia mayor a formar escoria, considerando a sus elevados ratio Cl y ratio S.

Tabla 8.38 Parámetros de escorificación.

Biomasa	% Ceniza	XRF Cenizas				S ratio	Cl ratio	Tendencia a escorificación
		Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	K_2O			
Avena	4,44	0,47*	0,00	34,89	7,88	0,27	0,39	Baja
Uva	0,9	0,47*	1,10	0,00	22,073	23,62	24,39	Severa
Pellet comercial	0,16	0,87*	1,37	0,00	7,38	7,21	7,87	Severa

Nota: *La concentración de Na_2O en las cenizas de avena, uva y *pellet* comercial se obtuvieron respectivamente de Acharya et al. (2014), Van Eyk y Ashman (2010) y Nogués, García-Galindo y Rezeau (2010).

Fuente: Elaboración propia.

8.6.3 Comparación con normativa ENPlus y NCh ISO 17255

A continuación, en la Tabla 8.39 se comparan las propiedades que presentan los pellets estudiados, frente a lo establecido por la norma de estandarización internacional ENPlus y por la NCh ISO 17255/2017. Debido a que no se cuenta con información respecto a la concentración de metales pesados en la biomasa inicial sin quemar, se utilizará como aproximación la cantidad de estos metales detectados en las cenizas, escalados a través de un cálculo de proporciones.

Al comparar la normativa internacional de estandarización de pellets con la normativa chilena, se aprecia que la normativa EnPlus es más rigurosa con respecto a los límites permitidos de metales, de N, de S, de Cl, de As y con respecto a la cantidad de cenizas y aditivos, además de definir fuentes y orígenes específicos de la obtención de la biomasa, en cambio la normativa nacional es más rigurosa solamente con respecto al poder calorífico.

Se establece entonces, de acuerdo con lo informado en la Tabla 8.39, que todos los pellets estudiados cumplen con las máximas concentraciones permitidas de metales pesados según la norma ENPlus. No obstante, para el caso de la concentración de Cl, tanto los pellets de avena como de uva sobrepasan dicha norma, sin embargo, están dentro de los rangos permitidos por la normativa chilena NCh ISO 17255/2017. Con respecto a los niveles de S, todas las biomásas cumplen con ambas normativas, excepto el pellet de pino, que solamente cumple con NCh ISO 17255/2017. Para el caso del %N, todas las variedades respetan ambas normativas, excepto la avena que con 0,49% no cumple con ninguno de los límites establecidos.

Con respecto a la cantidad de aditivos, todas las biomásas cumplen con la normativa ya que no presentan algún aglomerante u otro componente en sus estructuras. En lo referente al poder calorífico inferior, todos los pellets cumplen con la normativa internacional, sin embargo, la avena no logra alcanzar los 18 [MJ/kg] que requiere a normativa chilena, no obstante, si cumple con los requerimientos de ENPlus. Respecto al porcentaje de cenizas, solamente la avena, que presenta un 4,4% de cenizas, no logra cumplir con ambas normas.

Cabe destacar que el pellet comercial estudiado cumple con todas las características de estandarización internacional ENPlus y con NCh ISO 17255/201, en cambio los pellets de uva y el pino solamente cumplen en totalidad con lo establecido en la normativa chilena, ya que al estar conformados con residuos agrícolas no son aptos para ser admitidos por la normativa internacional EnPlus.

Tabla 8.39 Comparación características y composición de pellets con ENPlus y NCh ISO 17255.

Propiedad	ENPlus A1	ENPlus A2	ENPlus B	NCh ISO 17225	P.Comercial	Pino	Avena	Uva
Origen y fuente	-Leña del tronco del árbol -Residuos y subproductos de madera	-Árboles enteros -Leña del tronco del árbol - Residuos de corta - Residuos y subproductos	-Biomasa leñosa plantación Residuos de madera -Madera procedente de otros usos, sin tratamiento químico	Biomasa leñosa, biomasa herbácea, biomasa de frutos, biomasa acuática, conjuntos y mezclas	Cultivo energético de pino radiata	Aserrín de pino radiata	Cáscaras y paja de avena	Orujos de uva
Ceniza	< 0,7%	< 1,2 %	< 2,0 %	< 0,5% - 10%	0,16 %	0,21 %	4,44 %	0,90%
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	> 16,56			> 18	18,04	18,58	17,06	18,47
Aditivos	< 2 %			< 20%	0 %	0 %	0 %	0 %
Nitrógeno	< 0,3 %	< 0,5 %	< 1,0 %	< 0,2% - 3%	0,07 %	0,07 %	0,49 %	0,08 %
Azufre	< 0,04 %	< 0,05 %		< 0,02% – 0,2%	0,008 %	0,08 %	0,05 %	0,04 %
Cloro	< 0,02 %		< 0,03 %	< 0,01% - 0,3%	0,01 %	0,02 %	0,24 %	0,04 %
Arsénico	< 0,0001 %			-	0 %*	-	0 %*	0 %*
Cadmio	< 0,00005 %			-	0 %*	-	0 %*	0 %*
Cromo	< 0,001 %			-	1,1*10 ⁻⁴ %	-	2,1*10 ⁻⁴ %	1,8*10 ⁻⁵ %
Cobre	< 0,001 %			-	2,5*10 ⁻⁶ %	-	8,4*10 ⁻⁶ %	2,2*10 ⁻⁶ %
Plomo	< 0,001 %			-	<1 *10 ⁻⁴ %*	-	<1 *10 ⁻⁴ %*	<1 *10 ⁻⁴ %*
Mercurio	< 0,00001 %			-	<1 *10 ⁻⁴ %*	-	<1 *10 ⁻⁴ %*	<1 *10 ⁻⁴ %*
Níquel	< 0,001 %			-	8,3*10 ⁻⁵ %	-	9,0*10 ⁻⁵ %	2,3*10 ⁻⁵ %
Zinc	< 0,01 %			-	5,0*10 ⁻⁷ %	-	2,3*10 ⁻⁷ %	4,5*10 ⁻⁷ %

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por European Pellet Council (2015b) y de NCh ISO 17225 (2017).

*Corresponden a cantidades menores a 1 *10⁻⁴ %* ya que están por debajo del límite de detección del equipo XRF S1 Titan, de 0,0001%.

8.7 Análisis de correlación de Spearman

Como se mencionó en el apartado del tratamiento estadístico, se expone a continuación los resultados de la prueba de correlación de Spearman, la cual establece que los siguientes pares de variables medidas o calculadas se correlacionan entre sí, con un 95% de confianza:

- PM1 y PM2,5
- PM1 y PM10
- PM1 y N° de partículas
- PM2,5 y PM10
- PM2,5 y N° de partículas
- PM10 y N° de partículas
- BC y BrC
- BC y Rendimiento de combustión
- N° de partículas y Rendimiento de quemado
- CO₂ y Rendimiento de combustión
- CO y NO
- CO y NO_x
- NO y NO_x
- SO₂ y Rendimiento de combustión
- Rendimiento de combustión y Rendimiento de quemado
- Rendimiento de quemado y Lambda

Resulta razonable que las emisiones de PM1, PM10, PM2,5 y N° de partículas se correlacionen entre sí, ya que corresponden en esencia al mismo tipo de contaminante.

También resulta lógico que se correlacionen el rendimiento de combustión con el rendimiento de quemado, debido a que estos índices se calculan a partir de las emisiones de CO₂ generadas. Además, resulta razonables también que se correlacionen con el factor lambda, ya que este valor es usado en los cálculos del rendimiento.

Con respecto al BC y al BrC, ambos corresponden a material particulado carbonoso por lo que resulta razonable que se encuentren correlacionados.

Para el caso de NO y NO_x, igualmente resulta lógico se correlacionen debido a que el NO es parte de los óxidos de nitrógeno.

No obstante, para los siguientes pares de mediciones no resultan en apariencia contrastantes con lo esperado teóricamente:

- BC y Rendimiento de combustión
- N° de partículas y Rendimiento de quemado
- CO y NO
- CO y NO_x
- SO₂ y Rendimiento de combustión

Por lo que para afirmar definitivamente si estos resultados se correlacionan entre sí, se sugiere realizar mayor cantidad de repeticiones para las quemas con cada tipo de biomasa, debido a que una baja cantidad de repeticiones puede estar causando resultados sesgados.

Por otra parte, a pesar de que anteriormente se identificó una aparente relación entre la temperatura de llama y el factor de exceso de aire, esto no pudo comprobarse con el análisis de correlación de Spearman.

9. Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que las adaptaciones realizadas a la 3CE resultaron adecuadas para cumplir con el objetivo de combustionar *pellets* de forma reproducible con todas las variedades de biomasa ensayadas. Además, se comprobó que la limpieza química y térmica realizada a la 3CE resulta satisfactoria, ya que el aporte externo de contaminantes durante las pruebas de combustión resulta marginal e inferior al 1% en cuanto al PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀, BC, BrC, CO, H₂ y SO₂, inferior al 1,4% en cuanto al N° de partículas e inferior al 4% con respecto al NO_x.

Con respecto a los FE obtenidos para las concentraciones de material particulado, se identificaron un total de 8 valores atípicos, los que fueron descartados en los cálculos de promedio y desviación estándar para no causar sesgos en los resultados. Estos *outliers* se concentraron principalmente en los FE de la quema Q3 con avena. De la misma forma se encontró solamente un valor atípico en los FE de los gases de combustión.

Se determinó que la concentración de PM₁₀ medida en todas las quemas de combustión se ve representada principalmente por material particulado ultrafino (PM₁) en más de un 89% en promedio para cada tipo de biomasa. Lo cual coincide al contrastarlo con el N° de partículas detectadas las cuales se concentran principalmente en la moda Aitken, en más de un 58% del total, y en la moda de acumulación, con un 17% del total, con tamaños entre 0,02 – 0,1 [μm], cuya distribución se comportan de manera cualitativa y cuantitativamente de acuerdo con lo esperado teóricamente según lo expuesto por EPA (1996) y Whitby (1978).

Mediante espectrometría láser se obtuvieron los FE en los ensayos de combustión para concentraciones de PM₁₀ con valores de $0,35 \pm 0,32$ [g/kg] en los ensayos con avena, de $0,59 \pm 0,46$ [g/kg] con uva, de $2,78 \pm 0,96$ [g/kg] con pino y de $3,24 \pm 0,91$ con *pellet* comercial, por otra parte los FE de PM_{2,5} resultaron de $0,33 \pm 0,32$ [g/kg] para quemas con avena, $0,59 \pm 0,46$ [g/kg] para uva, $2,35 \pm 0,69$ [g/kg] para pino y $2,84 \pm 0,78$ [g/kg] para *pellet* comercial. De acuerdo con el tratamiento estadístico realizado se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas para las medias de los FE de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀ entre uva con avena, y entre pino con *pellet* comercial, con un 95% de confianza, lo cual puede explicarse debido al origen de la biomasa combustionada, ya que en el caso de pino y *pellet* comercial ambas corresponden a aserrín de pino radiata.

Se determinó que en general todos los ensayos con avena presentaron una alta variabilidad entre sí, con coeficientes de variación superiores al 90% respecto a los FE de PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀ y N° de partículas, incluso descartando la desviación que proporciona el valor atípico de la quema Q3. Por lo tanto, se sugiere realizar mayor cantidad de ensayos para esta

biomasa con el fin identificar si realmente es posible descartar completamente los datos atípicos de Q3, o si resulta relevante seguirla considerando.

Se concluye que la compactación del material que conforma los *pellets* de uva tuvo incidencia en sus emisiones de PM, considerando los resultados de la quema Q1, la cual se efectuó con biomasa que presentó bajas condiciones de compactación, generándose en promedio mayores emisiones de PM en comparación con los demás ensayos con uva, superando en un 350% las emisiones producidas a partir de biomasa más compacta, de manera que se recomienda repetir este ensayo utilizando *pellets* de uva conformados adecuadamente.

En cuanto a los FE de BC resultaron de un $0,084 \pm 0,011$ [g/kg] para los ensayos con avena, de $0,080 \pm 0,023$ [g/kg] con uva, de $0,081 \pm 0,002$ [g/kg] con pino y de $0,027 \pm 0,015$ [g/kg] con *pellet* comercial, por otra parte los FE de BrC resultaron de $0,036 \pm 0,004$ [g/kg] para quemas con avena, $0,038 \pm 0,009$ [g/kg] para uva, $0,037 \pm 0,002$ [g/kg] para pino y $0,025 \pm 0,004$ para *pellet* comercial. De acuerdo con el tratamiento estadístico realizado, se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los FE de BrC para todas las biomásas y entre las medias de los FE de BC para avena, uva y pino, con un 95% de confianza.

Se concluye que, para la combustión de todos los tipos de biomásas ensayadas, el BC y el BrC representan una mínima parte de las emisiones totales de PM₁, donde el BC equivale entre un 0,97 – 26% del PM₁ y el BrC equivale entre un 1,1 – 11%.

Se establece además, que para las biomásas de avena, uva y pino, sus FE promedio para BC resultaron ser aproximadamente el doble que para BrC, sin embargo esto no ocurrió con *pellet* comercial, ya que en este caso el FE de BC resultó ser muy parecido al FE de BrC, el que representó el 93% del BC. Esto puede explicarse debido al diferente origen y composición que presenta el *pellet* comercial, ya que si bien corresponde a pino radiata al igual que otra de las variedades ensayadas, este material proviene originalmente de un cultivo energético y no solamente de residuos de aserraderos, como el caso de la variedad de pino, los cuales pueden provenir de alguna zona en específico del árbol, causando así diferencias en la composición de la biomasa. De manera que resulta importante conocer la composición elemental del *pellet* comercial para verificar las diferencias entre los resultados obtenidos.

Considerando las emisiones de CO₂, fue posible calcular el rendimiento de combustión, cuyo máximo resultado fue alcanzado por la variedad de pino ($\lambda = 1,91$), con un 46,24% lo que indica que para este material ocurrieron mayores pérdidas de energía debido al exceso de aire con el que fue quemado, en comparación con avena ($\lambda = 2,05$) que presentó un rendimiento de combustión ligeramente menor, del 41,69% y con uva ($\lambda = 1,55$) que resultó

de un 35,56%, con menores pérdidas de energía, considerando también que su coeficiente de exceso de aire fue el más bajo de todos.

Se concluye que dentro de todas las biomásas ensayadas, la variedad de pino fue la que en el proceso logró quemarse en un mayor porcentaje, presentando un rendimiento de quemado del 90,10 %, lo cual coincide con la baja cantidad de cenizas generadas, las cuales no pudieron recolectarse. En comparación al pino, la variedad de avena logró quemarse en un 87,63% y finalmente la uva mostró un rendimiento de quemado mucho menor, del 52,97%, resultado que en promedio constituye una diferencia estadísticamente significativa, con un 95% de confianza, frente a los rendimientos de las demás biomásas.

Se determinó que las quemas con uva emitieron en promedio una mayor cantidad de CO durante los ensayos, con un FE promedio de $181,39 \pm 131$ [g/kg], lo cual se relaciona con su bajo rendimiento de quemado, del 52,97%, y con la escasa consolidación que presentaron los *pellets* de la primera partida de esta biomasa. En el caso del pino, sus resultados para el FE de CO fueron de 142 ± 18 [g/kg], y para avena y pino, de $90,71 \pm 11$ [g/kg] y $60,4 \pm 8$ [g/kg] respectivamente, por lo que puede establecerse que la combustión en estos casos se llevó a cabo de manera más completa que para las demás variedades de *pellets*.

Con respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno se determinó que la variedad de uva emitió comparativamente una mayor cantidad de NO_x con un FE promedio de $7,6 \pm 1,8$ [g/kg], seguida de la avena con $5,4 \pm 1,8$ [g/kg] y finalmente pino y pellet comercial, con FE de $1,5 \pm 0,57$ [g/kg] y $1,3 \pm 0,5$ [g/kg] respectivamente, de los cuales se establecen que no existen diferencias estadísticamente significativas para las medias de los FE entre uva con avena y entre pino con *pellet* comercial, un 95% de confianza.

Se establece que el FE de SO₂ para el *pellet* de pino resultó de $3,5 \pm 1,9$ [g/kg], para el *pellet* de avena de $1,6 \pm 0,9$ [g/kg], para el caso de la uva de $0,9 \pm 1,1$ [g/kg] y para el *pellet* comercial, con un valor de $0,00013 \pm 0,0003$ [g/kg], determinándose que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los FE para pino y avena con un 95% de confianza.

Con respecto a las emisiones de hidrógeno molecular se determinó que la variedad de uva emitió comparativamente una mayor cantidad de H₂ con un FE promedio de $1,8 \pm 1,6$ [g/kg], seguida del pino con $0,8 \pm 0,7$ [g/kg] y finalmente avena y pellet comercial, con FE de $0,4 \pm 0,2$ [g/kg] y $0,3 \pm 0,07$ [g/kg] respectivamente, de los cuales se establecen que no existen diferencias estadísticamente significativas para las medianas de los FE entre avena, pino y *pellet* comercial, un 95% de confianza.

Se concluye que a pesar de que los ensayos con *pellets* de avena y uva generaron menor cantidad de emisiones de material particulado, en comparación con pino y *pellet* comercial, a su vez generaron mayor cantidad de emisiones de CO, de NO_x y de SO₂ en promedio con respecto a las demás biomásas. De manera contraria ocurre con pino y *pellet* comercial, los que en general emitieron en promedio mayor cantidad de partículas, pero menor cantidad de gases contaminantes durante los ensayos.

