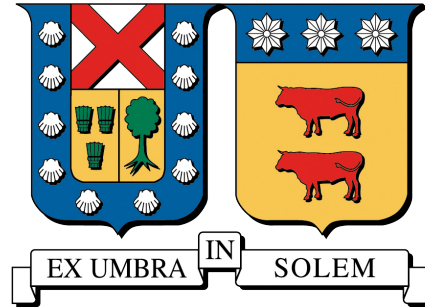


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO, CHILE



**MODELADO DIRECTO DE LA RADIACIÓN TÉRMICA EN
LLAMAS A PARTIR DE IMÁGENES INFRARROJAS
MULTIESPECTRALES: APLICACIÓN A LLAMAS
AXISIMÉTRICAS DE ETILENO Y COMBUSTIÓN DE PMMA.**

CAMILA JOSEFA SEGUEL PÉREZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL Y MAGÍSTER
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. RODRIGO DEMARCO BULL
PROFESOR CORREFERENTE INTERNO: DR. FELIPE ESCUDERO BARROS
PROFESOR CORREFERENTE EXTERNO: DR. MARÍA THOMSEN SOLIS

DICIEMBRE, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelado directo de la radiación térmica en llamas a partir de imágenes infrarrojas multiespectrales: Aplicación a llamas axisimétricas de etileno y combustión de PMMA.

Nombre del candidato(a): Camila Josefa Seguel Pérez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial y Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial

Campus: Casa Central **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Demarco, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 19-01-2026

Firma:

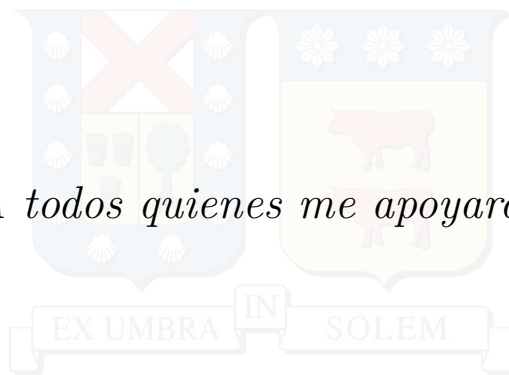
Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 19/01/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

A todos quienes me apoyaron





Agradecimientos

Hace seis años, era difícil imaginar que llegaría este momento. Ahora que estoy aquí, quisiera reconocer a quienes hicieron posible que pudiera recorrer este camino.

En primer lugar, a mi familia: mi madre, mi padre, mi hermanito, mis abuelas y todos mis primos y tíos, por su amor incondicional, apoyo constante y comprensión durante todo este proceso. Su aliento y confianza, enviados desde mi ciudad natal, fueron fundamentales para alcanzar esta meta. También quiero agradecer a mis amigas más antiguas, Vero, Bárbara y Gabriela, a quienes no pude ver mucho en estos años debido a la distancia, pero cuyo apoyo sentí de todos modos.

A los integrantes del grupo EC2G: Javiera, Martín, Nico, Traicy, Benja, Coni, Denisse, Laura y Max, por las discusiones enriquecedoras, el ambiente de trabajo colaborativo, y el compañerismo que hicieron de este proceso una experiencia gratificante. Sus aportes y comentarios fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Especialmente, quisiera agradecer a Javiera, con quien trabajé intensamente estos últimos dos años y con quien nos quebramos la cabeza por horas tratando de resolver los modelos; y a Goli, sin quien no habría aprendido a conectar ni un cable en el laboratorio.

A la Orquesta Estudiantil, por darme un espacio para relajarme y aprender fuera de los ramos y la investigación. A las clases de flauta con el profe Paulo, a la admin con quienes hicimos lo posible para mantener el proyecto de la mejor manera, y a todos mis compañeros de fila. Estos años siendo parte de un grupo tan grande, los ensayos, las clases de música y las fiestas orquestales fueron una experiencia que nunca olvidaré.

A la Universidad Técnica Federico Santa María, por proporcionarme los recursos, infraestructura y ambiente académico necesarios para desarrollarme estos años.

Finalmente, agradezco a mis profesores: al profesor Rodrigo Demarco, por su orientación, dedicación y esas conversaciones largas sobre temas diversos que me permitieron profundizar más en mi aprendizaje; al profesor Felipe Escudero, por su apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo de tesis, por compartir su conocimiento y experiencia, y por su paciencia en las innumerables preguntas que le íbamos a hacer junto con Javiera a su oficina; a la profesora María Thomsen, quien me apoyó en el desarrollo de la última parte de este trabajo como mi co-guía, por su invaluable orientación, sus aportes al desarrollo de esta investigación, y por su constante disposición a resolver dudas y compartir su experiencia en el área.

En ese sentido, agradezco también al proyecto Fondecyt Iniciación 11240482, a cargo de la profesora María Thomsen, por el financiamiento y apoyo que hicieron posible la realización de este trabajo.

Este proyecto cierra una etapa en mi vida, pero las personas que conocí en el camino dejaron una huella en mí que no se borrará, y me permitirán continuar adelante en lo que depare el futuro. Muchas gracias a todos y todas.



Resumen Ejecutivo

La contaminación atmosférica por hollín constituye un problema crítico de salud pública y ambiental en Chile, evidenciando la urgencia de desarrollar metodologías efectivas para la caracterización y cuantificación precisa de emisiones. Sin embargo, se tienen desafíos técnicos importantes: la radiación térmica emitida por llamas resulta de la superposición compleja entre las bandas espectrales discretas de gases de combustión y el espectro de emisión continuo del hollín. Esto dificulta la separación e identificación individual de cada contribuyente.

Este trabajo desarrolla y valida experimentalmente una metodología de modelado directo de transferencia radiativa para caracterizar las contribuciones de hollín y gases de combustión en imágenes infrarrojas multiespectrales. El modelo implementa un enfoque LBL de alta resolución para gases, el modelo de Chang-Charalampopoulos para hollín en régimen de Rayleigh, y resuelve numéricamente la RTE para sintetizar imágenes en cuatro bandas espectrales de una cámara Telops MS-M1K. La validación experimental se realizó en llamas de difusión laminares axisimétricas tipo Yale: Yale 60 y Yale 80. Los campos termodinámicos de entrada fueron obtenidos mediante simulaciones CFD con CoFlame.

Los resultados demuestran que el modelo reproduce cuantitativamente las mediciones experimentales, con diferencias en magnitud de entre 16-67% según filtro y llama. El mejor acuerdo se observó en el F6, mientras que las mayores discrepancias aparecieron en F5. Se identificó un sesgo sistemático de subestimación en magnitud absoluta, atribuible principalmente a posible subestimación en datos de entrada y a incertidumbre del modelo. El análisis de descomposición espectral reveló que la separabilidad entre contribuciones de gases y hollín depende críticamente del filtro utilizado. F6 resultó ser una banda casi pura para CO_2 , mientras tanto el F7 como el F8 resultaron ser bandas con sensibilidad mixta a H_2O y hollín.

El análisis de sensibilidad muestra que la temperatura es la variable dominante, el hollín tiene elasticidades crecientes con f_v y en bandas de alta frecuencia, y que las especies gaseosas presentan elasticidades suficientes para una estimación robusta una vez conocidas temperatura y hollín. Basándose en estas elasticidades, se propuso una estrategia secuencial de inversión: estimar primero temperatura y CO_2 usando F6, luego f_v usando F7 en alas de llama, estimar H_2O con F8 corrigiendo por hollín conocido, y finalmente refinar CO con F5.

Adicionalmente, se aplicó la cámara infrarroja multiespectral a experimentos de pirólisis y combustión de polimetilmetacrilato (PMMA) bajo nueve condiciones de atmósfera. Se caracterizaron cualitativamente diferencias en morfología de llama, intensidad radiativa y balance gas/hollín, cuantificando el heater length (L_h). Sin embargo, se identificaron limitaciones importantes, incluyendo volatilidad de llama, dificultad para detectar zona de precalentamiento durante combustión activa, y falta de repeticiones experimentales para validación robusta.

Este trabajo establece un protocolo sistemático para síntesis y validación de imágenes multiespectrales sintéticas en llamas con alto contenido de hollín. Los productos generados incluyen un modelo de transferencia radiativa, un dataset experimental, una caracterización de separabilidad espectral y sensibilidades, y una metodología aplicable a otras configuraciones, estableciendo una plataforma sólida para el trabajo futuro en problema inverso.



Abstract

La contaminación atmosférica por hollín constituye un desafío crítico de salud pública y ambiental en Chile, evidenciando la urgencia de metodologías precisas para la caracterización de hollín. Sin embargo, cuantificar hollín en procesos de combustión enfrenta desafíos técnicos fundamentales: la radiación térmica de llamas con alto contenido de hollín resulta de la superposición compleja entre bandas espectrales discretas de gases de combustión y la emisión continua de hollín, dificultando la identificación individual de cada contribuyente mediante termografía infrarroja convencional. Este trabajo desarrolla y valida experimentalmente una metodología de modelado directo de transferencia radiativa espectralmente resuelta usando un enfoque Line-by-Line de alta resolución para gases, el modelo de Chang-Charalampopoulos para hollín en régimen de Rayleigh, y solución numérica de la ecuación de transferencia radiativa en geometría axisimétrica para sintetizar imágenes infrarrojas multiespectrales comparables con mediciones de cámara Telops MS-M1K. La validación experimental en llamas de difusión laminares axisimétricas (Yale 60 y Yale 80) demuestra reproducción cuantitativa de mediciones experimentales con errores relativos entre 16-67% dependiendo del filtro y la llama. El análisis de descomposición espectral revela que la separabilidad entre contribuciones de gas y hollín depende críticamente de la selección del filtro y contenido de hollín, identificando F6 como una banda casi pura de CO_2 , F7 y F8 como bandas sensibles a hollín- H_2O y F5 como una banda mixta de todas las especies. El análisis de sensibilidad mediante elasticidades cuantifica como la temperatura emerge como la variable dominante universal, permitiendo proponer una estrategia de inversión secuencial que maximiza la separabilidad espectral. La aplicación a combustión de polimetilmetacrilato (PMMA) demuestra la aplicabilidad de la metodología a configuraciones complejas. Este trabajo establece por primera vez un protocolo sistemático para síntesis y validación de imágenes multiespectrales sintéticas en llamas con alto hollín, proporcionando herramientas metodológicas para monitoreo de emisiones industriales, optimización de combustión, caracterización de incendios y desarrollo de diagnóstico óptico no intrusivo.

Palabras clave: Transferencia radiativa, hollín, termografía infrarroja multiespectral, modelado Line-by-Line, llamas de difusión, diagnóstico óptico no intrusivo, cámara Telops.



Abstract

Atmospheric soot pollution constitutes a critical public health and environmental challenge in Chile, evidencing the urgency for accurate soot characterization methodologies. However, quantifying soot in combustion processes faces fundamental technical challenges: thermal radiation from high-soot flames results from complex superposition between discrete spectral bands of combustion gases and continuous soot emission, hindering individual contributor identification through conventional infrared thermography. This work develops and experimentally validates a spectrally resolved direct radiative transfer modeling methodology using a high-resolution Line-by-Line for gases, the Chang-Charalampopoulos model for soot in Rayleigh regime, and numerical solution of the radiative transfer equation in axisymmetric geometry to synthesize multispectral infrared images comparable with Telops MS-M1K camera measurements. Experimental validation on axisymmetric laminar diffusion flames (Yale 60 and Yale 80) demonstrates quantitative reproduction of experimental measurements with relative errors between 16-67% depending on filter and flame. Spectral decomposition analysis reveals that separability between gas and soot contributions critically depends on filter selection and soot content, identifying F6 as an almost pure CO₂ band, F7 and F8 as soot-H₂O-sensitive bands and F5 as a mixed band of every species. Sensitivity analysis through elasticities quantifies how temperature emerges as the universal dominant variable, enabling proposal of a sequential inversion strategy that maximizes spectral separability. Application to polymethylmethacrylate (PMMA) combustion demonstrates methodology applicability to complex configurations. This work establishes for the first time a systematic protocol for synthesis and validation of synthetic multispectral images in high-soot flames, providing methodological tools for industrial emissions monitoring, combustion optimization, fire characterization, and non-intrusive optical diagnostics development.

Keywords: Radiative transfer, soot, multispectral infrared thermography, Line-by-Line modeling, diffusion flames, non-intrusive optical diagnostics, Telops camera.

Índice

1	Problema de Investigación	1
2	Objetivos	4
2.1	Objetivo general.	4
2.2	Objetivos específicos.	4
3	Marco teórico.	6
3.1	Contaminación atmosférica y hollín	6
3.1.1	Contexto: contaminación por material particulado	6
3.1.2	El Hollín: formación, efectos y su importancia	6
3.1.3	Desafíos en la cuantificación del hollín	7
3.2	Fundamentos de la transferencia radiativa	8
3.2.1	Radiación térmica y leyes fundamentales	8
3.2.2	Radiación en materiales reales	9
3.2.3	Radiación en medios participativos	10
3.2.4	Especies radiativamente activas en la combustión	11
3.3	La Ecuación de Transferencia Radiativa (RTE)	12
3.3.1	Mecanismos Radiativos Fundamentales.	12
3.3.2	Derivación de la RTE	12
3.3.3	Casos Particulares de la RTE	16
3.3.4	Coefficiente de Absorción Espectral y Ensanchamiento de Líneas	16
3.4	Bases de datos espectroscópicas	17
3.4.1	HITRAN	17
3.4.2	HITEMP	18
3.4.3	Método Line-by-Line (LBL)	19
3.5	Diagnóstico de llamas con imágenes infrarrojas	21
3.5.1	Fundamentos de la Termografía Infrarroja	21
3.5.2	Las cámaras infrarrojas Telops	22
3.5.3	Características de las Cámaras Infrarrojas Telops	22
3.5.4	Modelos de cámaras	22
3.5.5	Aplicaciones y casos de éxito del uso de cámaras infrarrojas Telops en combustión	24
3.5.6	La cámara Telops MS-M1K	27
3.6	Llamas de estudio	29
3.6.1	Llamas de difusión laminares axisimétricas tipo Yale	29
3.6.2	Combustión de polímeros: PMMA	30
3.7	Simulación numérica de llamas: el código CoFlame	34
3.7.1	Características principales	34
3.7.2	Validación y aplicaciones	34
3.7.3	Limitaciones reconocidas	35



4	Metodología	36
4.1	Marco general del trabajo	36
4.1.1	Enfoque de Modelo Directo	36
4.1.2	Caso de estudio: llamas Yale	36
4.1.3	Flujo metodológico del modelo directo	37
4.1.4	Aplicación demostrativa: Pirólisis de PMMA	38
4.2	Simulación numérica de llamas con CoFlame	38
4.2.1	Configuración del dominio computacional	39
4.2.2	Mecanismo químico y modelo de hollín	40
4.2.3	Condiciones de operación: llamas Yale	40
4.3	Modelo directo de Transferencia radiativa	41
4.3.1	Supuestos fundamentales del modelo	41
4.3.2	Formulación de la ecuación de transferencia radiativa	42
4.3.3	Geometría y discretización espacial	42
4.3.4	Cálculo de propiedades radiativas	45
4.3.5	Modelo de absorción del hollín	46
4.3.6	Integración numérica de la RTE	47
4.3.7	Integración espectral sobre bandas de filtros	47
4.3.8	Separación de contribuciones por especie	48
4.3.9	Costo computacional:	48
4.4	Configuración experimental	49
4.4.1	Especificaciones de la cámara infrarroja multiespectral Telops MS-M1K	49
4.4.2	Experimento con Llamas Yale 60 y Yale 80	50
4.5	Análisis, sensibilidad y descomposición espectral	51
4.5.1	Análisis de espectros Line-by-Line	51
4.5.2	Descomposición por especies	52
4.5.3	Análisis de elasticidad	53
4.5.4	Comparación entre imágenes sintéticas y experimentales	54
4.6	Caso de aplicación: pirólisis y combustión de PMMA	54
4.6.1	Configuración experimental	55
4.6.2	Procedimiento experimental	56
4.6.3	Análisis del heater length	57
5	Resultados	58
5.1	Campos de Entrada desde CoFlame	58
5.2	Espectros de alta resolución en puntos representativos	60
5.2.1	Espectros Yale 60	60
5.2.2	Espectros Yale 80	62
5.3	Intensidades totales integradas por filtro	64
5.4	Análisis Espectral y Descomposición por Especies	66
5.4.1	Campos de contribución por especie: Filtro 5 - Yale 60	66
5.4.2	Campos de contribución por especie: Filtro 6 - Yale 60	68
5.4.3	Campos de contribución por especie: Filtro 7 - Yale 60	69