Se establece que la consolidación de los *pellets* es un factor clave en la correcta combustión de la biomasa, debido a que afecta tanto a las emisiones de partículas, como a las emisiones gaseosas, generando un aumento de estos contaminantes si es que el material no se encuentra bien consolidado, lo cual pudo comprobarse al comparar las emisiones de las quemas con uva Q1, Q2 y Q3 versus Q4, Q5 y Q6. De manera que se sugiere optimizar el procedimiento de peletizado para lograr que la biomasa se compacte mejor, ocupando una presión de consolidación mayor a 70 [bar]. Por otra parte, para homogenizar los tamaños y formas de los pellets, se sugiere estandarizar la granulometría del material previo a ser peletizado, consiguiendo que el tamaño de las partículas sea menor al diámetro del pellet a fabricar, con el objetivo de que posteriormente se consolide el material de mejor manera. En general se sugiere que se establezca un protocolo para estandarizar la fabricación de los *pellets*, que incluya una etapa previa de molienda, que presente un tiempo de peletizado específico garantizando la consolidación correcta del material, y una temperatura adecuada de peletizado para evitar que la biomasa se caramelize.

Se determinó que en Chile existe una elevada emisión de residuos de paja y cáscara de avena, alrededor de 700.000 toneladas anuales, lo que constituye un gran potencial energético, al igual que los orujos de uva. Considerando las bajas emisiones de material particulado que generan en condiciones controladas de combustión los *pellets* de avena y uva, si los residuos actuales se peletizaran de manera adecuada resultarían potenciales productos sustitutos al *pellet* comercial, que está fabricado en base a pino radiata.

Se determinó que al comparar los pellets estudiados con la normativa internacional de estandarización ENPlus y con la norma chilena NCh ISO 17255/2017, el *pellet* comercial estudiado logra cumplir con ambos estándares, en cambio los *pellets* de uva y pino solamente cumplen con lo establecido en la normativa chilena, de acuerdo con los parámetros medidos experimentalmente, en contraposición de la avena que no cumple para ambos casos. Por lo tanto, si se desea incluir los *pellets* de avena en el mercado, como un producto sustituto al *pellet* comercial, dada su característica de presentar un bajo índice de escorificación y menores emisiones de PM, sería recomendable mezclarlo con otro material, como pino por ejemplo, para elevar su poder calorífico y reducir su contenido de nitrógeno y porcentaje de cenizas. Cabe destacar que para cumplir con las normativas también deben estudiarse la capacidad higroscópica que presenta el material, el tamaño, la densidad a granel y la durabilidad mecánica.

Se concluye que el Programa de Recambio de Calefactores resulta satisfactorio en todas las regiones si es que fueran reemplazados todos los equipos de calefacción actuales, por equipos que combustionen *pellets* conformados a partir de paja y cáscara de avena o de orujo de uva, con la más baja humedad posible, cumpliendo así con la normativa DS N°39/2012. De todas formas, resulta recomendable realizar pruebas con *pellets* que presenten una humedad más elevadas para determinar si en esos casos se sigue cumpliendo con la normativa.

Con respecto al análisis XRF, se determina que las cenizas de avena presentaron un contenido importante de SiO₂, en un 34,89% y de K₂O en un 7,88%, de igual manera las cenizas de uva presentan K₂O con un porcentaje elevado, del 22,07%. Por otra parte, con respecto al *pellet* comercial, se concluye que posiblemente sus cenizas están contaminadas con parte del material que conforma el soporte para la biomasa en la cámara 3CE, dado sus altos índices de Fe, Cr y Ni, los cuales son componentes del acero inoxidable 316 que conforma la cámara y sus elementos.

Se concluye que las cenizas de avena presentan un bajo índice de escorificación, considerando su composición en óxidos, a pesar de que comparativamente presenta mayor porcentaje de cenizas (4,4%) con respecto a las demás biomásas. En cambio, para uva y *pellet* comercial, el grado de escorificación de sus cenizas resulta severo.

Se establece que las temperaturas de llama promedios máximas alcanzadas, en todos los ensayos, no superan los 640 [°C], no existiendo diferencias significativas entre ellas, con un 95% de confianza.

Cabe destacar que esta experimentación no está exenta de presentar errores aleatorios y sistemáticos, de manera que es recomendable realizar mayor cantidad de ensayos con el fin de evitar que los resultados presenten algún sesgo debido a errores no contemplados.

Finalmente se recomienda incorporar a este estudio ciertos parámetros que no pudieron medirse en esta experimentación, como los FE de CO₂ para *pellet* comercial, por lo que se sugiere realizar ensayos para determinarlos, con el fin de calcular su rendimiento de combustión y quemado para compararlos con los resultados ya existentes respecto a uva, avena y pino. Se sugiere además medir la temperatura de llama en estos ensayos con *pellet* comercial, para establecer diferencias frente a las otras biomásas y determinar si existe una incidencia en las emisiones obtenidas respecto a BC y BrC. Se recomienda también realizar un análisis a las cenizas de pino, las que no pudieron ser recolectadas en este estudio. Por otra parte, también resulta importante conocer la composición elemental completa de las biomásas antes de ser combustionadas, por lo que se sugiere realizar previamente un análisis XRF a los pellets sin quemar, con el objetivo de poder comparar estos resultados con los obtenidos a partir de las cenizas y calcular los porcentajes de

volatilización frente a mayor cantidad de elementos de los que pudieron ser analizados en esta experimentación, donde solamente se pudo calcular los %volatilización para Cl y S.

Respecto a las proyecciones a futuro de este estudio, resulta recomendable comparar los resultados obtenidos en esta experimentación, donde las biomásas se quemaron con diferentes excesos de aire, con resultados a partir de quemas de biomásas combustionadas cada una de forma optimizada, con su propia factor λ y su propio exceso de aire, esto con el objetivo de identificar cómo resulta el proceso de combustión de la forma más óptima para cada biomasa y compararlo con los resultados actuales.

10. Referencias

- Abarca, P. (2012). *Potencia y rendimiento de la caldera*. Asociación Chilena de Seguridad.
- Acharya, B., Dutta, A., Mahmud, S., Tushar, M. y Leon, M. (2014). *Ash Analysis of Poultry Litter, Willow and Oats for Combustion in Boilers*. Avestia Publishing Journal of Biomass to Biofuel Volume 1, Year 2014.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (1995). *Introduction, AP 42, Fifth Edition, Volume I*. US EPA.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA. Vol. 1*.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (1997). *Proteja su vida y la de su familia: Evite el envenenamiento con monóxido de carbono*.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Research Triangle Park, NC.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2018a). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. Recuperado el 15 de noviembre del 2018, desde: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA]. (2018b). *Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution*. Recuperado el 15 de noviembre del 2018, desde: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- Aldabe, J. (2011). *Caracterización Físico-Química del material particulado en la comunidad foral de Navarra*. Tesis de Doctor en Ciencias. Universidad de Navarra, Pamplona, España, p. 55, 76, 100.
- Andreae, M. y Gelencsér, A. (2006). *Black carbon or brown carbon? The nature of light absorbing carbonaceous aerosols*. Atmospheric Chemistry and Physics. 6, 3131–3148.
- Asociación Chilena de Biomasa. (2017a). *Avances Asociación Chilena de Biomasa, Achibiom A.G.*
- Asociación Chilena de Biomasa. (2017b). *Mercado del pellet en Chile*.
- Asociación Chilena de Biomasa. (2017c). *Observatorio de pellets, Diciembre 2017*.
- Asociación Nacional de Ingenieros Agrónomos Enólogos de Chile. (2016). *Informe Vendimia 2016 en Chile*. RIVAR Vol. 3, N° 9, ISSN 0719-4994, Santiago de Chile.
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración [ATECYR]. (2007). *Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, España.

- Atlanting Consulting. (2009). *El Carbono Negro y el Calentamiento Global: Impacto de los Combustibles Comunes, Análisis científico*.
- Badii, M., Guillen, A., Lugo, O. y Aguilar, J. (2014). *Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científicas*. International Journal of Good Conscience. 9(2)31-40.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory*. Elsevier Inc. 2010, Burlington, USA.
- Bellolio, R. y Karelovic, P. (2011). *Energía de biomasa forestal, lecciones internacionales y su potencial en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.
- Berenguer, M. y Bernal, F. (2010). *NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*. Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales de España.
- Bertrán. J. y Morales, E. (2008). *Potencial de biomasa forestal*. Comisión Nacional de Energía [CNE], Santiago, Chile.
- Bird, B., Lightfoot, E. y Stewart, W. (1982). *Fenómenos de transporte*. Reverte, Editorial S.A.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN]. (2018). Ministerio del Medio Ambiente, Zonas Saturadas o Latentes
- Bond, T. (2007). *Testimony for the Hearing on Black Carbon and Climate Change*. House Committee on Oversight and Government Reform. United States House of Representatives.
- Bruker. (s.f.). *S1 TITAN Manual de usuario*.
- Burschel, H., Hernández, A. y Lobos, M. (2003). *Leña: una fuente energética renovable para Chile*.
- Bond, T., Doherty, S., Fahey, D., Forster, P., Berntsen, T., Deangelo, B., ... Zender, C. (2013). *Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment*. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380–5552.
- Bond, T. y Sun, H. (2005). *Can reducing black carbon emissions counteract global warming?* *Environmental Science and Technology* 39: 5921-5926.
- Cambio Climático Global. (2001). *Dióxido de Carbono (CO2)*. Recuperado el 25 de noviembre del 2018, desde: <https://cambioclimaticoglobal.com/dioxido>
- Capital Energy. (2015). Recuperado el 20 de junio del 2019, desde: <http://capitalenergy.biz/?p=14311>
- Carnicer, J. (2008). *Contaminación atmosférica. Módulo I: Contaminación Ambiental*. Escuela de Organización Industrial.
- Carbone. (2019). *Ficha Técnica del Acero Inoxidable*.
- Castello, M. (2014). *Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología

- Centro de Tecnologías Ambientales. (2017). *Protocolo combustión para pellets*. Laboratorio de Combustión, CETAM, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIIFEN]. (2018). *Ciclo del Carbono*. Recuperado el 30 de noviembre del 2018, desde: http://www.ciifen.org/index.php%3Foption=com_content&view=article&id=580%253Aciclos-biogeoquimicos&catid=98%253Acontenido-1&Itemid=131&lang=es
- Cereceda, P., Velásquez, F., Salazar, E., Contreras, P., Hernández A. y Olivares M. (2001). *Contaminación atmosférica*. Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Universidad Católica de Chile. Recuperado el 20 de noviembre del 2018, desde: http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/cont/cont12.htm
- Chakrabarty, R., Moosmueller, H., Chen, L., Lewis, K., Arnott, W., Mazzoleni, C., Dubey, M., Wold, C., Hao, W. y Kreidenweis, S. (2010). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6363.
- Chung, C., Kim, S., Lee, M., Yoon, S. y S. Lee, S. (2012). *Carbonaceous aerosol AAE inferred from in-situ aerosol measurements at the Gosan ABC super site, and the implications for brown carbon aerosol*. Gwangju Institute of Science and Technology, Seoul National University, Korea University, Seoul, Korea.
- Comisión Nacional de Energía del Estado de Chile [CNE]. (2018). *Balance Nacional de Energía*. Recuperado el 3 de enero del 2019, desde: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Corporación Nacional Forestal [CONAF]. (2018a). *Alternativas al uso del Fuego como Quemas Controladas, Historia*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile. Recuperado el 20 de octubre del 2018, desde: <http://www.alternativasquemas.cl/index.php?id=72>
- Corporación Nacional Forestal [CONAF]. (2018b). *Estadísticas, Número de Avisos y superficie tratada por tipo de quemas 1981-2017*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Correa, J., Iral, R. y Rojas, L. (2006). *Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza*. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Estadística, Medellín.
- Curtius, J. (2006). *Nucleation of atmospheric aerosol particles*. *Comptes Rendus Physique* 7, 1027–1045.
- Decreto Exento N°4, Establece norma de calidad del aire para material particulado sedimentable en la cuenca del río Huasco III Región. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 26 de mayo de 1992.
- Decreto Supremo N°4, Establece norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, 2 de marzo de 1992.

- Decreto Supremo N°12, Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable PM 2,5. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 9 de mayo de 2011.
- Decreto Supremo N°22, Establece norma de calidad secundaria de aire para anhídrido sulfuroso (SO₂). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 16 de abril de 2010.
- Decreto Supremo N°34, Modifica Decreto N° 276, de 1980, del Ministerio de Agricultura, Reglamento sobre roce a fuego. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 13 de mayo de 2016.
- Decreto Supremo N°39, Establece norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustioneen o puedan combustionar leña y *pellet* de madera. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 30 de julio de 2012.
- Decreto Supremo N°45, Modifica Decreto N° 59, de 1998, que establece la norma de calidad primaria para material particulado respirable PM10. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 11 de septiembre de 2001.
- Decreto Supremo N°59, Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable PM 10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 25 de mayo de 1998.
- Decreto Supremo N°112, Establece norma primaria de calidad de aire para ozono (O₃). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.
- Decreto Supremo N°113, Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO₂). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.
- Decreto Supremo N°114, Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno (NO₂). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.
- Decreto Supremo N°115, Establece norma primaria de calidad de aire para monóxido de carbono (CO). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 10 de septiembre de 2002.
- Decreto Supremo N°136, Establece norma de calidad primaria para plomo en el aire. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 6 de enero de 2001.
- Decreto Supremo N°4363, Aprueba texto definitivo de la ley de bosques. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 31 de julio de 1931.
- De Gregorio, M. (2015). *Valorización energética de biomásas en el marco de la política energética española*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

- De Lucas, A., Del Peso, C., Rodríguez, E y Prieto, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. TRANSBIOMA FP, Ministerio de Educación Cultura y Deporte de España, Fondo Social Europeo.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs [DEFRA]. (2014). *What are the causes of air Pollution*. United Kingdom Government.
- Díaz, V. y Páez C. (2006). *Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras*. Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito. Revista Acta Nova Vol.3, Nro 2.
- Dínamos. (2018). *Energía de la biomasa*. Programa de energía limpia para Colombia de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Recuperado el 7 de enero del 2018, desde: <http://dinacnemos.co/energias-renovables/energia-de-la-biomasa>.
- Ecomas. (2018). *Certificaciones Ecomas*. Recuperado el 20 de julio del 2018, desde: <http://ecomas.cl/calidad/>
- Ecotermia y Banico Spain. (2018). *Desventajas de los pellets*. Recuperado el 10 de agosto del 2018, desde: <https://www.banicospain.es/biomasa-cantabria/>
- Expósito, M. (2008). *Análisis de alternativas tecnológicas e ingeniería conceptual de una biorrefinería lignocelulósica*. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
- European Pellet Council. (2015a). *ENplus Handbook Part 1:General, ENplus Quality Certification Scheme For Wood Pellets*.
- European Pellet Council. (2015b). *ENplus Handbook, Part 3-Pellet Quality Requirements, ENplus Quality Certification Scheme For Wood Pellets*.
- Faba, A. y Muñoz, M. (2011). *La avena en Chile: características y mercado*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Gobierno de Chile.
- Farías, C. y Merino, T. (2017). *El mercado de la avena blanca en Chile*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Gobierno de Chile.
- Fallas, J. (2012). *Análisis de varianza, Comparando tres o más medias*. Universidad para la Cooperación Internacional.
- Feng, Y., Ramanathan, V. y Kotamarthi, V. (2013). *Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation?* Center for Cloud, Chemistry and Climate, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, USA.
- Fernández, P. (2010). *Centrales Térmicas, control y eliminación de los NOx*. Redsauce Engineering Services.
- Fernández, A. (2014). *Calefacción con pellets, ventajas e inconvenientes*. Recuperado el 10 de agosto del 2018, desde: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2014/12/01/221002.php
- Present-day climate forcing and response from black carbon in snow

- Flanner, M., Zender, C., Randerson, J. y Rash, P. (2007). *Present-day climate forcing and response from black carbon in snow*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112.
- Flanzy, C. (2000). *Enología: Fundamentos científicos y tecnológicos*. A. Madrid Vicente, Ediciones Mundi-Prensa.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (1995). *Norma para la avena*. Codex Alimentarius, Codex Standard 201 1995.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2001). *Unified Wood energy Terminology, UWET, FAO*. Recuperado el 10 de abril del 2018, desde: <http://www.fao.org/docrep/008/j0926s/j0926s06.htm>.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2015). *Wood Fuels Handbook*.
- Fuentealba, R. (2008). *Evaluación de ocurrencia del defecto mancha café en madera aserrada seca de Pinus radiata D. Don*. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.
- Fuentes, N., Sánchez, P., Pauchard, A., Urrutia, J., Cavieres, I. y Marticorena, A. (2014). *Plantas invasoras del centro-sur de Chile: Una guía de campo*. Laboratorio de Invasiones biológicas [LIB]. Concepción, Chile.
- Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra [CRANA]. (2018a). *Dióxido de azufre (SO₂)*. Recuperado el 2 de noviembre del 2018, desde: http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/diaxido-azufre-so2
- Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra [CRANA]. (2018b). *Óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO₂)*. Recuperado el 10 de noviembre del 2018, desde: http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/axidos-nitragero-nox-no2
- Fundación para la salud Geoambiental. (2018). *Material particulado*. Recuperado el 10 de noviembre del 2018, desde: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>
- Gangolli, S. (1999). *The Dictionary of Substances and their Effects, 2nd edition*. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- García, M. (2017). *Una nueva prueba para el problema de igualdad de varianzas*. Universidad Santo Tomás, Colombia.
- García, R. (2001). *Combustibles y combustión*.
- García, E., Sotomayor, A., Silva, S. y Valdebenito, G. (2001). *Establecimiento de Plantaciones Forestales*. Instituto Forestal, Fondo de Desarrollo e Innovación, Chile.
- Gestiona Energía. (2018). *Conceptos básicos*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. Recuperado el 5 de abril del 2018, desde: <http://www.gestionaenergia.cl/mipymes/conceptos-basicos/>