5.4.4	Campos de contribución por especie: Filtro 8 - Yale 60	71
5.4.5	Campos de contribución por especie: Filtro 5 - Yale 80	73
5.4.6	Campos de contribución por especie: Filtro 6 - Yale 80	75
5.4.7	Campos de contribución por especie: Filtro 7 - Yale 80	76
5.4.8	Campos de contribución por especie: Filtro 8 - Yale 80	79
5.4.9	Contribuciones espectrales en puntos clave de la llama	81
5.5	Análisis de Sensibilidad	86
5.5.1	Elasticidades en puntos representativos de la Yale 60	86
5.5.2	Elasticidades en puntos representativos de la Yale 80	88
5.5.3	Síntesis de los resultados de sensibilidad	90
5.6	Comparación Imágenes Sintéticas vs. Experimentales	92
5.6.1	Visión general: Imágenes 2D	92
5.6.2	Resultados para Yale 60	92
5.6.3	Resultados para Yale 80	96
5.6.4	Comparativa entre Yale 60 y Yale 80	99
5.7	Síntesis e Implicaciones para Diagnóstico Espectral	100
5.7.1	Roles espectrales de cada filtro	100
5.7.2	Validación cuantitativa del modelo directo	101
5.7.3	Fuentes probables de discrepancia	101
5.7.4	Implicaciones para futura inversión espectral	102
5.8	Experimento de Aplicación: Pirólisis de PMMA	104
5.8.1	Observación de fases de combustión	104
5.8.2	Efecto de la atmósfera en la morfología de llama	105
5.8.3	Análisis del heater length	109
5.8.4	Análisis de Intensidad Radiativa	112
5.9	Limitaciones y desafíos identificados en el Experimento con PMMA	120
5.9.1	Principales conclusiones del experimento de PMMA	120
5.9.2	Limitaciones del trabajo actual	120
5.9.3	Trabajo futuro	122
6	Conclusiones	124
6.1	Síntesis de Resultados	124
6.2	Cumplimiento de Objetivos	125
6.3	Limitaciones del Trabajo	126
6.4	Trabajo Futuro	126
7	Reflexión Final	127
	Bibliografía	128
	Anexo	133

Índice de figuras

3.1	Ejemplo de datos obtenidos a través de la librería HAPI.	18
3.2	Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo FAST. Tomado de [1].	23
3.3	Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo HIPER-CAM. Tomado de [2].	23
3.4	Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo MS-IR. Tomado de [1].	24
3.5	Imágenes multiespectrales resueltas en el tiempo de una explosión generada por la pólvora negra quemada en una vela. Tomado de [3].	25
3.6	Imagen del helicóptero y el soporte que llevan a la cámara, referido como gimbal. Tomado de [2].	26
3.7	Imagen de uno de los químicos a identificar y su detección a una altura de 300 m. Tomado de [2].	26
4.1	Diagrama del proceso directo de cálculo de intensidad	37
4.2	Geometría de proyección axisimétrica.	43
4.3	Diagrama de ejemplificación del régimen de Rayleigh	46
4.4	Resumen del proceso de Calibración de la cámara Telops [4].	50
4.5	Configuración experimental para llamas Yale. La cámara (1) observa el quemador Yale (2) a una distancia de 51 cm.	50
4.6	Configuración experimental para el experimento con PMMA.	55
5.1	Campos de entrada desde CoFlame para Yale 60. De izquierda a derecha: fracción volumétrica de hollín f_v (ppm), temperatura T (K), fracción molar de CO_2 (X_{CO_2}), fracción molar de H_2O ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) y fracción molar de CO (X_{CO}).	58
5.2	Campos de entrada desde CoFlame para Yale 80. De izquierda a derecha: fracción volumétrica de hollín f_v (ppm), temperatura T (K), fracción molar de CO_2 (X_{CO_2}), fracción molar de H_2O ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) y fracción molar de CO (X_{CO}).	59
5.3	Puntos representativos Yale 60. Colores: rojo=hollín, verde= CO_2 , azul= T	60
5.4	Yale 60: Espectros LBL de alta resolución en puntos representativos. Columnas: punto f_v max, punto CO_2 max, punto T max. Líneas: azul= CO_2 , roja= H_2O , gris= CO , verde=soot. Rectángulos sombreados: rangos de filtros F5-F8.	60
5.5	Puntos representativos Yale 80. Colores: rojo=hollín, verde= CO_2 , azul= T	62
5.6	Yale 80: Espectros LBL de alta resolución en puntos representativos. Columnas: punto f_v max, punto CO_2 max, punto T max. Líneas: azul= CO_2 , roja= H_2O , gris= CO , verde=soot. Rectángulos sombreados: rangos de filtros F5-F8.	63
5.7	Campos de intensidad total para los cuatro filtros, Yale 60.	64
5.8	Campos de intensidad total para los cuatro filtros, Yale 80.	65
5.9	Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 5 en Yale 60. Filas: H_2O , CO_2 , CO , hollín.	66
5.10	Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 5 en Yale 60. Filas: H_2O , CO_2 , CO , hollín.	67



5.11 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 6 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	68
5.12 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 6 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	68
5.13 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 7 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , hollín.	69
5.14 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 7 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , hollín.	70
5.15 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 8 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , hollín.	71
5.16 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 8 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , hollín.	72
5.17 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 5 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	73
5.18 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 5 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	74
5.19 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 6 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	75
5.20 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 6 en Yale 60. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	76
5.21 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 7 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	77
5.22 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 7 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	78
5.23 Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 8 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	79
5.24 Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 8 en Yale 80. Filas: H ₂ O, CO ₂ , CO, hollín.	80
5.25 Puntos seleccionados para evaluar la contribución fraccional en la Yale 60 . .	81
5.26 Contribución fraccional por especie en puntos representativos Yale 60. Cada grupo de 4 barras corresponde a un filtro (F5-F8). Colores: azul=CO ₂ , rojo=H ₂ O, verde=CO, amarillo=hollín.	82
5.27 Puntos seleccionados para evaluar la contribución fraccional en la Yale 80 . .	83
5.28 Contribución fraccional por especie en puntos representativos Yale 80. Cada grupo de 4 barras corresponde a un filtro (F5-F8). Colores: azul=CO ₂ , rojo=H ₂ O, verde=CO, amarillo=hollín.	84
5.29 Yale 60: Elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^\phi$ en cuatro puntos (máximo T, CO ₂ , H ₂ O, f_v). Colores: verde = H ₂ O, azul = CO ₂ , gris = hollín, rojo = temperatura.	86
5.30 Yale 60: Elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^\phi$ en cuatro puntos (máximo T, CO ₂ , H ₂ O, f_v). Colores: verde = H ₂ O, azul = CO ₂ , gris = hollín, rojo = temperatura.	88
5.31 Yale 60: Imágenes de radiancia para los cuatro filtros. Izquierda: sintéticas. Derecha: experimentales. Unidades: W/(cm ² ·sr).	92



5.32	Yale 60: Perfiles axiales de intensidad en el eje central para F5-F8. Línea roja continua: experimental. Línea azul continua: numérico total. Líneas punteadas: contribuciones separadas de CO ₂ , H ₂ O, CO, hollín del modelo numérico.	93
5.33	Yale 60: Perfiles radiales de intensidad en $z = 2$ cm para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas del modelo numérico.	95
5.34	Yale 80: Imágenes de radiancia para los cuatro filtros. Izquierda: sintéticas. Derecha: experimentales. Unidades: W/(cm ² ·sr).	96
5.35	Yale 80: Perfiles axiales de intensidad en el eje central para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas de CO ₂ , H ₂ O, CO, hollín del modelo numérico.	97
5.36	Yale 80: Perfiles radiales de intensidad en $z = 2$ cm para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas del modelo numérico.	98
5.37	Fases de combustión del PMMA. Observadas a través del F7.	104
5.38	Fases de combustión del PMMA considerando el mismo máximo de intensidad. Observados a través del F7.	104
5.39	Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 2	105
5.40	Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 6	105
5.41	Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 7	106
5.42	Conos de PMMA posterior al experimento	106
5.43	Imágenes infrarrojas durante la combustión activa (arriba) e inmediatamente después de la extinción forzada de la llama para la condición 29. Se muestran tres filtros espectrales: Filtro 1 (izquierda), Filtro 2 (centro) y Filtro 7 (derecha).	109
5.44	Acercamiento a la zona de precalentamiento en la condición 29 post-extinción.	110
5.45	Heater length en función del índice de oxígeno (OI) para las tres velocidades de coflow. Las líneas punteadas representan ajustes polinómicos de segundo orden.	111
5.46	Arriba: Campos de intensidad radiativa en Filtro 6 (CO ₂) durante la fase estable de combustión alineados en $z = 3$ cm. Abajo: Perfiles de intensidad $I(z)$ para las nueve condiciones de atmósfera.	113
5.47	Arriba: Campos de intensidad radiativa en Filtro 7 (hollín + H ₂ O) durante la fase estable de combustión alineados en $z = 3$ cm. Abajo: Perfiles de intensidad $I(z)$ para las nueve condiciones de atmósfera.	115
5.48	Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 6	117
5.49	Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 2	118
5.50	Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 7	119
1	Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 con escalas de color independientes para cada condición experimental.	133



2	Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 con escala de color común.	133
3	Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 en el momento posterior al apagado.	133
4	Campos de intensidad radiativa en Filtro 2 con escala de color común.	134
5	Campos de intensidad radiativa en Filtro 2 en el momento posterior al apagado.	134
6	Campos de intensidad radiativa en Filtro 3 con escalas de color independientes para cada condición experimental.	134
7	Campos de intensidad radiativa en Filtro 3 con escala de color común.	135
8	Campos de intensidad radiativa en Filtro 4 con escalas de color independientes para cada condición experimental.	135
9	Campos de intensidad radiativa en Filtro 4 con escala de color común.	135
10	Campos de intensidad radiativa en Filtro 5 con escalas de color independientes para cada condición experimental.	136
11	Campos de intensidad radiativa en Filtro 5 con escala de color común.	136
12	Campos de intensidad radiativa en Filtro 6 con escala de color común.	136
13	Campos de intensidad radiativa en Filtro 7 con escala de color común.	137
14	Campos de intensidad radiativa en Filtro 8 con escalas de color independientes para cada condición experimental.	137
15	Campos de intensidad radiativa en Filtro 8 con escala de color común.	137



Índice de tablas

3.1	Especificaciones de la cámara Telops MS-M1K.	27
3.2	Filtros espectrales de la cámara MS-M1K.	27
3.3	Propiedades térmicas y de combustión del PMMA.	31
4.1	Condiciones de operación de las llamas Yale estudiadas.	36
4.2	Comparación entre el modelo de radiación SNB usado en CoFlame y el modelo LBL desarrollado.	39
4.3	Condiciones de operación para las simulaciones de las llamas [5].	41
4.4	Estados termodinámicos de la base de datos LBL.	46
4.5	Filtros espectrales a considerar de la cámara Telops MS-IR.	49
4.6	Tiempos de integración por filtro y llama.	51
4.7	Condiciones probadas en experimentos PMMA. El flujo total se mantuvo constante para comparabilidad.	56
5.1	Yale 60: Contribuciones porcentuales de cada especie en los 4 filtros evaluadas en puntos representativos.	83
5.2	Yale 80: Contribuciones porcentuales de cada especie en los 4 filtros evaluadas en puntos representativos de la llama.	85
5.3	Síntesis de hallazgos del análisis de sensibilidad y sus implicaciones para inversión.	91
5.4	Yale 60 - Perfiles axiales: Comparación de intensidades máximas en eje central.	93
5.5	Yale 60 - Perfiles radiales: Comparación de intensidades máximas en $z = 2$ cm.	95
5.6	Yale 80 - Perfiles axiales: Comparación de intensidades máximas en eje central.	97
5.7	Yale 80 - Perfiles radiales: Comparación de intensidades máximas en $z = 2$ cm.	99
5.8	Síntesis de roles espectrales de los cuatro filtros basada en análisis integrado de contribuciones, elasticidades y validación experimental.	100
5.9	Heater length medido para cada condición de atmósfera. Los valores corresponden al instante inmediatamente posterior a la extinción de la llama, determinados mediante análisis de las imágenes obtenidas en el Canal 1.	111
5.10	Intensidad radiativa máxima medida en fase estable de combustión de PMMA para tres filtros espectrales. Valores en $W/(cm^2 \cdot sr)$	117

1. Problema de Investigación

La contaminación atmosférica por material particulado constituye uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública a nivel mundial, siendo responsable de aproximadamente 9 millones de muertes prematuras anuales [6]. Entre los contaminantes más críticos se encuentra el hollín, producto de la combustión incompleta de hidrocarburos, que no solo afecta gravemente la salud humana a través de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurodegenerativas, sino que también contribuye significativamente al forzamiento climático global debido a su capacidad de absorber radiación solar [7, 8]. En Chile, la situación es particularmente preocupante, ocupando el segundo lugar en América Latina en concentración de PM_{2,5}, con episodios críticos recurrentes en ciudades como Santiago, Temuco y Osorno que causan aproximadamente 4.500 muertes anuales [9, 10], evidenciando la urgencia de desarrollar metodologías efectivas para la caracterización y cuantificación precisa de emisiones de hollín.

A pesar de su importancia, la cuantificación precisa de hollín en procesos de combustión enfrenta múltiples desafíos técnicos. La radiación térmica emitida por llamas con alto contenido de hollín resulta de la superposición compleja de contribuciones de gases de combustión (CO₂, H₂O, CO) que emiten en bandas espectrales discretas, y partículas de hollín que presentan un espectro de emisión continuo en todo el rango infrarrojo [11]. Esta naturaleza multicomponente dificulta la separación e identificación individual de cada contribuyente mediante termografía infrarroja convencional de banda ancha. Además, la intensidad radiativa medida depende simultáneamente de temperatura, concentraciones de especies y fracción volumétrica de hollín (f_v), generando ambigüedad fundamental: cambios en la radiación observada pueden atribuirse indistintamente a variaciones de temperatura, composición química o contenido de hollín, sin que sea evidente cuál factor domina. Esta dependencia múltiple complica tanto la validación de simulaciones numéricas como el desarrollo de técnicas inversas para recuperar propiedades físicas a partir de mediciones radiativas.

Las técnicas tradicionales también presentan limitaciones. Métodos intrusivos como termopares, sondas de muestreo o LII (Laser-Induced Incandescence) perturban el campo de flujo y proporcionan información puntual, dificultando la obtención de campos bidimensionales completos [12]. Técnicas espectrales avanzadas como FTIR o espectrómetros hiperespectrales requieren equipamiento altamente especializado, calibraciones complejas y tiempos de adquisición prolongados, limitándose a entornos de laboratorio controlados [13]. En contraste, las cámaras infrarrojas multiespectrales de nueva generación, como las desarrolladas por Telops, ofrecen una alternativa prometedora al permitir medición no intrusiva con alta resolución espacial y temporal, registrando simultáneamente en múltiples bandas espectrales discretas que aprovechan las características distintivas de gases y hollín [1, 3]. Sin embargo, el uso efectivo de estas cámaras para caracterización cuantitativa requiere superar varios vacíos metodológicos fundamentales.

En primer lugar, no existe una metodología sistemática y validada que permita predecir la respuesta multiespectral de una cámara infrarroja a partir de campos conocidos de tempe-



ratura, composición de gases y fracción volumétrica de hollín. Esta capacidad de modelado directo, que requiere resolver la ecuación de transferencia radiativa (RTE) con resolución espectral suficiente mediante enfoques Line-by-Line, es fundamental para comprender qué información física contiene cada banda espectral, validar simulaciones numéricas mediante comparación directa con mediciones experimentales, y diseñar estrategias de inversión robustas. Sin este modelo directo validado, la interpretación de mediciones multiespectrales permanece cualitativa y las comparaciones con simulaciones son indirectas o basadas en aproximaciones simplificadas.

En segundo lugar, no está cuantificado sistemáticamente cómo el hollín en altas concentraciones modifica la radiación observable en cada banda espectral. Aunque se conoce cualitativamente que el hollín emite un espectro continuo superpuesto a las bandas discretas de los gases, faltan análisis cuantitativos que respondan: ¿en qué bandas domina el hollín cuando f_v alcanza varios ppm?, ¿cómo varía esta dominancia con temperatura y posición espacial?, ¿existen bandas donde el hollín sea despreciable incluso en llamas con alto contenido de hollín?, y ¿cuál es la sensibilidad de cada banda a perturbaciones en f_v , temperatura y fracciones molares? Esta falta de caracterización cuantitativa dificulta tanto la interpretación de mediciones experimentales como el diseño de técnicas de inversión.

En tercer lugar, no existen protocolos de validación establecidos que relacionen sistemáticamente simulaciones numéricas detalladas de llamas con alto contenido de hollín (códigos como CoFlame) con modelos de transferencia radiativa espectralmente resueltos y mediciones experimentales calibradas. La comparación cuantitativa con métricas claras de concordancia es esencial para validar tanto modelos de combustión como de transferencia radiativa en el régimen de alto hollín, pero este tipo de validación integrada aún no se ha realizado sistemáticamente para llamas con alto contenido de hollín.

Finalmente, aunque existe interés en desarrollar métodos inversos que recuperen campos de temperatura y composición a partir de mediciones multiespectrales, no está claro si esta inversión es robusta en presencia de alto contenido de hollín, donde el continuo radiativo puede enmascarar las bandas discretas de los gases, ni bajo qué condiciones o restricciones adicionales (por ejemplo, conociendo f_v y temperatura en ciertas regiones) tal inversión sería factible.

Con base en estos vacíos metodológicos, este trabajo aborda las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Es posible desarrollar un modelo directo de transferencia radiativa espectralmente resuelto mediante un enfoque Line-by-Line que, a partir de campos simulados de temperatura, composición de gases (CO_2 , H_2O , CO) y fracción volumétrica de hollín, sintetice imágenes multiespectrales que repliquen cuantitativamente las mediciones obtenidas con una cámara Telops MS-M1K en llamas con alto contenido de hollín?
2. ¿Cuáles son las contribuciones espectrales relativas de gases y hollín en cada banda de la cámara cuando f_v alcanza valores de 2-5 ppm, típicos de llamas de difusión de

etileno con alto contenido de hollín como Yale 60 y Yale 80? ¿En qué bandas domina cada contribuyente y cómo varía esta dominancia espacialmente?

3. ¿Cuál es la sensibilidad de la intensidad radiativa en cada banda a variaciones en temperatura, fracciones molares y fracción volumétrica de hollín? ¿Qué variables dominan la respuesta en cada banda y cómo se acoplan estos efectos en presencia de alto hollín?
4. Conociendo f_v y temperatura en la zona de formación de hollín, ¿es posible desarrollar un método inverso que recupere campos de temperatura y fracciones molares de CO_2 , H_2O y CO en el resto del dominio a partir de intensidades multiespectrales observadas? ¿Cuáles son las principales limitaciones de este problema inverso en llamas con alto contenido de hollín?

Para abordar estas preguntas, el trabajo se enfoca en el desarrollo y validación de un modelo directo Line-by-Line que utiliza bases de datos espectroscópicas HITRAN/HITEMP para gases con perfiles Voigt, el modelo de Chang-Charalampopoulos para hollín en régimen de Rayleigh, e integración de la RTE a lo largo de líneas de visión para sintetizar imágenes en cuatro bandas espectrales de la cámara Telops MS-M1K (filtros 5-8, rango 2.89–4.79 μm). La validación experimental se realiza en llamas de difusión laminares axisimétricas tipo Yale con alto contenido de hollín: Yale 60 (f_v 2-3 ppm) y Yale 80 (f_v 4-5 ppm), ambas caracterizadas por fracciones volumétricas significativas que permiten evaluar el desempeño en el régimen donde la contribución radiativa del hollín es dominante o comparable a la de los gases. El análisis incluye descomposición espectral por especies, cálculo de elasticidades para cuantificar sensibilidades, y comparación sistemática entre campos de intensidad sintéticos y experimentales.

Adicionalmente, se explora la posibilidad de desarrollar un método inverso que, partiendo de intensidades multiespectrales observadas y asumiendo conocimiento de f_v y temperatura en la zona de hollín (obtenibles mediante LII o pirómetro óptico), intente recuperar campos de temperatura y fracciones molares en regiones gaseosas. Se reconoce que este problema inverso es mal condicionado (ill-posed), especialmente con alto hollín, y esta componente exploratoria busca identificar limitaciones, evaluar factibilidad bajo restricciones, y establecer fundamentos metodológicos refinables en trabajos futuros, sin pretender producir una solución en el trabajo. Finalmente, se incluye aplicación demostrativa a combustión de PMMA como ilustración de extensión a configuraciones más complejas con pirólisis, turbulencia y geometrías no axisimétricas.

Este trabajo se delimita al considerar dispersión despreciable en el infrarrojo medio [11], asumir equilibrio termodinámico local, y limitar simulaciones a llamas estacionarias axisimétricas. El análisis se enfoca en cuatro bandas espectrales (F5-F8), excluyendo filtros de densidad óptica (F1-F4). El método inverso se desarrolla preliminarmente bajo la restricción de conocer f_v y temperatura en la zona de hollín, reflejando que el foco central es el modelo directo y su validación cuantitativa.

La relevancia de este trabajo se manifiesta en múltiples dimensiones. Metodológicamente,

establece por primera vez un protocolo sistemático para síntesis y validación de imágenes multiespectrales sintéticas en llamas con alto hollín. Científicamente, cuantifica sistemáticamente las contribuciones espectrales relativas de gases y hollín cuando f_v alcanza varios ppm, proporcionando información fundamental sobre cómo el hollín modifica las señales en diferentes rangos espectrales. Técnicamente, proporciona elasticidades y mapas de dominancia espectral que guían el diseño de futuros métodos inversos, identificando condiciones y restricciones para recuperar temperatura y composición con alto hollín. Desde el punto de vista aplicado, la validación en llamas Yale con alto hollín tiene implicaciones para monitoreo de emisiones industriales, optimización de procesos donde la formación de hollín es problemática, y caracterización de incendios. En el contexto nacional, contribuye al desarrollo de capacidades en modelado avanzado de transferencia radiativa y diagnóstico óptico, particularmente relevante para Chile dado el problema crónico de contaminación por material particulado en ciudades como Santiago, Temuco y Osorno, donde la combustión residencial genera altas concentraciones de hollín con efectos severos en salud pública.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general.

Desarrollar y validar una metodología de modelado directo de transferencia radiativa para caracterizar la contribución del hollín y gases de combustión (CO_2 , H_2O , CO) en imágenes infrarrojas multiespectrales de llamas, mediante la formación de imágenes sintéticas y su comparación con mediciones experimentales obtenidas con una cámara Telops MS-M1K.

2.2. Objetivos específicos.

Para lo anterior, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un modelo directo Line-by-line que permita calcular la intensidad espectral radiada por una llama en función de campos de temperatura, fracción molar de especies (CO_2 , CO , H_2O) y concentración de hollín, sintetizando imágenes multiespectrales comparables con las adquiridas por una cámara Telops MS-M1K.
2. Validar el modelo directo con llamas de referencia tipo Yale, comparando las imágenes generadas sintéticamente con las mediciones experimentales obtenidas mediante la cámara Telops, evaluando la concordancia en forma, magnitud y distribución espacial de la radiación en cada banda espectral.
3. Cuantificar y caracterizar el efecto del hollín en la radiación multiespectral observada por la cámara, determinando su contribución relativa en cada filtro para identificar las bandas espectrales donde la radiación está dominada por gases, por hollín, o presenta



contribuciones mixtas, estableciendo criterios para la discriminación gas-hollín en el diagnóstico óptico de llamas.

4. Realizar un análisis de sensibilidad y descomposición espectral en cada banda espectral a variaciones en temperatura, fracciones molares de especies y fracción volumétrica de hollín, de modo de identificar las bandas espectrales más apropiadas para la caracterización de cada variable.
5. Aplicar la cámara infrarroja multiespectral Telops al estudio experimental de la pirólisis y combustión de polimetacrilato de metilo (PMMA), adquiriendo datos multiespectrales de radiación de llama. Analizar cualitativamente la evolución térmica durante ignición y propagación de llama, evaluando el potencial y limitaciones de la técnica en configuraciones más complejas que las llamas laminares canónicas.
6. Diseñar de manera preliminar un método inverso para la estimación de campos de temperatura y composición de gases a partir de imágenes multiespectrales, evaluando su potencial y desafíos.



3. Marco teórico.

3.1. Contaminación atmosférica y hollín

3.1.1. Contexto: contaminación por material particulado

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales globales en la actualidad, siendo responsable de aproximadamente 9 millones de muertes prematuras anuales [6]. Entre los contaminantes más críticos se encuentra el material particulado (PM), especialmente las fracciones finas (PM_{2,5}) y ultrafinas (PM_{0,1}), que pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio y causar efectos adversos significativos en la salud [14].

Chile no es ajeno a esta problemática. Según Labraña et al. [10], el país ocupa el segundo lugar en América Latina en niveles de concentración de partículas finas (PM_{2,5}); con ciudades como Santiago, Temuco y Osorno experimentando episodios críticos recurrentes, especialmente durante los meses de invierno debido a factores como la inversión térmica, la quema residencial de leña, y las emisiones vehiculares e industriales. Se estima que la contaminación atmosférica por PM_{2,5} causa alrededor de 3.000 hospitalizaciones y 4.500 muertes anuales en el país [9].

Una fracción significativa del material particulado tiene su origen en procesos de combustión incompleta de hidrocarburos, generando partículas de carbono conocidas como hollín. La cuantificación y caracterización precisa del hollín son fundamentales para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación y control de emisiones.

3.1.2. El Hollín: formación, efectos y su importancia

El hollín es una sustancia sólida de tamaño muy pequeño que consiste en aproximadamente ocho partes de carbono y una parte de hidrógeno [15], el cual se considera un subproducto de la combustión incompleta de hidrocarburos y otras sustancias orgánicas [16]. En general, la mayoría de las PM (material particulado) se originan a partir del hollín [17].

La cuantificación y caracterización del hollín son fundamentales debido a su impacto en la salud humana, el medio ambiente y el clima.

Para la salud humana, el hollín puede causar o exacerbar enfermedades. Es reconocido que la exposición a hollín está relacionada con el desarrollo de cáncer de piel, de pulmón, de esófago y de vejiga [16]. Por otro lado, de acuerdo con Padilla Lauriano and Villegas Silva [18] “La inhalación de partículas de hollín puede inducir un incremento de ciclooxigenasa-2 (COX-2), enzima de gran importancia en la respuesta inflamatoria inducida por estrés fisiológico y estímulos, efecto altamente significativo en la progresión de enfermedades neurodegenerativas”, cómo lo son el Alzheimer y la enfermedad de Parkinson.

También tiene impacto en el medio ambiente, el hollín es un potente agente de forzamiento

climático debido a su capacidad para absorber la luz solar y calentar la atmósfera [7]. En las cercanías a fuentes de producción de material particulado, el hollín puede concentrarse en la superficie de las hojas de los árboles, llegando a formar películas sobre el follaje que restringen la absorción lumínica y el proceso de fotosíntesis [18]. También contribuye al derretimiento de hielo y nieve cuando se deposita en estas superficies, reduciendo su albedo [8].

3.1.3. Desafíos en la cuantificación del hollín

Como se comentó anteriormente, modelar y cuantificar el hollín es una parte importante para comprender el proceso de formación del hollín [17], lo cual contribuye al desarrollo de técnicas eficaces para reducir sus emisiones y su impacto en la salud humana [16, 19], el clima [20] y los ecosistemas [8]. Sin embargo, este es un proceso complejo por diversas razones, tales cómo:

- Interferencias de Otras Partículas en la medición: Existe gran cantidad de componentes primarios en los combustibles y en el aire [17]. Partículas como el polvo, sales y otros aerosoles pueden interferir con las mediciones, afectando la precisión.
- Heterogeneidad de las Muestras: Los procesos de combustión generan la emisión no solo de partículas de hollín, sino también de monóxidos de carbono, óxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados y otros compuestos [21]; de este modo, dependiendo de donde y cómo se tome la medición la distribución del hollín será variable, lo que dificulta obtener muestras representativas.
- Condiciones Ambientales: Factores como la humedad y la temperatura pueden afectar la recolección y el análisis del hollín [22]. De acuerdo con Tree and Svensson [15], en la combustión de Diesel en los aviones tener temperaturas más altas al final del proceso mejoran la quema del hollín, mientras que las temperaturas altas en el momento de la inyección reducen el arrastre de aire y aumentan la formación de hollín.
- Costos y Complejidad Técnica: Algunos métodos para la cuantificación del hollín requieren equipos caros y técnicos altamente capacitados [13], lo que puede limitar su uso en estudios de gran escala o en regiones con recursos limitados [23].

Debido a lo anterior, a menudo es necesario combinar varios enfoques para obtener resultados precisos y confiables [21].

Actualmente, existen diversos métodos para cuantificar el hollín, en función de las necesidades específicas del estudio y de los recursos disponibles [24]. Una técnica popular para la medición de fracción de hollín en una llama es conocida cómo pirometría óptica [25]; esta utiliza datos experimentales de intensidad de llamas, los cuales son capturados en diferentes bandas espectrales a través de equipos fotosensibles a la luz, cómo son las cámaras [26].

Las cámaras infrarrojas, específicamente, aprovechan las propiedades térmicas y de emisión del hollín y otras especies para capturar imágenes térmicas de las emisiones en tiempo real [27], proporcionando una visualización inmediata de la distribución térmica superficial y la densidad del hollín en el aire dentro y alrededor de los cuerpos observados.

De este modo, permiten un monitoreo continuo y en tiempo real de las emisiones, lo que es útil para identificar fuentes de contaminación y evaluar la efectividad de las medidas de control [26].

De acuerdo con Mantilla León and Tapia Romero [27], algunas de las características más importantes de una cámara infrarroja son las siguientes:

- Sensibilidad térmica: Conocida como NETD (ruido equivalente a la menor temperatura detectable). Define la mínima diferencia de temperatura entre dos píxeles que la cámara puede medir. A menor NETD, mayor exactitud en la medición termográfica.
- Precisión: Se refiere a la exactitud de la temperatura medida de un cuerpo con relación a su temperatura real.
- Resolución espacial: También conocido como IFOV (campo de visión instantánea), establece la claridad y detalle generado por una imagen infrarroja. Establece el límite de distancia de visión de los objetos.
- Frecuencia de la imagen: Característica de gran importancia en sistemas que sean conductores de calor, mientras más breve el tiempo entre imágenes mejor.

Las dificultades en el uso de cámaras incluyen el nivel de sensibilidad, pues esta debe ser suficiente para detectar las pequeñas emisiones de hollín, especialmente en ambientes con bajas concentraciones [25]) y las interferencias ambientales, pues factores como la temperatura ambiente, la humedad y la presencia de otras partículas pueden afectar la precisión de las mediciones [3].

Para obtener una cuantificación precisa, el uso de cámaras puede integrarse con otros métodos de medición, como la espectroscopía de absorción de luz [28].

3.2. Fundamentos de la transferencia radiativa

3.2.1. Radiación térmica y leyes fundamentales

De acuerdo con [11], los términos transferencia de calor radiativa y radiación térmica se usan para describir la ciencia de la transferencia de calor causada por las ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y convección, la radiación no requiere un medio material para propagarse, pudiendo transmitir energía a través del vacío. Ejemplos cotidianos de la radiación térmica incluyen el efecto de calentamiento de la luz solar o la emisión térmica que emiten las estufas o chimeneas.