- González, P., Alvarez, V., Stange, M., Herrera, C., Cohen, M. y Pardo, E. (2015). *Disponibilidad de Residuos Madereros*. Comisión Nacional de Energía [CNE] Instituto Forestal [INFOR], Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Chile.
- Grantz, D., Garner, J. y Johnson, D. (2003). *Ecological effects of particulate matter*. *Environment International* 29, 213-239.
- Grimm Aerosol. (2016). *Portable Laser Aerosol Spectrometer and Dust Monitor Model 1.108/1.109*.
- Grimm Aerosol Technik. (2013). *Nano an Wide Range Sizers and PAH for Aerosol monitoring*
- Guerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V. y Cereceda-Balic, F. (2019). *Effects of wood moisture on emission factors for PM_{2.5}, particle numbers and particulate-phase PAHs from Eucalyptus globulus combustion using a controlled combustion chamber for emissions*. *Science of the Total Environment* 648, 737–744.
- Gysling, A y Soto, D. (2015). *Industria Forestal Primaria en Chile, Periodo 2006-2015*. Instituto Forestal y Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Gysling, A., Álvarez, V., Soto, D., Pardo, E. y Poblete, P. (2019). *Anuario Forestal 2019*. Boletín estadístico N°163, Instituto Forestal [INFOR], Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Harrison, R. y Pio, C. (1983). *Size differentiated composition of inorganic aerosol of both marine and continental polluted origin*. *Atmospheric Environment* 17, 1733-1738.
- Henríquez, S. y Santana, C. (18 de octubre de 2018). Episodios críticos por calidad del aire suben 39%, mientras fiscalizaciones se estancan. *El Mercurio*, pp 8.
- Holmes, S. (2007). *A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications*. *Atmospheric Environment* 41, 2183–2201.
- IBM Corporation. (2009). *Guía para el análisis de datos IBM SPSS Statistics 10*.
- Iglesias, R. (2016). *Estudio de la viabilidad de la utilización de los residuos en Gran Canaria para la producción de pellets*. Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Institute for Governance & Sustainable Development [IGSD]. (2008). *Reducing Black Carbon May Be Fastest Strategy for Slowing Climate Change*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- International Energy Agency [IEA]. (2018). *World energy balances 2019: Overview*.

- International Energy Agency [IEA]. (2017). *Technology Roadmap, Delivering Sustainable Bioenergy*.
- Institute for Health Metrics and Evaluation [IHME], Evaluation's Global Burden of Disease Project [GBD] y Health Effects Institute [HEI]. (2017). *State of Global Air 2017, a special report on global exposure to air pollution and its disease burden*.
- IQAir. (2019). *2018 World Air Quality Report*.
- Jacobson M. (2007). *Black carbon and global warming.: Representatives U.H.o., ed. Washington DC, 2007*.
- Jang, M. y Kamens, R. (2001). *Characterization of secondary aerosol from the photo-oxidation of toluene in the presence of NO_x and 1-propene*. Environmental Science and Technology, 35, 3626-3639.
- Joya, E. (2007). *Contaminación del aire exterior y enfermedades alérgicas de la vía aérea*. Revista Ciencia y Trabajo, 23, 23-29.
- Köhler, Franz [ilustración]. (1896). *Vitis vinífera*. Köhler's Medizinal-Pflanzen.
- Kulmala, M., Maso, M., Makela, J., Pirjola, L., Vakeva, M., Aalto, P., Miikkulainen, P., Hameri, K. y O'Dowd, C. (2001). *On the formation, growth and composition of nucleation mode particles*. Tellus 53 B, 479-490.
- Lack, D., Langridge, J., Bahreini, R., Cappa, C., Middlebrook, A. y Schwarz, J. (2012). *Brown carbon and internal mixing in biomass burning particles*. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 109, 14802–14807.
- Lacis, A., Schmidt, G., Rind, D. y Ruedy, R. (2010). *Atmospheric CO₂: Principal control knob governing Earth's temperature* Science. Science 330, 356-359.
- Lagos, O., Lavín, A., Reyes, M., Ruiz, C., Silva, Sotomórcayor, J., et al. (2004). *Frutales: especies con potencial en el sector seco*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
- Laskin, A., Laskin, J. y Nizkorodov, S. (2015). *Chemistry of Atmospheric Brown Carbon*. Environmental Molecular Sciences Laboratory and Physical Sciences Division, Pacific Northwest National Laboratory, Department of Chemistry, University of California, United States.
- Lazar, A., Reilly, P., Whitten, W. y Ramsey, M. (1999). *Real-time Surface Analysis of Individual Airborne Environment Particles*. Environmental Science & Technology, 33(22), 3993-4001.
- Ley N°19300. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 9 de marzo de 1994.
- Lienqueo, M. (2012). *Caracterización de la biomasa*. Curso de Energía Renovable a partir de Biomasa. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- Limbeck, A., Kulmala, M. y Puxbaum, H. (2003). *Secondary organic aerosol formation in the atmosphere via heterogeneous reaction of gaseous isoprene on acidic particles*. Geophysical Research Letters 30, art-1996 45. 44. 39.
- Magee Scientific. (2016). *Aethalometer® Model AE33 User Manual*.
- Martínez, I. (1992). *Termodinámica Básica y Aplicada*. Editorial Dossat SA, Madrid, España.
- Manterola, H., Cerda, D. y Mira, J. (1999). *Los residuos agrícolas y su uso en la alimentación de rumiantes*. Fundación para la innovación agraria. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Matter, U., Siegmann, H. y Burtcher, H. (1999). *Dynamic field measurements of submicron particles from diesel engines*. Environmental Science and Technology, 33, 1946-1952.
- Medina, J. (2010). *La Dieta del Dióxido de Carbono (CO₂)*. Conciencia Tecnológica No. 39, Enero-Junio 2010. Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Aguascalientes,
- Mellado, M., Matus, T. y Madariaga, R. (2008). *Antecedentes sobre el Triticale en Chile y otros países*. Boletín INIA – N° 183, Instituto de Investigación Agropecuarias, Quilamapu, Chillán, Chile.
- Mencarelli, F. y Bellincontro, A. (2005). *Grape: Post-harvest Operations*. INPhO Post-harvest Compendium, Department of Food Science and Technology, University of Viterbo, Italy.
- Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado.
- Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2015). *Reporte Balance Nacional de Energía*.
- Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2015a). *Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción*.
- Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2015b). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.
- Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2018). *Energías Renovables*. Recuperado el 10 de enero del 2018, desde: <http://www.energia.gob.cl/energias-renovables>
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA] (2012). *Informe del Estado del Medio Ambiente 2011*.
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2015). *Los beneficios de la calefacción con pellets*. Recuperado el 10 de julio del 2018, desde: <http://portal.mma.gob.cl/los-beneficios-de-la-calefaccion-con-pellets/>
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2016). *Desafíos y oportunidades para el mercado de la leña en la Región del Biobío*.

- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2018a). *Programa de recambio de calefactores*. Recuperado el 10 de octubre del 2018, desde: <https://calefactores.mma.gob.cl/>
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2018b). *Aire Chile, Pronóstico de calidad del aire, Preguntas Frecuentes*. Recuperado el 10 de octubre del 2018, desde: <http://airechile.mma.gob.cl/faq>
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2018c). *¿Qué es el Dióxido de Azufre y cómo se origina?* Registro de Emisiones y Transferencia de contaminantes. Recuperado el 10 de noviembre del 2018, desde: <http://www.retc.cl/que-es-el-dioxido-de-azufre-y-como-se-origina/>
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2018d). *Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente*.
- Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile [MMA]. (2018e). *Tercer Informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018*.
- Ministerio de Salud del Gobierno de Chile. (2010). *Medicamentos Herbarios Tradicionales*.
- Myhre, G., Shindell, D., Brèon, F., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, D., Koch, J, ... Zhang, A. (2014). *Anthropogenic and natural radiative forcing*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Niu, Y., Zhua, Y., Tan, H., Hui, S., Jing, Z. y Xu, W. (2014). *Investigations on biomass slagging in utility boiler: Criterion numbers and slagging growth mechanisms*. *Fuel Processing Technology* 128, 499–508.
- Nogués, F., García-Galindo, D. y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa, Volumen I*. Prensas Universitarias de Zaragoza, España.
- Norma Chilena ISO 17225, Biocombustibles sólidos - Especificaciones y clases de combustibles, Instituto Nacional de Normalización, 2017.
- Norma Chilena 2907, Combustible sólido - Leña - Requisitos. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 13 de septiembre de 2005. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA]. (2016). *Protocolo de Agricultura Sustentable*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA]. (2017). *Cultivos anuales históricos*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.

- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA]. (2018). *Catastro frutícola*. Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2018). *WHO Global Ambient Air Quality Database (update 2018)*.
- Pakkanen, A., Kerminen, V., Korhonen, C., Hillamo, R., Aarnio, P., Koskentalo, T. y Maenhaut, W. (2001). *Urban and rural ultrafine (PM_{0.1}) particles in the Helsinki area*. *Atmospheric Environment* 35, 4593-4607.
- Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vásquez-Panizza, R., Arriaza, J., Morales, D. y Zulantay M. (2011). *Bioenergía en Chile*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.
- Patterson, E. y McMahon, C. (1984). *Absorption characteristics of forest fire particulate matter*. *Atmospheric Environment*, 18, 2541-2551.
- Peña, E. y Acuña, E. (2012). *Residuos de la cosecha forestal: aprovechamiento*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile.
- *Pinus radiata* [ilustración]. (2010). *Curso de Botánica Sistemática Profesor Sebastián Teillier A.* Recuperado el 20 de octubre del 2018, desde: <http://www.chlorischile.cl/cursoonline/guia2/fig9.htm>
- Pope, C. y Dockery, D. (2006). *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect*. *Journal Air Waste Manage Association*, 56, (6), 709-742.
- Pöschl, U. (2005). *Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects*. *Angewandte Chemie* 44(46): 7520-7540.
- Atmospheric tar balls: Particles from biomass and biofuel burning
- Pósfai, M., Gelencsér, A., Simonics, R., Arató, K, Li, J., Hobbs, P. y Bueck, P. (2004). *Atmospheric tar balls: particles from biomass and biofuel burning*. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 109.
- Praxair. (2015). *Principios Detección de Gas*.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M., Artíñano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Santos, S., Patier, R., Rosa, J., Campa, A. y Menedez, M. (2003). *Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España: Informes finales*. Universidad de Huelva, Universidad del País Vasco, Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España.
- Ramanathan, V. y Carmichael, G. (2008). *Global and Regional Climate Changes due to Black Carbon*. *Nature Geoscience*, 1.
- Rodríguez, M. (2009). *Tema 11 La atmósfera: estructura, composición y dinámica. La contaminación atmosférica. Métodos de determinación y de corrección*.

- Ruiz, C., Wolff, M. y Claret, M. (2015). *Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Nacional de Investigación Quilamapu, Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile.
- Sáenz, C. (1992). *Aprovechamiento de subproductos de la industria alimentaria en Chile*. Alimentos.
- Satheesh, S. y Moorthy, K. (2005). *Radiative effects of natural aerosols: A review*. Atmospheric Environment, 39 (11), 2089-2110.
- Servicio Agrícola y Ganadero [SAG]. (2017). *Catastro vitivinícola nacional 2016*. División de Protección Agrícola y Forestal, subdepartamento de viñas, vinos y bebidas alcohólicas, Chile.
- Shapiro, S. y Wilk, M. (1965). *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika 52: 591-611.
- Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire [SINCA]. (2018). *Nomativa aplicable*. Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile.
- Schmidt, G., Ruedy, R., Miller, R. y Lacis, A. (2010). *The attribution of the present-day total greenhouse effect*.
- Solaun, K., Sopelana, A., Arraibi, E. y Pérez, M. (2014). *Black Carbon y sus efectos en el clima, Balance y perspectivas*. Factor CO₂.
- Sosaky, K., Kurita, H., Carmichael, G., Chang, G. y Muran, K. (1988). *Behavior of Sulfates, Nitrates and other Pollutants in the Long-range Transport of Air Pollution*. Atmospheric Environment 22(7), 1301-1308.
- StatPoint Technologies Inc. (2010). *STATGRAPHICS® Centurion XVI Manual de usuario*.
- Suárez, M. y Folgueras, M. (2015). *Comportamiento del S, Cl, Na y K durante la combustión de biomasa*. Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, España.
- Taladriz, A. y Schwember, A. (2012). *Cereales en las zonas centro-sur y sur de Chile, ¿Qué hacer con los rastrojos?*. Revista N°46, Diciembre – 2012, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Testo A.G. (2003). *Análisis de gases de combustión en la industria: Guía Práctica para medir Emisiones y Procesos*. 1ª Edición 2003.
- Testo Argentina S.A. (2019a). *Absorción infrarroja (Proceso IR)*. Academia online. Recuperado el 10 de septiembre del 2019, desde: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/absorcion-infrarroja-proceso-ir>.
- Testo Argentina S.A. (2019b). *Sensores electroquímicos*. Academia online. Recuperado el 10 de septiembre del 2019, desde: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/sensores-electroquimicos>.
- Testo Inc. (2014). *Testo Tech Notes: CO Sensor – H₂ Cross Sensitivity*.
- Tony, M., Rosentoft, A., Hayes, S. y Bateman, P. (2009). *English Handbook for Wood Pellet Combustion*. National Energy Foundation, European Biomass Industry Association.

- Torres, E., Defilippi, B., Rivera, S., Muñoz, I., Muena, V., Selles, G. et al. (2017). *Manual del cultivo de uva de mesa*. Convenio Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.
- Turkenburg, W., Beurskens, J., Faaij, A., Fraenkel, P., Fridleifsson, I., Lysen, E., et al. (2000). *World energy assessment, energy and the challenge of sustainability*. United Nations Development Programme (UNDP), United Nations. Department of Economic and Social Affairs y World Energy Council. New York, United States.
- Tropósfera. (2005). *Plomo (Pb)*. Tropósfera®, Portal temático de contaminación atmosférica.
- Uriel, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Analíticas.
- Van Eyk, P. y Ashman, P. (2010). *Utilisation of Winery Waste Biomass in Fluidised bed Gasification and Combustion*. South Australian Coal Research Laboratory, School of Chemical Engineering, The University of Adelaide, SA, Australia.
- Vargas, C. (2011). *Efectos de la fracción gruesa (PM_{10-2.5}) del material particulado sobre la salud humana*. Ministerio de Salud del Gobierno de Chile.
- Viana, M. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la Península Ibérica y Canarias*. Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- Whitby, K. (1978). *The physical characteristics of sulfur aerosols*. Atmospheric Environment 12, 135-159.
- Wikberg, H., Grönberg, V., Jermakka, J., Kemppainen, K., Klean, M., Laine, C., Paasikallio, V. y Oasmaa, A. (2015). *Hydrothermal refining of biomass - an overview and future perspectives*. Tappi Journal. Vol. 14 No: 3, 195-207.
- Wilhelm, Otto. (1885). *Avena sativa* [ilustración]. Flora von Deutschland Österreich und der Schweiz, Gera, Germany. Recuperado el 20 de agosto del 2018, desde: http://biolib.mpipz.mpg.de/thome/band1/tafel_068.html
- Williams, L. y Abdi, H. (2010). *Fisher's Least Significant Difference (LSD) Test*. In Neil Salkind (Ed.), *Encyclopedia of Research Design*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Wilson, W. y Suh, H. (1997). *Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies*. J Air Waste Manag Assoc, 1997 Dec;47(12):1238-49.
- Wilson, R. y Spengler, J. (1996). *Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects*. Distributed by Harvard University Press.
- Wuebbles, D., Fahey, D., Hibbard, K., Dokken, D., Stewart, B. y Maycock, T. (2017). *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. U.S. Global Change Research Program, Washington D.C., USA.

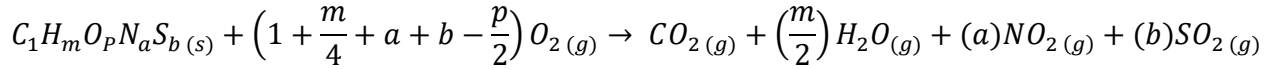
- Yang, S., Xu, B., Cao, J., Zender, C. y Wanga, M. (2015). *Climate effect of black carbon aerosol in a Tibetan Plateau glacier*. *Atmospheric Environment*, 111, pp. 71-78
- Yazici, B. y Yolacan, S. (2007). *A comparison of various tests of normality*. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 77(2), 175–183.