Todos los materiales con temperatura superior al cero absoluto emiten continuamente radiación electromagnética en forma de fotones. La cantidad y distribución espectral de esta energía radiada dependen fundamentalmente de la temperatura del material y sus propiedades radiativas [11].

La Ley de Planck

Un cuerpo negro se define como aquel que tiene la propiedad de absorber todos los rayos de radiación electromagnética que inciden, sin reflejar, no dejándolos salir después [29]. Este concepto teórico establece el límite superior de emisión radiativa para cualquier material a una temperatura dada.

La radiación de un cuerpo negro puede describirse a través de la Ley de Planck:

$$I_{\lambda}^{bb} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (3.1)$$

donde I_{λ}^{bb} es la intensidad espectral de cuerpo negro a una longitud de onda λ , h es la constante de Planck, k la constante de Boltzmann, c la velocidad de la luz y T la temperatura.

La Ley de Stefan-Boltzmann.

Integrando la Ley de Planck sobre todo el espectro electromagnético, se obtiene la potencia emisiva total de un cuerpo negro:

$$E^{bb} = \int_0^{\infty} I_{\lambda}^{bb} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Esta relación establece que la emisión total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

La Ley de Wien

La longitud de onda de máxima emisión espectral se determina mediante la Ley de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

donde b es la constante de desplazamiento de Wien.

Esta ley explica por qué los objetos calientes tienden a emitir luz visible (longitudes de onda cortas), mientras que los objetos a temperatura ambiente emiten principalmente en el infrarrojo.

3.2.2. Radiación en materiales reales

La radiación térmica de un cuerpo negro constituye un límite teórico de emisión, en el que se asume que toda la energía incidente es absorbida y reemitida con una distribución

espectral que depende únicamente de la temperatura. Sin embargo, los materiales reales no cumplen con este comportamiento ideal, sino que presentan desviaciones significativas respecto al cuerpo negro. Estas desviaciones vienen dadas por:

- Emisión selectiva: Se refiere a que los materiales emiten y absorben preferentemente en ciertos rangos espectrales específicos.
- Dependencia direccional: Las propiedades radiativas varían según la dirección.
- Dependencia de la temperatura: Las propiedades cambian con la temperatura.

Emisividad Espectral. La relación entre la emisión real de un material y la de un cuerpo negro a la misma temperatura se define como la emisividad espectral:

$$\eta_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda}^{bb}} \quad (3.3)$$

Esta magnitud adimensional varía entre 0 y 1, caracterizando la eficiencia emisiva del material en cada longitud de onda.

Dado que η_{λ} varía fuertemente con la frecuencia y la composición química de la mezcla, el uso de modelos espectrales resulta indispensable para evaluar fenómenos de transferencia radiativa en sistemas de combustión, ya que la suposición de un gas como “cuerpo gris” o como “cuerpo negro” puede conducir a estimaciones erróneas de temperatura y flujo radiativo.

Radiación en Gases de Combustión. En gases radiativamente activos como el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O) y el monóxido de carbono (CO), la radiación se concentra en bandas espectrales bien definidas, que corresponden a vibraciones y rotaciones moleculares.

Por ejemplo, el CO_2 posee sus bandas principales en torno a los $2,7 \mu\text{m}$, $4,3 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$, mientras que el H_2O presenta un espectro mucho más complejo, con múltiples bandas de absorción en el infrarrojo medio [11]. Esta naturaleza selectiva implica que la radiación gaseosa no puede modelarse como un continuo, sino que requiere una representación espectral detallada para capturar adecuadamente la distribución de la energía radiada.

3.2.3. Radiación en medios participativos

Un medio participativo es aquel que simultáneamente absorbe y emite radiación térmica, alterando el campo radiativo que lo atraviesa [11]. A diferencia de medios transparentes o superficies, los medios participativos requieren considerar los efectos volumétricos de la radiación.

En llamas axisimétricas, las características del medio participativo incluyen:

- Distribución no uniforme: Gradientes radiales de temperatura y concentración de especies.

- Geometría cilíndrica: Simplificación axisimétrica que reduce la complejidad computacional.
- Acoplamiento fuerte: La radiación afecta significativamente el balance energético y las temperaturas locales.
- Especies múltiples: CO_2 , H_2O , CO y posibles productos de la pirólisis contribuyen a la absorción/emisión.

La modelización requiere considerar la variación espacial de las propiedades termofísicas y concentraciones de especies.

3.2.4. Especies radiativamente activas en la combustión

Para el análisis realizado en este trabajo, se determinó trabajar con 4 especies: Dióxido de Carbono (CO_2), Agua (H_2O), Monóxido de Carbono (CO) y Hollín. Algunas características radiativas importantes de estas especies son [11]:

1. CO_2 :

- Sus bandas principales son $2,7 \mu\text{m}$, $4,3 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$.
- Es una especie predominante en combustión incompleta.
- La emisión se concentra en bandas discretas debido a las transiciones vibrorotacionales.

2. H_2O :

- Posee un espectro más complejo con múltiples bandas de absorción.
- Es el producto universal de la combustión de hidrocarburos.
- Bandas principales: $1,38 \mu\text{m}$, $1,87 \mu\text{m}$, $2,7 \mu\text{m}$ y banda ancha 5 a $8 \mu\text{m}$.

3. CO :

- Posee su banda fundamental alrededor de los $4,7 \mu\text{m}$.
- Es de gran importancia en procesos de combustión incompleta.

4. Hollín:

- Continuo en el rango infrarrojo, aproximadamente proporcional a λ^{-1} .
- Emisor/absorbente fuerte en todo el espectro térmico.
- Se forma en combustión rica de hidrocarburos aromáticos.

Esta naturaleza selectiva en los gases implica que no pueden modelarse como cuerpos grises, requiriendo tratamiento espectral detallado.

3.3. La Ecuación de Transferencia Radiativa (RTE)

3.3.1. Mecanismos Radiativos Fundamentales.

Absorción: Proceso mediante el cual la radiación electromagnética es convertida en energía interna del medio. La intensidad absorbida es proporcional a la intensidad incidente:

$$dI_{\lambda,abs} = -\kappa_{abs}I_{\lambda}ds$$

donde κ_{abs} es el coeficiente de absorción espectral.

Emisión: Conversión de energía interna en radiación electromagnética. Para un medio en equilibrio termodinámico local:

$$dI_{\lambda,emi} = \kappa_{abs}I_{\lambda}^{bb}ds \quad (3.4)$$

La relación entre emisión y absorción, establecida en la Ley de Kirchhoff [30], dispone que, en equilibrio térmico, el coeficiente de emisión es igual al coeficiente de absorción para una misma longitud de onda y temperatura.

Dispersión o Scattering: Se refiere a la redirección de la radiación sin cambio en la energía del fotón. En gases de combustión como el C_2O , H_2O o el CO a temperaturas típicas, la dispersión en el infrarrojo medio es generalmente despreciable comparada con la absorción y emisión [11] [31], esto pues las moléculas son mucho más pequeñas que la longitud de onda.

3.3.2. Derivación de la RTE

Supuestos fundamentales:

- Las ondas electromagnéticas viajan en línea recta.
- El medio es estacionario.
- El medio no polariza la radiación.
- El medio está en equilibrio estacionario.

Tomando como base una sección de radio dA y largo dS con el cual incide un rayo \hat{S} , el balance de energía radiativa resulta en lo siguiente:

Disminución de energía Radiativa

La energía radiativa puede disminuir por:

1. **Absorción:** Se ha observado que la energía absorbida es proporcional a la intensidad de la misma por el camino óptico. De este modo:

$$d(I_{\lambda})_{abs} = -\kappa_{abs}I_{\lambda}d_s \quad (3.5)$$

Donde κ_{abs} es el coeficiente de absorción del medio.

2. **Dispersión o Scattering:** Es muy similar a la absorción, respecto a que una parte de la radiación se remueve de la dirección de propagación, con la diferencia de que la energía absorbida se transforma en energía interna, mientras que la dispersada se redirecciona y aparece como un aumento de energía radiativa en otra dirección.

De este modo:

$$(dI_\lambda) = -\sigma_{S\lambda} I_\lambda dS \quad (3.6)$$

Donde $\sigma_{S\lambda}$ representa el coeficiente de dispersión.

3. **Atenuación total:** La atenuación total por absorción y dispersión se denomina como extinción. El coeficiente de extinción se define como:

$$\kappa_{ext} = \kappa_{abs} + \sigma_{S\lambda} \quad (3.7)$$

Luego, el espesor óptico basado en extinción se define como:

$$\tau_\lambda = \int_0^S \kappa_{ext} dS$$

Definiendo un cociente entre dispersión y absorción $\alpha_{sa} = \sigma_{S\lambda}/\kappa_{abs}$, se puede escribir el coeficiente de extinción como:

$$\kappa_{ext} = \kappa_{abs}(1 + \alpha_{sa})$$

Aumento de energía radiativa Un rayo puede aumentar su energía por emisión o dispersión entrante desde otras direcciones.

1. **Emisión:** Se ha observado que el aumento de energía se relaciona a la cantidad de energía por unidad de volumen:

$$(dI_\lambda)_{emi} = J_\lambda dS \quad (3.8)$$

donde J_λ es el coeficiente de emisión.

En equilibrio termodinámico local, la intensidad total debe ser proporcional a la intensidad de cuerpo negro, (I_λ^{bb}) de modo que:

$$J_\lambda = \kappa_{abs} I_\lambda^{bb} \quad (3.9)$$

Luego:

$$(dI_\lambda)_{emi} = \kappa_{abs} I_\lambda^{bb} dS \quad (3.10)$$

Así, la constante de proporcionalidad es la misma que para absorción. En un medio que emite y absorbe (sin dispersión):

$$dI_\lambda = \kappa_{abs} I_\lambda^{bb} dS - \kappa_{abs} I_\lambda dS$$

Dividiendo por dS :

$$\frac{dI_\lambda}{dS} = \kappa_{abs} I_\lambda^{bb} - \kappa_{abs} I_\lambda = \kappa_{abs} (I_\lambda^{bb} - I_\lambda) \quad (3.11)$$

Para una capa (dS) isotérmica de gas, I_λ^{bb} es constante. Luego, reordenando la 3.11:

$$\frac{dI_\lambda}{I_\lambda^{bb} - I_\lambda} = \kappa_{abs} dS \quad (3.12)$$

Integrando lo anterior:

$$\int_{I_\lambda(0)}^{I_\lambda(S)} \frac{dI_\lambda}{I_\lambda^{bb} - I_\lambda} = \int_0^S \kappa_{abs} dS \quad (3.13)$$

Se obtiene lo siguiente:

$$\ln \left(\frac{I_\lambda^{bb} - I_\lambda(S)}{I_\lambda^{bb} - I_\lambda(0)} \right) = -\tau_\lambda \quad (3.14)$$

$$I_\lambda^{bb} - I_\lambda(S) = (I_\lambda^{bb} - I_\lambda(0))e^{-\tau_\lambda} \quad (3.15)$$

$$I_\lambda(S) = I_\lambda(0)e^{-\tau_\lambda} + I_\lambda^{bb}(1 - e^{-\tau_\lambda}) \quad (3.16)$$

Si se considera que solo hay emisión ($I_\lambda(0) = 0$). Entonces la emisividad queda como:

$$\epsilon_\lambda = \frac{I_\lambda(S)}{I_\lambda^{bb}} = 1 - e^{-\tau_\lambda} \quad (3.17)$$

2. **Dispersión (incattering):** La dispersión entrante tiene contribución desde todas las direcciones, por lo que se debe integrar todo el ángulo sólido Ω .

Considerando un flujo radiativo llegando a un volumen $dV = dAdS$ desde un conjunto de rayos infinitesimal en la dirección \hat{S}_i . La intensidad radiativa es el flujo de energía por unidad de área normal a los rayos, por $d\lambda$, por $d\Omega$ y por dA .

De este modo, el flujo radiativo espectral llegando a dA desde el ángulo sólido $d\Omega_i$ está dado por:

$$F_\lambda = I_\lambda(\hat{S}_i)(dA\hat{S}_i\hat{S})d\Omega_i d\lambda \quad (3.18)$$

Este flujo viaja una distancia $dS' = dS/(\hat{S}_i\hat{S})$ a través del volumen dV . Por lo tanto, la energía dispersada fuera de \hat{S}_i será:

$$F_\lambda \sigma_{S\lambda} dS' = \sigma_{S\lambda} [I_\lambda(\hat{S}_i)(dA\hat{S}_i\hat{S})d\Omega_i d\lambda] \frac{dS}{\hat{S}_i\hat{S}} = \sigma_{S\lambda} I_\lambda(\hat{S}_i) dAd\Omega_i d\lambda dS \quad (3.19)$$

De lo anterior, se define la función de fase Φ cómo la probabilidad de que un rayo \hat{S}_i caiga en \hat{S} , siendo $\Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S})/4\pi$ lo que se dispersa en el cono $d\Omega$ en la dirección \hat{S} .

Así, el flujo de energía desde $d\Omega_i$ hacia $d\Omega$ es:

$$\sigma_{S\lambda} I_\lambda(\hat{S}_i) dAd\Omega_i d\lambda dS \frac{\Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S})}{4\pi} d\Omega \quad (3.20)$$

El flujo de Energía dispersado hacia \hat{S} desde todos los \hat{S}_i se determina integrando en todas las direcciones:

$$(dI_\lambda)_{sca}(\hat{S})dAd\Omega d\lambda = \int_{4\pi} \sigma_{S\lambda} I_\lambda(\hat{S}_i) dAd\Omega_i d\lambda dS \frac{\Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S})}{4\pi} d\Omega \quad (3.21)$$

$$(dI_\lambda)_{sca}(\hat{S}) = \frac{dS\sigma_{S\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega_i \quad (3.22)$$

De este modo, el flujo de energía desde $d\Omega_i$ hacia todas las direcciones será:

$$\sigma_{S\lambda} I_\lambda(\hat{S}_i) dAd\Omega d\lambda dS \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega_i \quad (3.23)$$

Comparando la Ecuación 3.23 con la Ecuación 3.19, se concluye que:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega \equiv 1 \quad (3.24)$$

La RTE

Realizando el balance de energía en la dirección \hat{S} :

$$I_\lambda(S + dS, \hat{S}, t + dt) - I_\lambda(S, \hat{S}, t) = J_\lambda(S, t) dS + \frac{\sigma_{S\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega dS - \kappa_{abs} I_\lambda(S, \hat{S}, t) dS - \sigma_{S\lambda} I_\lambda(S, \hat{S}, t) dS$$

Aplicando Taylor:

$$I_\lambda(S + dS, \hat{S}, t + dt) = I_\lambda(S, \hat{S}, t) + dt \frac{\partial I_\lambda}{\partial t} + dS \frac{\partial I_\lambda}{\partial S} \quad (3.25)$$

De la ecuación Lagrangeana: $dS = cdt$ con c la velocidad de la luz.

Luego, reemplazando y dividiendo el balance de energía por dS :

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\lambda}{\partial t} + \frac{\partial I_\lambda}{\partial S} = J_\lambda + \frac{\sigma_{S\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega - \kappa_{abs} I_\lambda - \sigma_{S\lambda} I_\lambda \quad (3.26)$$

Dado que c es grande, $\frac{1}{c} \frac{\partial I_\lambda}{\partial t}$ se puede aproximar a 0. Luego,

$$\frac{\partial I_\lambda}{\partial S} = J_\lambda + \frac{\sigma_{S\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega - \kappa_{abs} I_\lambda - \sigma_{S\lambda} I_\lambda \quad (3.27)$$

Considerando las Ecuación 3.7 y Ecuación 3.9:

$$\frac{\partial I_\lambda}{\partial S} = \kappa_{abs} I_\lambda^{bb} + \frac{\sigma_{S\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) d\Omega - \kappa_{ext} I_\lambda \quad (3.28)$$

3.3.3. Casos Particulares de la RTE

1. Medio sólo absorbente: Aplicando la RTE sobre un medio sin emisión térmica, se obtiene la Ley de Beer-Lambert

$$I_{\lambda}(L) = I_{\lambda}(0)e^{-\tau_{\lambda}} \quad (3.29)$$

2. Medio absorbente y emisor: Para gases de combustión en el infrarrojo medio, dado que la dispersión se considera despreciable ($\sigma_s \approx 0$), la RTE se simplifica [11] a un problema de emisión y absorción:

$$\frac{dI_{\lambda}}{ds} = \kappa_{abs}(I_{\lambda}^{bb} - I_{\lambda}) \quad (3.30)$$

En equilibrio termodinámico local:

$$I_{\lambda}(L) = I_{\lambda}(0)e^{-\tau_{\lambda}} + I_{\lambda}^{bb}(1 - e^{-\tau_{\lambda}}) \quad (3.31)$$

3. Transmitancia Espectral: la transmitancia espectral surge naturalmente como solución de la RTE [31]:

$$\mathcal{T}_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}(L)}{I_{\lambda}(0)} = e^{-\tau_{\lambda}} \quad (3.32)$$

Representando la fracción de radiación incidente que atraviesa el medio sin ser absorbida.

3.3.4. Coeficiente de Absorción Espectral y Ensanchamiento de Líneas

En la realidad, las transiciones moleculares no son infinitamente finas, sino que presentan ensanchamiento espectral. Este fenómeno resulta de diversos mecanismos físicos que afectan la forma y ancho de las líneas de absorción/emisión, siendo fundamental para el modelado preciso de la radiación gaseosa comprenderlos.

Ensanchamiento Doppler

El movimiento térmico aleatorio de las moléculas produce desplazamientos en las frecuencias observadas debido al efecto Doppler. El ancho de línea Doppler está dado por:

$$\Delta\nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{m}} \quad (3.33)$$

donde:

- ν_0 : frecuencia central de la transición
- m : masa molecular
- T : temperatura del gas

Este ensanchamiento genera un perfil Gaussiano y domina a bajas presiones y altas temperaturas [32].

Ensanchamiento por Colisiones (Lorentz)

Las colisiones intermoleculares interrumpen las transiciones antes de su finalización natural, resultando en un ensanchamiento de presión [33]. El ancho de línea por colisiones es:

$$\Delta\nu_L = \gamma_0 \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^n \quad (3.34)$$

donde:

- γ_0 : coeficiente de ensanchamiento de referencia
- p : presión del gas
- n : exponente de dependencia con temperatura (típicamente 0,5 – 0,8)

Este mecanismo produce un perfil Lorentziano y domina a altas presiones [11].

Perfil Voigt

En condiciones reales, ambos mecanismos descritos anteriormente actúan simultáneamente, resultando en un perfil Voigt que es la convolución de los perfiles Gaussiano (Doppler) y Lorentziano (Colisiones):

$$\phi_v(\nu) = \int_{-\text{inf}}^{\text{inf}} \phi_G(\nu') \phi_L(\nu - \nu') d\nu' \quad (3.35)$$

Este perfil Voigt es el utilizado en modelos espectrales de alta resolución para representar fielmente la forma de las líneas moleculares [32, 34].

3.4. Bases de datos espectroscópicas

3.4.1. HITRAN

HITRAN (High-resolution Transmission Molecular Absorption) fue desarrollada inicialmente por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos en la década de 1970 para aplicaciones de propagación atmosférica y teledetección. Desde entonces, ha evolucionado hasta convertirse en un estándar internacional para datos espectroscópicos moleculares, siendo mantenida actualmente por el Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica.

La base de datos ha experimentado múltiples actualizaciones, con versiones significativas en 1986, 1996, 2000, 2004, 2008, 2012, 2016 y 2020, cada una incorporando nuevas mediciones experimentales y cálculos teóricos más precisos.

HITRAN proporciona parámetros espectroscópicos de alta resolución, tiene una cobertura espectral que va desde los 0 a los 50.000 cm^{-1} , con más de 50 moléculas atmosféricas, con múltiples isótopos para cada especie. Cubre principalmente las regiones del infrarrojo y el visible, permitiendo correcciones para distintas temperaturas.

Algunos límites de la base de datos son:

- Rango de Temperatura limitado: Optimizada para 296 K, con correcciones válidas hasta los 1.000 K.
- Líneas calientes ausentes: No incluye transiciones desde estados vibracionales excitados.

Para el uso de la data, se utiliza la interfaz de programación de aplicaciones HITRAN (HAPI) [35], un conjunto de rutinas en Python que tiene como objetivo proporcionar acceso remoto a la funcionalidad y los datos proporcionados por HITRANOnline.

Un ejemplo de datos obtenidos a través de las librerías se puede observar en la Figura 3.1.

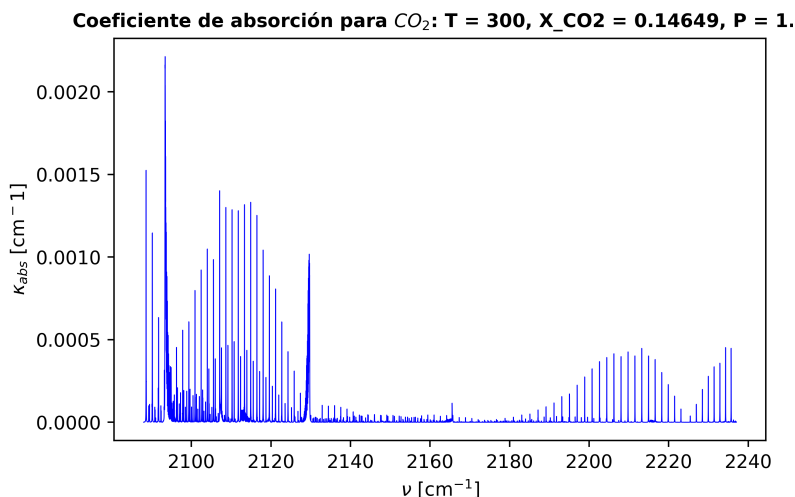


Figura 3.1: Ejemplo de datos obtenidos a través de la librería HAPI.

3.4.2. HITEMP

HITEMP (High-Temperature Spectroscopic Absorption Parameters) fue desarrollada específicamente para superar las limitaciones de HITRAN en aplicaciones de alta temperatura [32]. La primera versión fue publicada en 1995, con actualizaciones mayores en 2010 y 2019.

HITEMP extiende HITRAN de las siguientes maneras:

- Inclusión de líneas calientes: Incluye transiciones desde estados vibracionales excitados, críticas para temperaturas superiores a los 1.000 K. Por ejemplo, H_2O HITEMP contiene alrededor de 120 millones de líneas, mientras que en HITRAN tiene alrededor de 290.000 líneas.
- Rango de temperaturas extendido.

Es importante destacar que HITEMP usa un formato similar a HITRAN para mantener la compatibilidad con el software.

3.4.3. Método Line-by-Line (LBL)

El método Line-by-Line (LBL) es un enfoque de alta resolución espectral para el cálculo de propiedades radiativas de gases. A diferencia de modelos simplificados, el método LBL considera explícitamente cada línea de transición molecular registrada en las bases de datos espectroscópicas, proporcionando el máximo nivel de precisión en la caracterización del comportamiento radiativo de los gases de combustión [11].

Fundamento teórico:

El método LBL se basa en la suma directa de las contribuciones espectrales de todas las líneas individuales. Para una especie gaseosa s , el coeficiente de absorción se expresa como:

$$\kappa_{abs}(\nu; T, p) = n_s \sum_{\ell \in \mathcal{L}_s} S_\ell(T) g_\ell(\nu - \nu_{0,\ell}; T, p) \quad (3.36)$$

donde n_s es la densidad numérica de la especie, \mathcal{L}_s representa el conjunto de todas las líneas espectrales para esa especie, $S_\ell(T)$ es la intensidad de la línea ℓ a temperatura T , $\nu_{0,\ell}$ es el número de onda central de la línea, y g_ℓ es la función normalizada de forma de línea que describe el perfil espectral de la transición (típicamente Voigt).

La densidad numérica se relaciona con la fracción molar X_s mediante:

$$n_s = \frac{X_s p N_A}{RT} \quad (3.37)$$

donde p es la presión, N_A el número de Avogadro, R la constante universal de los gases, y T la temperatura local.

Dependencia con la temperatura:

La intensidad de línea $S_\ell(T)$ varía significativamente con la temperatura debido a la redistribución de poblaciones entre estados cuánticos. Esta dependencia se modela mediante [32]:

$$S_\ell(T) = S_\ell(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T} \right) \exp \left[-\frac{hcE''_\ell}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \frac{1 - \exp(-hc\nu_{0,\ell}/k_B T)}{1 - \exp(-hc\nu_{0,\ell}/k_B T_{\text{ref}})} \quad (3.38)$$

donde $Q(T)$ es la función de partición total (obtenida de TIPS), E''_ℓ es la energía del estado inferior de la transición, y $T_{\text{ref}} = 296$ K es la temperatura de referencia de las bases de datos HITRAN/HITEMP.

Esta dependencia explica por qué las bases de datos convencionales como HITRAN son insuficientes para combustión: a altas temperaturas, estados vibracionales excitados se pueblan significativamente, generando “líneas calientes” (hot lines) que no están incluidas en HITRAN pero sí en HITEMP.

Ventajas del método LBL:

- **Precisión máxima:** Captura fielmente toda la estructura espectral sin aproximaciones de banda.
- **Selectividad espectral:** Permite separar contribuciones de diferentes especies en análisis multiespectral.
- **Referencia absoluta:** Sirve como estándar de validación para modelos simplificados (k-distribution, SNB, banda ancha).
- **Flexibilidad:** Aplicable a cualquier combinación de especies, temperatura y presión dentro del dominio de las bases de datos.

Desafíos computacionales:

- **Volumen de datos:** HITEMP puede contener más de 10^8 líneas para una sola especie en el infrarrojo, resultando en cálculos extremadamente costosos.
- **Resolución espectral:** Requiere mallas espectrales finas ($\Delta\nu \sim 0,001 - 0,01$ cm⁻¹) para resolver líneas individuales.
- **Dependencia multidimensional:** Los coeficientes deben evaluarse para cada combinación de (T, X_s, p) en el dominio espacial.

Para problemas multidimensionales como la caracterización de llamas, el costo computacional del cálculo LBL directo es prácticamente prohibitivo. Por ello, se han desarrollado estrategias de optimización que incluyen:

1. **Tabulación previa:** Pre-cálculo de $\kappa_{abs}(\nu; T, X_s, p)$ en una malla multidimensional, con interpolación durante la solución de la RTE [36].
2. **Reducción espectral:** Técnicas de k-distribution agrupan rangos espectrales con propiedades radiativas similares, reduciendo las evaluaciones necesarias sin pérdida significativa de precisión [11].

3. **Cálculo selectivo:** Para aplicaciones de diagnóstico con filtros de banda específicos, solo se calculan los rangos espectrales relevantes.

Relevancia para diagnóstico multiespectral:

En el contexto de cámaras infrarrojas multiespectrales, el método LBL es fundamental para:

- **Síntesis de señales:** Predecir la radiancia que detectaría la cámara en cada banda espectral, integrando sobre el rango de cada filtro.
- **Separación de especies:** Identificar qué especies contribuyen en cada banda, aprovechando que las bandas de absorción de CO_2 ($4,3 \mu\text{m}$), H_2O ($2,7 \mu\text{m}$), y CO ($4,7 \mu\text{m}$) tienen solapamiento parcial.
- **Discriminación gas-hollín:** Distinguir entre emisión molecular (bandas discretas) y continuo de hollín (espectro suave), esencial para la cuantificación precisa de ambos contribuyentes.
- **Validación de simulaciones:** Comparar predicciones numéricas con mediciones experimentales requiere modelar exactamente la respuesta espectral del instrumento, imposible sin métodos espectralmente resueltos.

De acuerdo con Liu et al. [37], el uso de métodos LBL mejora significativamente la precisión en la recuperación de temperaturas y fracciones volumétricas de hollín en llamas axisimétricas, comparado con aproximaciones de banda ancha que pueden introducir errores superiores al 15 %.

El método LBL, alimentado por las bases de datos HITRAN/HITEMP descritas en las secciones anteriores, constituye la base teórica del modelo directo de transferencia radiativa desarrollado en este trabajo. Los detalles de implementación computacional, estrategias de optimización y validación se presentan en la Apartado 4.

3.5. Diagnóstico de llamas con imágenes infrarrojas

3.5.1. Fundamentos de la Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica de medición no intrusiva que permite determinar la distribución espacial de temperatura y radiancia en superficies y medios participativos. A diferencia de métodos intrusivos, esta no perturba el campo de flujo ni las temperaturas locales, permite una resolución de campos completos en lugar de puntos discretos, puede seguir fenómenos transitorios y permite discriminar la contribución de diferentes especies radiativas.

La termografía convencional opera en una única banda ancha (típicamente $3 - 5 \mu m$ o $8 - 12 \mu m$), integrando toda la radiación en ese rango. Sin embargo, en llamas y gases de combustión, esta aproximación presenta limitaciones significativas, como la pérdida de información química pues no se distingue entre especies radiativas.

La termografía multiespectral supera estas limitaciones al registrar radiación en múltiples bandas espectrales discretas. Esto permite aprovechar las bandas características de distintas especies para identificarlas mejor.

3.5.2. Las cámaras infrarrojas Telops

De acuerdo con Telops Inc. [1], las cámaras infrarrojas Telops son “sensores de imágenes refrigerados de última generación que proporcionan imágenes de alta resolución y alta velocidad de cuadros de la radiación infrarroja (IR) emitida y reflejada por los objetivos bajo medición”. Son herramientas avanzadas y muy precisas [2], diseñadas para aplicaciones exigentes en diversas áreas como la investigación científica, la vigilancia ambiental y la industria.

3.5.3. Características de las Cámaras Infrarrojas Telops

1. Alta Resolución y Sensibilidad: Las cámaras Telops ofrecen una alta resolución espacial y sensibilidad térmica, lo que permite la detección de partículas muy pequeñas y de bajas concentraciones [3].
2. Espectroscopía de Imágenes Hiperespectrales: Las cámaras Telops están equipadas con capacidades hiperespectrales, permitiendo la obtención de datos en múltiples longitudes de onda, cubriendo todo el rango espectral del infrarrojo medio [3].
3. Operación en Tiempo Real: Las cámaras Telops pueden proporcionar imágenes y datos en tiempo real [3], facilitando el monitoreo continuo y la respuesta rápida a cambios en las partículas. Lo anterior las vuelve ideales para aplicaciones industriales donde es crucial detectar y mitigar rápidamente las emisiones.
4. Portabilidad y Versatilidad: Las cámaras pueden ser instaladas en vehículos para estudios móviles [2], utilizadas en laboratorios [28], o montadas en instalaciones fijas [38]. Esto da flexibilidad para realizar estudios en diferentes entornos y condiciones.

3.5.4. Modelos de cámaras

Telops ofrece una variedad de cámaras infrarrojas especializadas para diversas aplicaciones científicas [39] e industriales [2]. Algunos de los modelos de cámaras que Telops ofrece incluyen:

- Series FAST y SPARK: Las series de cámaras FAST y SPARK (Ver Figura 3.2), de acuerdo con Telops Inc. [1], se destacan por su robusta carcasa sellada IP67 y tener un diseño resistente. Cada modelo se distingue por sus características específicas como rangos espectrales, resoluciones y velocidades máximas de fotogramas. Todas las cámaras FAST incluyen una rueda de filtro motorizada de cuatro posiciones con filtros intercambiables. Cada posición puede alojar hasta dos filtros de 1 mm de espesor, con un diámetro estándar de 25,4 mm.



Figura 3.2: Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo FAST. Tomado de [1].

- Series HYPER-CAM: Las cámaras hiperespectrales (Ver Figura 3.3) son sensores con un sistema de imágenes basado en interferómetro que permite el análisis espacial y espectral de objetivos utilizando un solo sensor. Se basa en la tecnología de transformada de Fourier que produce una alta resolución espectral y permite una calibración radiométrica de alta precisión [2]. Proporcionan una resolución espacial de hasta 320x256 píxeles con resoluciones espectrales de hasta $0,25 \text{ cm}^{-1}$, pudiendo operar en el rango espectral infrarrojo de onda larga (LWIR) de $8 - 12 \mu\text{m}$ [40]. Se puede destacar que las Hyper-Cam se han utilizado en varias campañas de campo terrestres [2], integrándose más recientemente en aviones para proporcionar medición en el aire [40].