11. Anexos y apéndices

11.1 Anexos

Anexo A. Cálculo de aire primario.

Considerando la siguiente ecuación de combustión balanceada para combustibles sólidos:



Además, la composición elemental del combustible con mayor contenido de carbono (*pellet* HTC-A 0.75) resulta:

Tabla 11.1 Composición elemental *pellet* HTC-A 0.75.

	%C	%H	%O	N%	S%
HTC-A 0.75	75,25	6,17	16,21	0,03	0,04

Fuente: Elaboración propia.

Entonces se tiene que:

$$\%C = \frac{1 * PM_C}{PM_{comb}} * 100 \rightarrow PM_{comb} = \frac{1 * 12,011 \left[\frac{g}{mol}\right]}{75,25\%} * 100 = 15,961 \left[\frac{g}{mol}\right]$$

Dónde,

1: representa el subíndice del C en la ecuación de combustión.

PM_C : peso molecular del carbono [g/mol].

PM_{comb} : masa molecular de combustible [g/mol].

Ahora, replicando esta ecuación para los demás elementos que componen el combustible, y despejando el subíndice para cada uno, se tiene:

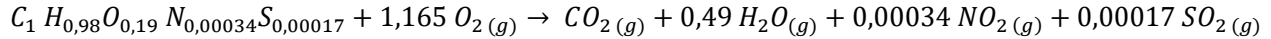
$$\%H = \frac{m * PM_H}{PM_{comb}} * 100 \rightarrow m = \frac{\%H * PM_{comb}}{PM_H * 100} = 0,98$$

$$\%O = \frac{p * PM_O}{PM_{comb}} * 100 \rightarrow p = \frac{\%O * PM_{comb}}{PM_H * 100} = 0,16$$

$$\%N = \frac{a * PM_N}{PM_{comb}} * 100 \rightarrow a = \frac{\%N * PM_{comb}}{PM_H * 100} = 0,00034$$

$$\%S = \frac{b * PM_S}{PM_{comb}} * 100 \rightarrow b = \frac{\%S * PM_{comb}}{PM_H * 100} = 0,00017$$

Calculando entonces todos los subíndices, la ecuación de equilibrio queda de la siguiente manera:



Como se quemarán 10[g] de *pellet*, la cantidad total de moles quemados de combustible serán:

$$N_{comb} = \frac{10[g]}{PM_{comb}} = \frac{10}{15,961} = 0,627 [mol]$$

Y la cantidad de moles y masa de O_2 en 10[g] de combustibles queda:

$$N_{O_2} = N_{comb} * 1,165 = 0,730 [mol]$$

$$M_{O_2} = N_{O_2} * PM_{O_2} = 23,359 [g]$$

Ahora calculando el volumen de O_2 y de aire en condiciones normales de presión y temperatura, según DS N°34 del Ministerio de Salud (Decreto Supremo N°4, 1992):

$$PV = nRT$$

$$V_{O_2} = \frac{nRT}{P} = \frac{0,730[mol] * 0,082 \left[\frac{atm L}{mol K} \right] * (273 + 25)[K]}{1 [atm]} = 17,838 [L]$$

$$V_{aire} = \frac{17,838}{0,21} [L] = 84,943 [L]$$

Considerando según pruebas preliminares, que la fase de llama cuando se queman 10[g] de *pellet* dura en promedio 3 [min], el flujo de aire requerido para la combustión estequiométrica resulta de:

$$V_{aire} = \frac{84,943 [L]}{3[min]} = 28,31 \left[\frac{L}{min} \right]$$

De manera que, teniendo en cuenta las recomendaciones descritas en el Capítulo 5.2.2.1, se eligió un exceso de aire del 25%, es decir, un lambda de 1,25. Calculando entonces la masa de O_2 necesaria para cumplir con los requerimiento, se tiene:

$$\lambda = 1,25 = \frac{M_{O_2 \text{ real}}}{M_{O_2 \text{ estequiométrico}}} \rightarrow M_{O_2 \text{ real}} = \lambda * 23,359 [g] = 29,199 [g]$$

$$N_{O_2 \text{ real}} = \frac{M_{O_2 \text{ real}}}{PM_{O_2}} = 0,913 [mol]$$

Ahora calculando el volumen de O₂ y de aire en condiciones normales de presión y temperatura para un 25% de exceso de aire.

$$PV = nRT$$

$$V_{O_2} = \frac{nRT}{P} = \frac{0,913[mol] * 0,082 \left[\frac{atm L}{mol K} \right] * (273 + 25)[K]}{1 [atm]} = 22,310 [L]$$

$$V_{aire} = \frac{22,310}{0,21} [L] = 106,238 [L]$$

Por lo tanto, el flujo de aire requerido para la una combustión real con 25% de exceso de aire es de:

$$V_{aire} = \frac{106,238 [L]}{3[min]} = 35,41 \left[\frac{L}{min} \right]$$

Calculando equivalentemente estos valores para los demás tipos de biomasa con los que se trabajará, según el procedimiento anteriormente descrito, se tiene en la Tabla 11.2 el detalle de la masa de O₂, volumen y exceso de aire con que tr.

Tabla 11.2 Masa y volumen de oxígeno estequiométrico y real.

Moles			LAMBDA = 1			LAMBDA = 1,25			
Biomasa	N_{O_2}	N_{O_2}	$M_{O_2 \text{ esteq}}$	V_{O_2}	V_{aire}	$M_{O_2 \text{ real}}$	V_{O_2}	V_{aire}	λ
Avena	1,14	0,39	14,25	10,89	51,87	17,82	13,62	64,84	2,05
Orujo de uva	1,19	0,49	18,86	14,41	68,62	23,57	18,01	85,77	1,55
Pino	1,10	0,43	15,24	11,65	55,48	19,06	14,56	69,35	1,91

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Gráficos de cajas y bigotes de los FE de gases y partículas.

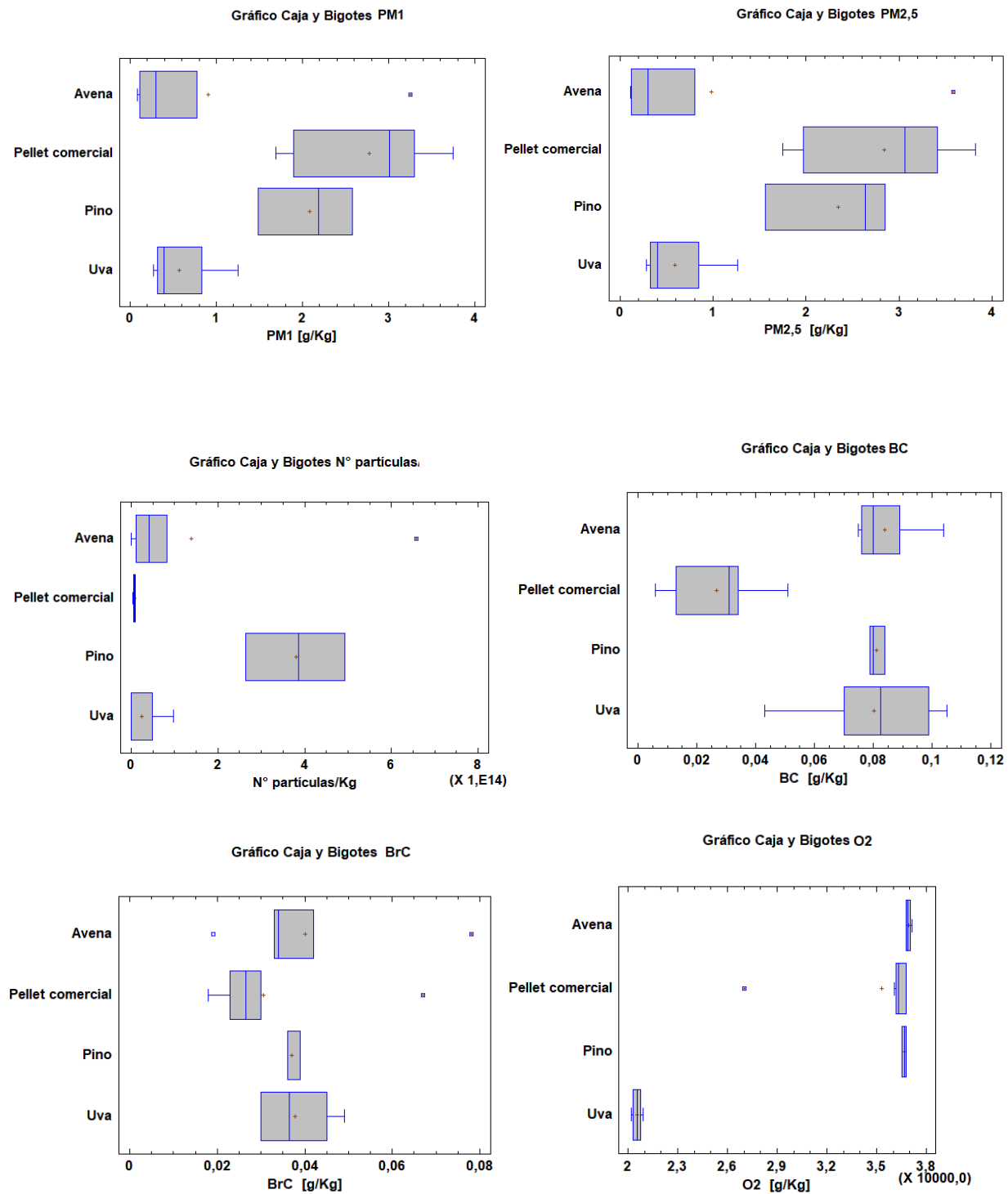


Gráfico 11.1 Diagramas de cajas y bigotes para los FE obtenidos.