Figura 3.3: Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo HIPER-CAM. Tomado de [2].

- Series MS: La cámara infrarroja MS-IR (ver Figura 3.4) permite dividir una escena en ocho bandas espectrales en lugar de una sola imagen de banda ancha, lo que permite el análisis de firmas multiespectrales a una alta velocidad de fotogramas [3]. La velocidad de rotación es ajustable hasta 100 Hz por filtro, lo que permite una velocidad de fotogramas de hasta 800 fps en modo sincronizado [1]. Se debe destacar que, debido a sus capacidades de resolución temporal e información espectral, las series MS de Telops son particularmente apropiadas para seguir procesos de combustión [38].



Figura 3.4: Cámara infrarroja Telops multiespectral tipo MS-IR. Tomado de [1].

3.5.5. Aplicaciones y casos de éxito del uso de cámaras infrarrojas Telops en combustión

Las cámaras de alta gama que Telops ofrece pueden ser particularmente útiles en la cuantificación de las emisiones, gracias a sus capacidades avanzadas de detección y análisis [38]. Al ser herramientas de alta sensibilidad y resolución, poseen precisión en la cuantificación del hollín y capacidad para distinguir entre diferentes fuentes de emisión [41]. Del mismo modo, permiten una caracterización detallada de las llamas, diferenciando entre varios tipos de partículas y compuestos químicos [39].

Por ejemplo, Huot et al. [3] realizaron un análisis a la combustión de una vela (ver Figura 3.5) utilizando una cámara Telops MS-IR MW, obteniendo imágenes multiespectrales de los productos de combustión de la vela en la que se había quemado pólvora negra para crear una explosión (dióxido de carbono y agua). Con esto, pudieron estimar la temperatura de la columna de la vela modelando el perfil espectral derivado de la información obtenida con los diferentes filtros espectrales que ofrecía la cámara.

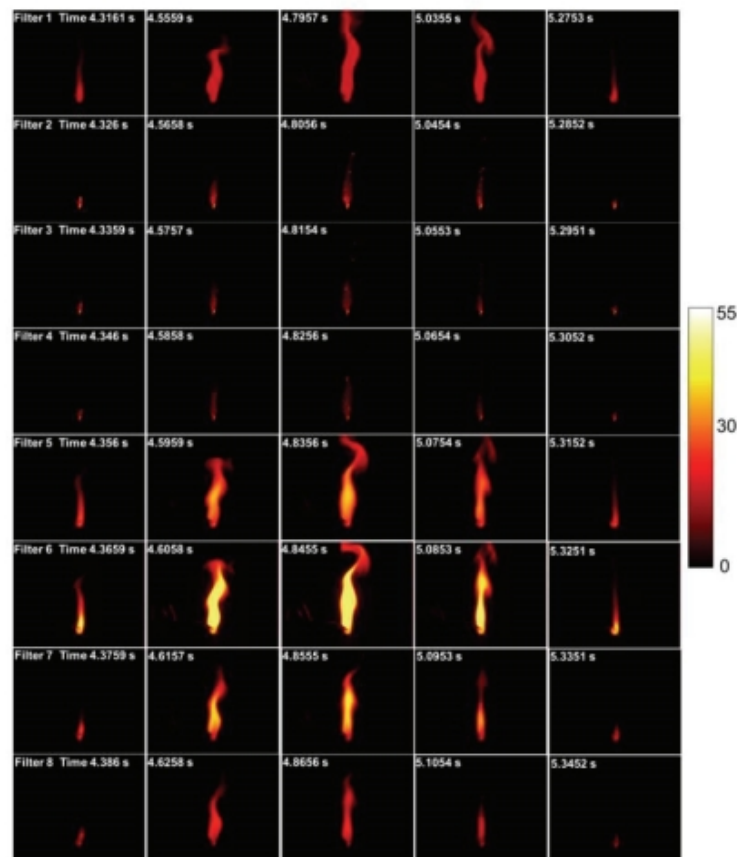


Figura 3.5: Imágenes multispectrales resueltas en el tiempo de una explosión generada por la pólvora negra quemada en una vela. Tomado de [3].

Los resultados luego fueron comparados con las temperaturas obtenidas utilizando imágenes de banda ancha convencionales, finalmente ilustrando los beneficios de las imágenes multispectrales para la caracterización de procesos de combustión y como son una poderosa herramienta para obtener información sobre la temperatura de la vela y los componentes producidos durante la combustión, lo que puede ser muy útil para diversas aplicaciones, como sería el estudio de la producción de hollín.

Por otra parte, Meléndez and Guarnizo [28] estudiaron el uso de imágenes multispectrales a través de un equipo Telops FIRST-MW para determinar la temperatura y el tamaño de la columna de CO_2 en llamas. Sus resultados, en comparación con otros resultados basados en espectros de emisión obtenidos con espectroscopia de emisión, mostraron errores relativos bajos, lo que demuestra la efectividad del método, que además se consideró más barato y sencillo para aplicaciones industriales.

Cómo último ejemplo, se tiene el trabajo realizado por Lagueux et al. [2], quienes presentan los resultados del uso de la Hyper-Cam en dos plataformas aéreas compactas: un avión de ala fija y un helicóptero utilizando un dispositivo montado en el vientre.



Figura 3.6: Imagen del helicóptero y el soporte que llevan a la cámara, referido como gimbal. Tomado de [2].

Con ayuda de la cámara y el gimbal (ver Figura 3.6), estudiaron dos áreas, un sitio industrial en el que se buscó detectar una serie de columnas de dióxido de azufre y un área que contenía una serie de platos con polvos químicos benignos y columnas de gas (ver Figura 3.7), con el fin de identificarlos.

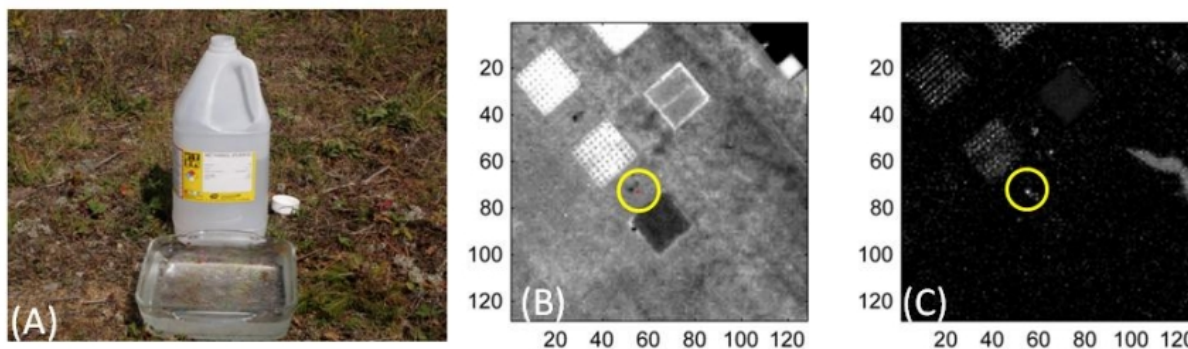


Figura 3.7: Imagen de uno de los químicos a identificar y su detección a una altura de 300 m. Tomado de [2].

Con el uso de la cámara HYPER-CAM obtuvieron resultados exitosos, detectando e identificando los objetivos a gran altitud.

En conclusión a lo anterior, la integración de estas tecnologías en estudios de combustión proporciona una metodología efectiva para comprender mejor los procesos de formación y

dispersión de las partículas. En el caso del hollín, el uso de cámaras Telops para la medición de su producción en una llama ofrece una herramienta avanzada y precisa que permitiría capturar imágenes infrarrojas de alta resolución y velocidad, contribuyendo así al desarrollo de estrategias más eficientes y sostenibles para el control de emisiones y la optimización de procesos industriales.

3.5.6. La cámara Telops MS-M1K

En esta investigación se emplea la cámara Telops MS-M1K, un sensor multiespectral del infrarrojo medio (MWIR, 1,5 – 5,5 μm) equipado con un sistema de filtros rotativos que permite la adquisición secuencial de imágenes en ocho bandas espectrales.

Especificaciones técnicas:

Tabla 3.1: Especificaciones de la cámara Telops MS-M1K.

Parámetro	Valor
Detector	InSb FPA
Resolución espacial	640×512 píxeles
Rango espectral	1,5 – 5,0 μm (MWIR)
Resolución radiométrica	16 bits
Frecuencia de adquisición	Hasta 100 Hz por filtro
Modo multiespectral	Captura secuencial por filtro
Sistema de filtros	Rueda motorizada, 8 posiciones
Óptica	Lente intercambiable (p.ej. 50 mm f/2,5)
NETD	<20 mK @ 30°C (típico)

Configuración de filtros:

La cámara utilizada está equipada con los siguientes filtros espectrales:

Tabla 3.2: Filtros espectrales de la cámara MS-M1K.

Filtro	Rango [μm]	Rango [cm^{-1}]	Especie dominante
F1 (Broadband)	1,46 – 5,41	1.850 – 6.850	Todas
F2 (OD-1.0)	1,46 – 5,41	1.850 – 6.850	Atenuado x10
F3 (OD-2.0)	1,46 – 5,41	1.850 – 6.850	Atenuado x100
F4 (OD-3.0)	1,46 – 5,41	1.850 – 6.850	Atenuado x1000
F5 (BP-4650-300)	4,47 – 4,79	2.088 – 2.237	CO, NO ₂
F6 (BP-4325-300)	4,23 – 4,37	2.288 – 2.364	CO ₂
F7 (BBP-3575-4125)	3,59 – 4,12	2.427 – 2.786	Hollín continuo
F8 (BBP-2900-3500)	2,89 – 3,47	2.882 – 3.460	H ₂ O, hidrocarburos

Los filtros F1-F4 son de densidad óptica (OD) variable, permitiendo medir llamas con amplio rango dinámico de temperaturas sin saturación. En cambio, los filtros F5-F8 están diseñados para aislar contribuciones espectrales específicas de gases y hollín, siendo estos últimos los utilizados para el análisis multiespectral en este trabajo.

Calibración radiométrica:

La cámara fue calibrada radiométricamente usando cuerpos negros de referencia, el procedimiento estándar de Telops se describe en [4], e implementa un método de calibración radiométrica que se basa en flujos de cuentas (counts/ μ s).

El proceso comienza con la adquisición de una curva nominal de flujo $F(T)$ utilizando un cuerpo negro de alta precisión a múltiples temperaturas conocidas. Para cada temperatura, se realizan mediciones a diferentes tiempos de exposición, permitiendo calcular el flujo de fotones como la pendiente de la respuesta ($\Delta C/\Delta t_{exp}$). Los datos experimentales se ajustan a una función matemática que describe la relación entre el flujo detectado y la temperatura del cuerpo negro.

La no-uniformidad inherente entre píxeles del detector se corrige mediante coeficientes individuales de ganancia (α) y offset (β) para cada píxel. Estos coeficientes se determinan ajustando la respuesta individual de cada píxel a la curva nominal $F(T)$ mediante la relación $F_i^p = \alpha^p \cdot F_i + \beta^p$.

Otro aspecto del método es la corrección del flujo oscuro (dark flux) y del offset de instrumento (C_{off}). El flujo oscuro representa la señal generada por la emisión térmica de los componentes ópticos de la cámara y la corriente oscura del detector, y varía con la temperatura del instrumento. Esta corrección se realiza mediante mediciones periódicas con un cuerpo negro de referencia a temperatura ambiente. La diferencia entre el flujo medido y el esperado según la curva nominal permite determinar el cambio en el flujo oscuro (ΔF_{off}), que se aplica como corrección a los coeficientes β .

La secuencia completa de calibración convierte los datos RAW (cuentas digitales o DL) primero a flujos corregidos, luego aplica las correcciones de no-uniformidad pixel-wise, y finalmente utiliza una tabla de consulta (lookup table) basada en la curva $F(T)$ para convertir los flujos a temperatura radiométrica (RT). Esta temperatura representa la que tendría un cuerpo negro ideal (emisividad = 1) para producir el mismo flujo de fotones detectado. Un resumen de este proceso se observa en la Figura 4.4. A partir de RT, se pueden calcular la radiancia en banda (IBR) multiplicando la ley de Planck por la respuesta espectral del sistema, y la irradiancia en banda (IBI) multiplicando IBR por el ángulo sólido subtendido por el arreglo del plano focal.

El método fue validado por Telops con la cámara FAST-IR MW en el rango de 3-5 μ m, demostrando errores radiométricos menores a 0.4 °C para temperaturas entre 10 °C y 100 °C a través de múltiples tiempos de exposición.

3.6. Llamas de estudio

Este trabajo aborda dos configuraciones experimentales para la validación de la metodología de diagnóstico multiespectral desarrollada: llamas de difusión laminares axisimétricas tipo Yale con alto contenido de hollín y la combustión de polímeros (PMMA). Ambas configuraciones presentan características distintas en términos de estructura de llama, producción de hollín y desafíos de caracterización radiativa, permitiendo evaluar la robustez y versatilidad del enfoque propuesto.

3.6.1. Llamas de difusión laminares axisimétricas tipo Yale

Las llamas de difusión laminares en configuración coflow, desarrolladas originalmente en la Universidad de Yale [5], constituyen uno de los sistemas de referencia más ampliamente utilizados para la validación de modelos de combustión y formación de hollín. Estas llamas se caracterizan por su estabilidad, repetibilidad y geometría simplificada, lo que facilita tanto las mediciones experimentales como la modelación numérica detallada.

Configuración geométrica

Un quemador tipo Yale consiste en dos tubos coaxiales: un tubo central que inyecta la mezcla combustible (típicamente etileno diluido con nitrógeno) y un tubo exterior que proporciona el oxidante (aire) en configuración coflow. Las dimensiones típicas son:

- Diámetro del tubo de combustible: 3,9 mm.
- Diámetro del tubo de aire: 38,1 mm.
- Longitud visible de la llama: 5 – 20 cm (dependiendo de las condiciones).

La simetría axial de estas llamas reduce el problema tridimensional a un dominio bidimensional (r, z) en coordenadas cilíndricas, simplificando significativamente tanto el modelado numérico como el análisis de datos experimentales.

Series de llamas Yale

Existen múltiples series de llamas Yale documentadas en la literatura, cada una diseñada para estudiar aspectos específicos de la combustión. Las series más relevantes incluyen:

- **Serie de dilución:** Variación de la fracción volumétrica de etileno en la mezcla combustible (típicamente 32 %, 60 %, 80 % C_2H_4 en N_2), manteniendo constante el flujo de aire [5]. Esta serie permite estudiar el efecto de la riqueza local sobre la formación de hollín y la estructura de la llama.
- **Serie de altura:** Variación del flujo másico de combustible a composición constante, resultando en llamas de diferentes alturas y tiempos de residencia.

En este trabajo se utilizan dos llamas de la serie de dilución: Yale 60 y Yale 80 (ambas de alta producción de hollín). Esta selección permite evaluar el desempeño de la metodología en regímenes donde la contribución radiativa del hollín es dominante.

Ventajas para validación de modelos radiativos

Las llamas Yale ofrecen múltiples ventajas para la validación de modelos de transferencia radiativa:

- **Extensa caracterización experimental:** Existen mediciones publicadas de temperatura [5], fracciones molares de especies principales, distribuciones de PAHs, y perfiles de f_v mediante técnicas como LII (Laser-Induced Incandescence) y extinción láser.
- **Validación de códigos CFD:** Estas llamas son casos de prueba estándar para códigos de combustión (CoFlame, OpenFOAM, Fluent), con benchmarks documentados en workshops internacionales como ISF (International Sooting Flame).
- **Geometría simple:** La simetría axial elimina efectos tridimensionales complejos, permitiendo aislar los fenómenos radiativos de interés.
- **Estabilidad:** Las llamas son estacionarias y repetibles, facilitando adquisiciones largas para mejorar relación señal/ruido en mediciones ópticas.
- **Rango de condiciones:** La serie de dilución cubre desde llamas que no producen demasiado hollín hasta altamente productoras, permitiendo evaluar modelos en regímenes donde la radiación está dominada por gases o por hollín.

3.6.2. Combustión de polímeros: PMMA

El poli(metacrilato de metilo), comúnmente conocido como PMMA o acrílico, es un polímero termoplástico ampliamente utilizado como material de referencia en estudios de combustión y comportamiento al fuego de materiales sólidos [42]. Su uso como caso de estudio en esta tesis permite analizar como se podría extender la metodología desarrollada a configuraciones más complejas que las llamas gaseosas laminares, incorporando fenómenos de pirólisis, propagación de llama sobre superficies, y radiación desde llamas con turbulencias.

Propiedades térmicas del PMMA: El PMMA presenta propiedades térmicas bien caracterizadas que lo hacen ideal para estudios fundamentales de combustión de sólidos:



Tabla 3.3: Propiedades térmicas y de combustión del PMMA.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1.180 – 1.190	kg/m ³
Calor específico	1,42 – 1,47	kJ/(kg·K)
Conductividad térmica	0,19 – 0,21	W/(m·K)
Temperatura de descomposición	360 – 380	°C
Calor de vaporización	1.600 – 1.700	kJ/kg
Calor de combustión	24 – 26	MJ/kg
Temperatura de ignición	305 – 320	°C
Temperatura de autoignición	430 – 460	°C

Temperatura de ignición y comportamiento pirolítico: El PMMA se descompone térmicamente mediante un proceso de despolimerización por ruptura de enlaces C-C en la cadena principal, produciendo predominantemente monómero de metilmetacrilato (MMA) [43]. Este proceso de pirólisis ocurre en varias etapas:

1. **Calentamiento superficial:** La superficie del polímero se calienta por conducción y radiación externa hasta alcanzar la temperatura de descomposición ($T \sim 300$ °C).
2. **Pirólisis:** La despolimerización genera vapores de MMA que difunden hacia la superficie. La cinética de descomposición sigue aproximadamente una ley de Arrhenius.
3. **Mezcla con oxidante:** Los vapores pirolíticos se mezclan con aire en una capa límite turbulenta sobre la superficie.
4. **Ignición:** Cuando la mezcla combustible/aire alcanza condiciones apropiadas y la temperatura es suficientemente alta, ocurre la ignición.
5. **Propagación de llama:** Una vez establecida, la llama se propaga sobre la superficie del material, sostenida por el flujo continuo de vapores pirolíticos.

A diferencia de las llamas Yale, donde la tasa de inyección de combustible es constante y controlada, en PMMA la tasa de pirólisis depende del balance térmico local, incluyendo el feedback radiativo desde la llama hacia la superficie [44]. Este acoplamiento pirólisis-combustión-radiación hace que el problema sea inherentemente más complejo.

Relevancia como material de referencia en estudios de combustión: El PMMA ha sido extensamente utilizado en estudios fundamentales de combustión de sólidos por varias razones:

- **Comportamiento "limpio":** A diferencia de muchos polímeros, el PMMA se descompone casi completamente sin generar residuos carbonosos (char), simplificando el análisis.

- **Reproducibilidad:** Las propiedades del PMMA comercial (e.g., Plexiglass, Lucite) son consistentes entre lotes, facilitando la comparación entre estudios.
- **Amplia caracterización:** Existen numerosos datos experimentales de propiedades térmicas, cinéticas de descomposición, y comportamiento en diferentes configuraciones (vertical, horizontal, cone calorimeter) [42].
- **Casos de referencia:** El PMMA es material de prueba en estándares internacionales de comportamiento al fuego (ISO 5660, ASTM E1354) y en benchmarks de modelado como FORUM (Fires with Operational Uncertainties: Resolution, Uncertainty, Modeling).
- **Transición a aplicaciones reales:** Aunque idealizado, el PMMA representa razonablemente el comportamiento de una clase amplia de polímeros termoplásticos, haciendo que los resultados sean relevantes para aplicaciones prácticas.

Propiedades radiativas del PMMA y sus productos: Desde el punto de vista radiativo, la combustión de PMMA presenta características distintivas:

1. **Emisividad superficial:** El PMMA sólido tiene emisividad en el infrarrojo de $\varepsilon \sim 0,85 - 0,95$, dependiendo del acabado superficial y la temperatura [44]. Esta alta emisividad facilita la medición de temperaturas superficiales mediante termografía infrarroja.
2. **Semitransparencia:** El PMMA es parcialmente transparente en el visible y cercano infrarrojo, permitiendo que la radiación penetre algunos milímetros bajo la superficie. Este efecto de calentamiento en profundidad afecta la tasa de pirólisis inicial pero se vuelve despreciable una vez establecida la llama debido al ennegrecimiento superficial.
3. **Productos de combustión:** La combustión de MMA ($C_5H_8O_2$) en condiciones ricas produce CO_2 , H_2O , CO , y cantidades moderadas de hollín. La composición depende fuertemente de la ventilación local.
4. **Estructura de llama turbulenta:** A diferencia de las llamas Yale laminares, las llamas sobre PMMA son típicamente turbulentas (números de Reynolds altos), con fluctuaciones espaciotemporales en temperatura y concentración de especies. Estas fluctuaciones introducen intermitencia en la señal radiativa, requiriendo promedios temporales para caracterización.
5. **Hollín en PMMA:** Estudios previos [45] reportan fracciones volumétricas de hollín en llamas de PMMA en el rango $f_v \sim 0,5 - 3$ ppm, comparables a las llamas Yale de dilución intermedia. Sin embargo, la distribución espacial es menos uniforme debido a la turbulencia y las variaciones locales de ventilación.

Geometrías y configuraciones experimentales: El PMMA puede estudiarse en diversas configuraciones geométricas:

- **Placa vertical:** Configuración donde el flujo de aire es ascendente por convección natural. Favorece la propagación vertical de la llama (opposed flow).
- **Placa horizontal:** El aire se aproxima lateralmente, generando llamas más compactas. Esta configuración es común en cone calorimeters.
- **Cilindros/varillas:** Geometría utilizada para estudios de propagación de llama con condiciones de contorno más controladas. La simetría cilíndrica simplifica parcialmente el análisis [45].

Estudio del heater length

La longitud de precalentamiento (*heater length*, L_h) es la distancia entre el borde inferior de la llama visible y el extremo del cono de fusión.

$$L_h = z_{\text{base llama}} - z_{\text{cono}} \quad (3.39)$$

Esta magnitud es relevante porque:

- Caracteriza la extensión de la zona de transferencia de calor llama a sólido.
- Se relaciona con la tasa de pirólisis (mayor L_h = mayor precalentamiento = mayor generación de volátiles).
- Depende del balance entre radiación incidente y conductividad del PMMA.

En este trabajo se emplea una configuración de varillas de PMMA, buscando extraer el heater length con diferentes mezclas de coflow. **Conexión con los objetivos del trabajo:** El estudio de llamas de PMMA en este trabajo cumple dos propósitos:

1. **Analizar aplicabilidad:** Evaluar si la metodología desarrollada y validada en llamas Yale (laminares, bien caracterizadas, simétricas) es transferible a configuraciones más realistas y complejas.
2. **Colaboración interdisciplinaria:** Este caso de estudio se desarrolló en colaboración con un grupo de investigación especializado en combustión de sólidos, permitiendo el acceso a experticia complementaria y datos experimentales adicionales.

Los detalles de la configuración experimental específica, procesamiento de datos, y resultados para el caso PMMA se presentan en los siguientes capítulos.

3.7. Simulación numérica de llamas: el código CoFlame

CoFlame es un código numérico desarrollado específicamente para la simulación detallada de llamas de difusión laminares axisimétricas con formación de hollín [46]. Este código resuelve las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y especies en un dominio bidimensional axisimétrico, acopladas con un modelo sectional de balance poblacional para partículas de hollín y la ecuación de transferencia radiativa.

3.7.1. Características principales

- **Dominio y discretización:** Malla estructurada en coordenadas cilíndricas (r, z) , con refinamiento adaptativo en regiones de altos gradientes.
- **Química detallada:** Implementa mecanismos cinéticos detallados para hidrocarburos (típicamente cientos de especies y miles de reacciones), incluyendo la formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).
- **Modelo de hollín:** Balance poblacional sectional que considera:
 - Nucleación desde dímeros de PAHs.
 - Crecimiento superficial por HACA (Hydrogen Abstraction Carbon Addition).
 - Condensación de PAHs en la superficie.
 - Oxidación por OH y O_2 .
 - Coagulación de partículas.
 - Fragmentación inducida por oxidación.
- **Radiación:** Acopla el término fuente radiativo en la ecuación de energía mediante métodos de ordenadas discretas (DOM) y modelos espectrales (Statistical Narrow-Band, k-distribution).
- **Propiedades de transporte:** Evaluación detallada de viscosidad, conductividad térmica y coeficientes de difusión multicomponente.

3.7.2. Validación y aplicaciones

CoFlame ha sido extensamente validado contra mediciones experimentales de llamas tipo Yale [46], mostrando buena concordancia en:

- Perfiles de temperatura (dentro de ± 50 K)
- Fracciones molares de especies principales (CO_2 , H_2O , CO)
- Distribuciones de PAHs



- Fracción volumétrica de hollín (f_v).

El código es particularmente apropiado para estudios de formación de hollín debido a su tratamiento detallado de la química de PAHs y el balance poblacional de partículas. Sus salidas (campos de T , X_s , f_s) constituyen las entradas para el modelo directo de transferencia radiativa desarrollado en este trabajo.

3.7.3. Limitaciones reconocidas

- Restringido a geometrías axisimétricas (no aplicable a llamas 3D o turbulentas)
- Los mecanismos de hollín contienen incertidumbres inherentes (factor 2-3 típico)
- Alto costo computacional para mallas refinadas y química detallada

Los detalles de configuración específica, parámetros de entrada y validación para las llamas Yale 60 y Yale 80 se presentan en el Apartado 4.



4. Metodología

4.1. Marco general del trabajo

4.1.1. Enfoque de Modelo Directo

El enfoque principal de este trabajo de enmarca en la implementación de un modelo directo (forward model) para el análisis de transferencia radiativa en llamas con presencia de hollín, partiendo desde propiedades físicas conocidas o simuladas del sistema -temperatura, fracciones molares de especies gaseosas, y fracción volumétrica de hollín- para predecir las magnitudes radiativas observables, específicamente la intensidad espectral I_ν y la radiancia integrada en banda I_f que sería detectada por un sensor infrarrojo.

Los resultados se contrastarán con las observaciones experimentales obtenidas de una cámara multiespectral infrarroja, buscando comparar las predicciones numéricas con las mediciones experimentales, separar y cuantificar la radiación emitida por las especies gaseosas (CO_2 , CO y H_2O) versus las partículas de hollín en cada banda espectral y establecer una base para futuros desarrollos de técnicas de reconstrucción tomográfica de campos de temperatura mediante métodos inversos.

4.1.2. Caso de estudio: llamas Yale

Para aplicar la metodología de cálculo de intensidad directa desarrollada, se seleccionaron configuraciones experimentales altas en hollín: Llamas Yale 60 y Yale 80.

Las llamas tipo Yale son llamas de difusión laminares coflow de etileno diluido con nitrógeno, ampliamente estudiadas en la literatura debido a su geometría canónica y reproducibilidad [5]. Se seleccionaron dos condiciones de operación que difieren en el contenido de etileno en el combustible: Yale 60 y Yale 80.

El Cuadro 4.1 resume las condiciones generales de operación para ambas llamas.

Tabla 4.1: Condiciones de operación de las llamas Yale estudiadas.

Parámetro	Yale 60	Yale 80
Etileno (% vol)	60	80
Nitrógeno (% vol)	40	20
Flujo de C_2H_4 (l/min)	0,233	0,311
Flujo de N_2 (l/min)	0,093	0,047
Flujo de aire coflow (l/min)	91,3	91,3

El análisis de estas llamas constituye el foco principal de la tesis, con comparación cuantitativa entre resultados sintéticos y experimentales.

4.1.3. Flujo metodológico del modelo directo

A continuación, la Figura 4.1 muestra el procedimiento desarrollado para el cálculo de la intensidad radiada directa. El proceso se divide en cuatro etapas principales:

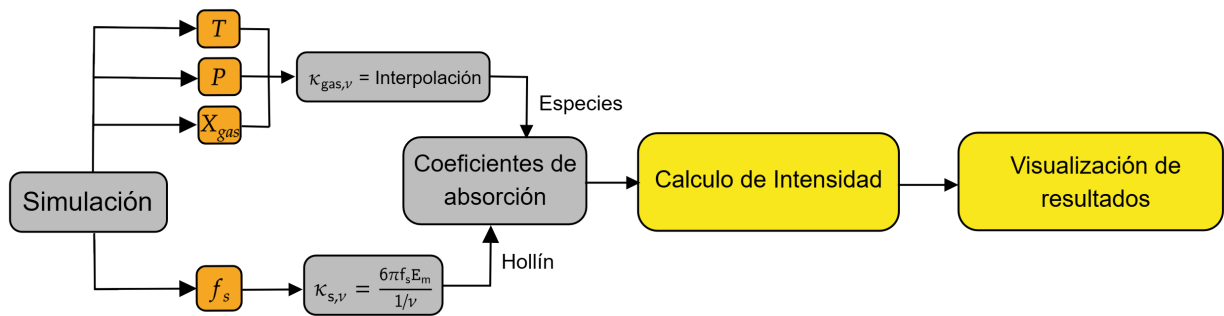


Figura 4.1: Diagrama del proceso directo de cálculo de intensidad

Etapa 1: Simulación numérica con CoFlame

Se obtienen los campos de temperatura $T(r, z)$, fracciones molares X_s de las especies gaseosas radiantes (CO_2 , H_2O y CO) y fracción volumétrica de hollín $f_v(r, z)$ mediante una simulación de llamas laminares axisimétricas tipo Yale usando el código CoFlame desarrollado por Eaves et al. [46].

Etapa 2: Cálculo de propiedades radiativas

Los campos obtenidos se utilizan para determinar los coeficientes de absorción espectrales a través de:

- Gases: Método line-by-line (LBL) usando las bases de datos HITRAN/HITEMP [34], generando tablas de lookup para obtener $\kappa_{gas,\nu}(T, P, X_s)$.
- Hollín: Modelo con régimen de Rayleigh con correlación de Chang-Charalampopoulos [47] para obtener $\kappa_{soot,\nu}(T, f_v)$.

Etapa 3: Resolución de la RTE y síntesis de imágenes

Se resuelve la ecuación de transferencia radiativa mediante integración numérica a lo largo de la línea de visión, considerando:

- Geometría 2D axisimétrica proyectada a coordenadas 3D cartesianas.
- Integración espectral sobre las bandas de los filtros de la cámara.
- Autoabsorción del medio.

El resultado son imágenes sintéticas $I_f(x, y)$ para cada filtro, que representan la radiación que detectaría la cámara Telops al observar las llamas simuladas.

Etapas 4: Validación experimental y análisis

La imágenes sintéticas se comparan cualitativamente y cuantitativamente con mediciones experimentales obtenidas con la cámara Telops MS-M1K operando en las mismas bandas espectrales. Adicionalmente, se realiza:

- Extracción de espectros LBL en puntos representativos.
- Descomposición de contribuciones por especie.
- Análisis de sensibilidad a las variables de entrada.
- Análisis del efecto del hollín.

4.1.4. Aplicación demostrativa: Pirólisis de PMMA

Como caso de aplicación complementario, se estudia la pirólisis y combustión de varillas cilíndricas de polimetilmetacrilato (PMMA) bajo diferentes condiciones de coflow. Este caso presenta características más complejas, pues existe una geometría 3D no axisimétrica, turbulencias y ausencia de un modelo numérico de referencia.

A diferencia de las llamas Yale, el análisis del PMMA es de naturaleza cualitativa y exploratoria, con los siguientes objetivos:

1. Demostrar la capacidad de la cámara Telops para capturar características espectrales en configuraciones realistas y observar características que no se podrían observar sin una cámara infrarroja.
2. Evaluar las variaciones en las etapas de combustión del PMMA bajo diferentes condiciones de aire.
3. Analizar la variación del heater length en distintas condiciones de aire.
4. Evaluar las limitaciones prácticas de la metodología.