Fuente: Elaboración propia.

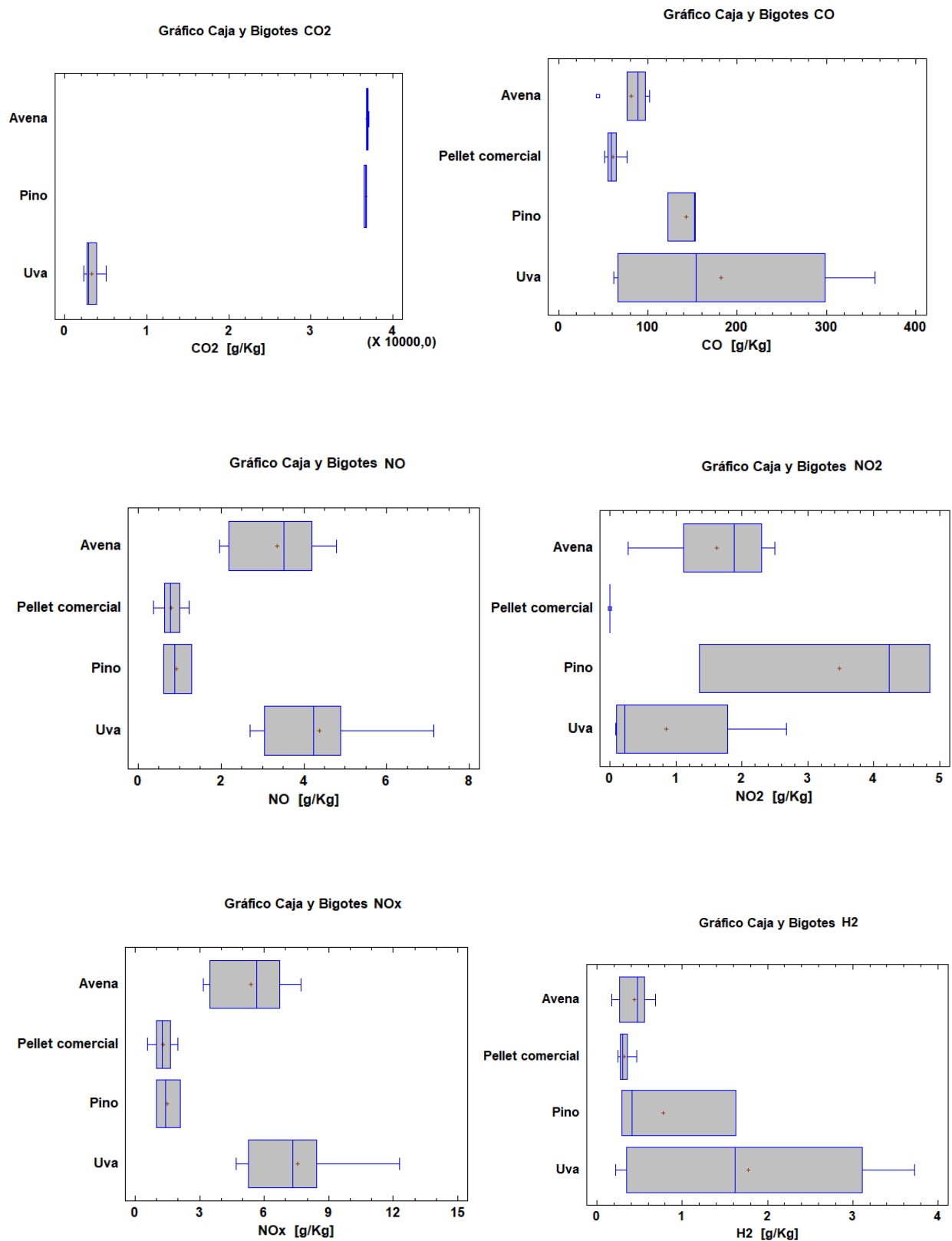


Gráfico 11.2 Diagramas de cajas y bigotes para los FE obtenidos.
Fuente: Elaboración propia.

11.2 Apéndices

Apéndice A. Análisis de laboratorio del pellet Ecomas.

Para la Producción de pellets producido por

PROMASA S.A., Los Angeles, CHILE

Certificado de acuerdo a **ENplus A1** con la identificación **CL001**



Confirmamos que los siguientes resultados del test de análisis están dentro de la inspección 2017 y son válidos hasta La inspección 2018

Muestra 2017183			Pellet Muestra Resultado	valores permitidos límites según clase	
	Standard	Unidad		ENplus	DINplus
Durabilidad Mecánica	ISO 17831-1	(%)	98,9	≥ 98,0	≥ 97,5
Densidad Granel	ISO 17828	(kg/m ³)	730	750 ≥ BD ≥ 600	750 ≥ BD ≥ 600
Contenido de Humedad	ISO 18134-2	(%)	6,7	≤ 10	≤ 10
Contenido de Cenizas 550°C (d)	ISO 18122	(%)	0,4	≤ 7	≤ 7
Poder calorífico Neto (ar)	ISO 18125	(MJ/kg)	17,4	≥ 16,5	≥ 16,5
Poder calorífico Neto (ar)	ISO 18125	(kWh/kg)	4,8	≥ 4,6	≥ 4,6
Poder calorífico Neto (db)	ISO 18125	(MJ/kg)	18,8	...	...
Poder calorífico Neto (db)	ISO 18125	(kWh/kg)	5,2	...	...
Contenido de Azufre (db)	ISO 16994	(%)	0,008	≤ 0,04	≤ 0,04
Contenido de Cloro (db)	ISO 16994	(%)	0,01	≤ 0,02	≤ 0,02
Contenido de Nitrógeno (db)	ISO 16948	(%)	0,07	≤ 0,30	≤ 0,30
Additivos (presión)	...	(%)	0	≤ 2	≤ 2
Dimensiones					
Finos (<3,15 mm)	ISO 18846	(%)	0,2	≤ 0,5* / ≤ 1	≤ 0,5* / ≤ 1
Largo (3,15 ≤ L ≤ 40mm)	ISO 17829	(%)	99,8	> 98,5* / >98	> 98,5* / >98
Largo (40 ≤ L ≤ 45mm)	ISO 17829	(%)	0	≤ 1	≤ 1
Largo (> 45mm)	ISO 17829	(cantidad)	0	0	0
Diámetro	ISO 17829	(mm)	6	6 or 8 ± 1	6 or 8 ± 1
Metales pesados **					
Cromo (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<1	≤ 10	≤ 10
Cobre (db)	ISO 16968	(mg/kg)	0,94	≤ 10	≤ 10
Zinc (db)	ISO 16968	(mg/kg)	6,9	≤ 100	≤ 100
Lead (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<0,5	≤ 10	≤ 10
Mercurio (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<0,005	≤ 0,1	≤ 0,1
Cadmium (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<0,1	≤ 0,5	≤ 0,5
Arsénico (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<0,5	≤ 1	≤ 1
Nikel (db)	ISO 16968	(mg/kg)	<1	≤ 10	≤ 10
Punto de fusión de cenizas (preparación a 815°C)					
Temperatura de fusión	CEN/TS 15370---1	(°C)	1150	...	...
Temperatura de deformación	CEN/TS 15370---1	(°C)	1240	≤ 1200	≤ 1200
Temperatura límite HT	CEN/TS 15370---1	(°C)	>1550	...	...
Temperatura de fundición FT	CEN/TS 15370---1	(°C)	>1550	...	...

* Para Bolsas maxisacos sellados, tal como recibidos en base seca

BEA Institut für Bioenergie GmbH
Avedikstraße 21, 1150 Wien, AUSTRIA
P: +43 1 89093 91 | F: +43 1 89093 92
office@bioenergy.co.at
www.bioenergy.institute