4.2. Simulación numérica de llamas con CoFlame

CoFlame es un código de dinámica de fluidos computacional (CFD) desarrollado por Eaves et al. [46] para la simulación de llamas laminares axisimétricas con formación de hollín. El código resuelve las ecuaciones de conservación acopladas de masa, momento, energía y especies químicas en coordenadas cilíndricas (r, z) , aprovechando la simetría axial para reducir el problema tridimensional a un dominio bidimensional.

La ecuación de transferencia radiativa se resuelve mediante el método de ordenadas discretas (DOM) con cuadratura T3 [48]. En este método el espacio angular se discretiza en un conjunto finito de direcciones y la intensidad total se reconstruye como la suma ponderada sobre todas estas.

Para las propiedades radiativas de los gases, CoFlame usa el modelo de radiación Statistical Narrow-Band con correlated-k [49], el cual es diferente y menos detallado que el modelo line-by-line desarrollado en este trabajo para la síntesis de imágenes. El modelo SNB se usa únicamente para calcular el término fuente radiativo que afecta la temperatura de la llama durante la simulación CFD. Las principales diferencias entre ambos métodos se resumen en el Cuadro 4.2.

Tabla 4.2: Comparación entre el modelo de radiación SNB usado en CoFlame y el modelo LBL desarrollado.

Característica	SNB (CoFlame)	LBL (Este trabajo)
Propósito	Datos de entrada	Síntesis de imágenes
Resolución espectral	Bandas ($\sim 25 \text{ cm}^{-1}$)	Líneas ($\sim 0,01 \text{ cm}^{-1}$)
Base de datos	Correlaciones SNB	HITRAN/HITEMP
Costo computacional	Bajo ($\sim \text{min}$)	Alto ($\sim \text{horas}$)
Precisión espectral	Moderada	Muy alta
Aplicación	Durante simulación	Post-procesamiento

4.2.1. Configuración del dominio computacional

Las simulaciones se realizaron en un dominio bidimensional axisimétrico en coordenadas cilíndricas (r, z) , donde r es la coordenada radial y z la coordenada axial (altura). La extensión del dominio se extiende radialmente de 0–3,14 cm y axialmente de 0–17 cm. Estas dimensiones son suficientes para que las condiciones de frontera laterales y superior no afecten la física de la llama.

Se utilizó una malla estructurada con refinamiento adaptativo en las regiones de alto gradiente (zona de llama y eje de simetría). Para las celdas radiales se tienen 157 volúmenes de control y para las celdas axiales 402 volúmenes de control, dando un total de 63.114 celdas.

El espaciado mínimo en la zona de llama es de aproximadamente $\Delta r_{\min} \approx 0,05 \text{ mm}$ y $\Delta z_{\min} \approx 0,1 \text{ mm}$, suficiente para resolver los gradientes pronunciados de temperatura y especies.

Las condiciones de frontera son equivalentes a las del experimento realizado (Ver Cuadro 4.3).

4.2.2. Mecanismo químico y modelo de hollín

El mecanismo químico utilizado es el desarrollado por Slavinskaya et al. [50], que contiene: 94 especies químicas, incluyendo desde pequeñas moléculas (H_2 , CO , CH_4) hasta PAHs de hasta 5 anillos aromáticos (benzo[a]pireno, benzo[ghi]perileno); 723 reacciones elementales, describiendo el proceso completo desde la descomposición del combustible hasta la formación de PAHs grandes.

Para el hollín, CoFlame implementa un modelo basado en el método seccional, que divide la distribución de tamaños de partículas en 35 secciones logarítmicamente espaciadas con un factor de estiramiento de 2.

$$V_i = 2^{i-1}V_1, \quad i = 1, 2, \dots, 35$$

donde V_i es el volumen de una partícula en la sección i , y V_1 es el volumen de la partícula más pequeña (dímero de PAH).

El modelo considera los siguientes procesos físico-químicos: nucleación, crecimiento superficial, condensación de PAHs, oxidación, coagulación y fragmentación por oxidación.

También se implementa la reversibilidad de dos procesos clave:

1. Nucleación: Los dímeros de PAHs pueden disociarse a altas temperaturas.
2. Condensación reversible: Los PAHs adsorbidos pueden desorber de la superficie.

Esta característica es importante para capturar correctamente la distribución espacial del hollín, especialmente en regiones de alta temperatura donde la formación neta de hollín es baja.

4.2.3. Condiciones de operación: llamas Yale

Las condiciones de operación para las llamas Yale 60 y Yale 80 siguieron las simulaciones de Smooke et al. [5]. Los parámetros se presentan en el Cuadro 4.3.

Los campos resultantes se utilizaron como datos de entrada para los cálculos posteriores.

Tabla 4.3: Condiciones de operación para las simulaciones de las llamas [5].

Parámetro	Yale 60	Yale 80
<i>Composición de combustible</i>		
Etileno (% vol)	60	80
Nitrógeno (% vol)	40	20
<i>Flujos volumétricos (l/min a 300 K, 1 atm)</i>		
C ₂ H ₄	0,2329	0,3106
N ₂	0,0932	0,0466
Aire coflow	91,3	91,3
<i>Dimensiones del quemador</i>		
Diámetro nozzle combustible (mm)	3,9	3,9
Diámetro nozzle coflow (mm)	38,1	38,1
Material nozzle	Aluminio	
Honeycomb coflow	Cerámica, 200 cpsi	
<i>Condiciones ambientales</i>		
Temperatura (K)	300	300
Presión (Pa)	101.325	101.325
Humedad relativa (%)	40–60	40–60

4.3. Modelo directo de Transferencia radiativa

4.3.1. Supuestos fundamentales del modelo

El modelo de transferencia radiativa desarrollado se basa en los siguientes supuestos:

1. **Medio no dispersivo:** Se considera que la dispersión o scattering es despreciable.
2. **Estado estacionario:** Las llamas laminares simuladas no presentan dependencia temporal.
3. **Geometría axisimétrica:** Esto permite reducir el problema 3D a integración sobre dominios 2D.
4. **Medio isotrópico:** Las propiedades radiativas dependen solo de la posición, no de la dirección.
5. **Equilibrio termodinámico local (LTE):** La emisión de cada elemento de volumen se describe mediante la función de Planck a la temperatura local.
6. **Régimen de Rayleigh:** Se considera que las partículas de hollín cumplen con el régimen de Rayleigh. Esto es válido en el infrarrojo medio y quiere decir que el parámetro de tamaño $x = \pi d_p / \lambda \ll 1$.

4.3.2. Formulación de la ecuación de transferencia radiativa

Con los supuestos anteriores, la RTE se simplifica a un problema de emisión-absorción:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \kappa_{a,\nu}(s) [I_\nu^{bb}(T(s)) - I_\nu(s)] \quad (4.1)$$

cuya solución formal es:

$$I_\nu(L) = \int_0^L \kappa_{a,\nu}(s') I_\nu^{bb}(T(s')) \exp\left(-\int_{s'}^L \kappa_{a,\nu}(s'') ds''\right) ds' \quad (4.2)$$

donde:

- I_ν [W/(cm² sr cm⁻¹)] es la intensidad espectral por número de onda
- $\kappa_{a,\nu} = \kappa_{\text{gas},\nu} + \kappa_{\text{soot},\nu}$ [cm⁻¹] es el coeficiente de absorción total.
- $I_\nu^{bb}(T) = \frac{2hc^2\nu^3}{\exp(hc\nu/k_B T) - 1}$ es la función de Planck.
- L [cm] es la longitud del camino óptico.
- El término exponencial representa la autoabsorción entre el punto s' y el detector.

Sin embargo, para simplificar el desarrollo computacional, se resuelve la Ecuación (4.1) directamente mediante integración acumulativa inversa para cada línea de visión, considerando así la autoabsorción.

4.3.3. Geometría y discretización espacial

Paso 1. Proyección axisimétrica:

El dominio cilíndrico (r, z) de CoFlame se proyecta sobre un plano de observación cartesiano (x, y) perpendicular a la línea de visión de la cámara. Para cada píxel (x, y) en la imagen sintética, la línea de visión atraviesa el medio a lo largo de la coordenada de profundidad ξ , donde cada punto tiene coordenadas cilíndricas:

$$r(\xi; x) = \sqrt{x^2 + \xi^2}, \quad z(\xi; y) = y$$

con límite de integración $\xi_{\max}(x) = \sqrt{R_{\max}^2 - x^2}$, donde $R_{\max} = 1,7$ cm es el radio máximo del dominio simulado considerado.

La Figura 4.2 ilustra esquemáticamente esta geometría.

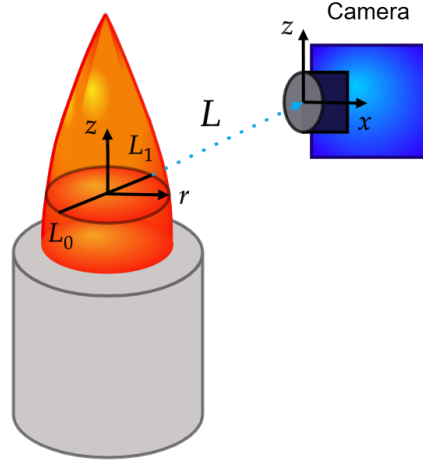


Figura 4.2: Geometría de proyección axisimétrica.

Aprovechando la simetría axial, la integral de transferencia radiativa se calcula sobre el dominio completo $\xi \in [-\xi_{\max}, \xi_{\max}]$.

Paso 2. Discretización:

El dominio de proyección se discretiza en una cuadrícula cartesiana uniforme:

- **Extensión radial:** $x \in [-R_{\max}, R_{\max}] = [-1,7, 1,7]$ cm
- **Extensión axial:** $y \in [0, L_{\max}] = [0, 17]$ cm
- **Resolución espacial:** $\Delta x = \Delta y = 0,0423$ cm ($\sim 0,42$ mm)
- **Número de píxeles:** $N_x = 80$ (radial) x $N_y = 402$ (axial)

Luego, para cada línea de visión (x_i, y_j) , la integral sobre ξ se discretiza mediante la generación de una cuadrícula simétrica de $N_\xi = 80$ puntos por línea de visión, tal que:

$$\xi_k = -\xi_{\max} + k \cdot \frac{2\xi_{\max}}{N_\xi - 1}, \quad k = 0, 1, \dots, N_\xi - 1 \quad (4.3)$$

con espaciamento $\Delta\xi_k = \xi_{k+1} - \xi_k$.

A continuación, se calculan las coordenadas cilíndricas en cada punto de integración ξ_k :

$$r_k = \sqrt{x^2 + \xi_k^2}, \quad z_k = y \quad (4.4)$$

y se recuperan las propiedades locales mediante interpolación bicúbica desde los datos obtenidos mediante CoFlame:

- Temperatura: $T(r_k, z_k)$
- Fracciones molares: $X_s(r_k, z_k)$ para $s \in \{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}\}$
- Fracción volumétrica de hollín: $f_v(r_k, z_k)$

Con estas propiedades, se obtienen los coeficientes de absorción:

- $\kappa_{\text{gas},\nu}(r_k, z_k)$ por interpolación trilineal desde las tablas LUT (Ver Cuadro 4.4).
- $\kappa_{\text{soot},\nu}(r_k, z_k)$ por evaluación directa del modelo.

El coeficiente total en cada punto es:

$$\kappa_{\nu,k} = \kappa_{\text{gas},\nu}(r_k, z_k) + \kappa_{\text{soot},\nu}(r_k, z_k) \quad (4.5)$$

Paso 3. Integración numérica con autoabsorción:

Para resolver la ecuación de transferencia radiativa con autoabsorción, se implementa un esquema de integración paso a paso desde el punto más externo de la llama ($k = N_\xi - 1$) hacia el observador ($k = 0$). Este enfoque permite capturar naturalmente los efectos de autoabsorción del medio sin necesidad de calcular explícitamente la profundidad óptica total.

En cada paso de integración, la intensidad se actualiza según la ecuación diferencial de transferencia radiativa discretizada:

$$\frac{dI_\nu}{d\xi} = \kappa_\nu(\xi) [I_\nu^{bb}(T(\xi)) - I_\nu(\xi)] \quad (4.6)$$

que representa el balance entre emisión ($\kappa_\nu I_\nu^{bb}$) y absorción ($\kappa_\nu I_\nu$).

Para integrar esta ecuación, se utiliza el método de Euler implícito, cuya discretización es:

$$\frac{I_{\nu,k} - I_{\nu,k+1}}{\Delta\xi_k} = \kappa_{\nu,k} [I_\nu^{bb}(T_k) - I_{\nu,k}] \quad (4.7)$$

Reordenando para resolver $I_{\nu,k}$:

$$I_{\nu,k} = \frac{I_{\nu,k+1} + \kappa_{\nu,k} I_\nu^{bb}(T_k) \Delta\xi_k}{1 + \kappa_{\nu,k} \Delta\xi_k} \quad (4.8)$$

donde:

- $I_{\nu,k}$ es la intensidad en el punto k (más cerca del observador)
- $I_{\nu,k+1}$ es la intensidad en el punto $k + 1$ (más lejos del observador)

- $\kappa_{\nu,k}$ es el coeficiente de absorción total en el punto k
- $I_{\nu}^{bb}(T_k)$ es la radiación de cuerpo negro a temperatura local T_k
- $\Delta\xi_k$ es el espaciamiento entre puntos consecutivos

El algoritmo de integración se resume como:

1. Inicializar con condición de borde en el punto más externo: $I_{\nu,N_{\xi}-1} = 0$ (no hay radiación entrante).
2. Para $k = N_{\xi} - 2, N_{\xi} - 3, \dots, 1$: aplicar Ecuación (4.8).
3. La intensidad observada corresponde a: $I_{\nu}(x, y) = I_{\nu,0}$ (punto más cercano al observador).

Paso 4. Manejo de regiones fuera del dominio:

Para coordenadas (r_k, z_k) que caen fuera del dominio simulado de CoFlame, se asume medio ambiente transparente:

- $T = T_{\infty} = 300$ K
- $X_s = 0$ para todas las especies
- $f_{\nu} = 0$
- Por lo tanto: $\kappa_{\nu} = 0$

Esta condición ocurre típicamente en las esquinas del dominio, donde $r > R_{\max}$ o $z > L_{\max}$.

4.3.4. Cálculo de propiedades radiativas

El coeficiente de absorción espectral de cada especie gaseosa se calcula como [35]:

$$\kappa_{s,\nu}(T, p, X_s) = n_s \sum_{\ell \in \mathcal{L}_s} S_{\ell}(T) \cdot g_{\ell}(\nu - \nu_{0,\ell}; T, p) \quad (4.9)$$

donde $n_s = pX_s/(k_B T)$ es la densidad numérica, $S_{\ell}(T)$ es la intensidad de línea corregida por temperatura vía funciones de partición TIPS, y g_{ℓ} es el perfil de Voigt (convolución de ensanchamientos Doppler y Lorentziano).

Dado el alto costo computacional del cálculo directo ($>10^6$ horas-CPU para el dominio completo), se construyeron tablas de lookup (LUT) precalculadas usando HITEMP [32] y la librería HAPI, en base al trabajo realizado por Raman et al. [36]. El detalle de estas tablas se encuentra en el Cuadro 4.4.

Tabla 4.4: Estados termodinámicos de la base de datos LBL.

Parámetro	Rango	Ratio
Temperatura [K]	300–3.000 K	Cada 100
Presión [atm]	1	-
Fracción Molar	10^{-5} – $9 \cdot 10^{-5}$	Cada 10^{-5}
	10^{-4} – 10^{-3}	Cada 10^{-4}
	10^{-3} – $2 \cdot 10^{-3}$	Cada 10^{-4}
	$2 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-2}	Cada $5 \cdot 10^{-4}$
	$1,5 \cdot 10^{-2}$ – 10^{-1}	Cada $5 \cdot 10^{-3}$
	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $2 \cdot 10^{-1}$	Cada 10^{-2}

4.3.5. Modelo de absorción del hollín

Como se indicó en el Apartado 4.3.1, para el cálculo del coeficiente de absorción del hollín se toma como supuesto que se cumple régimen de Rayleigh, típico para hollín en IBR, donde el tamaño de las partículas de hollín es mucho menor a la longitud de onda (Ver Figura 4.3):

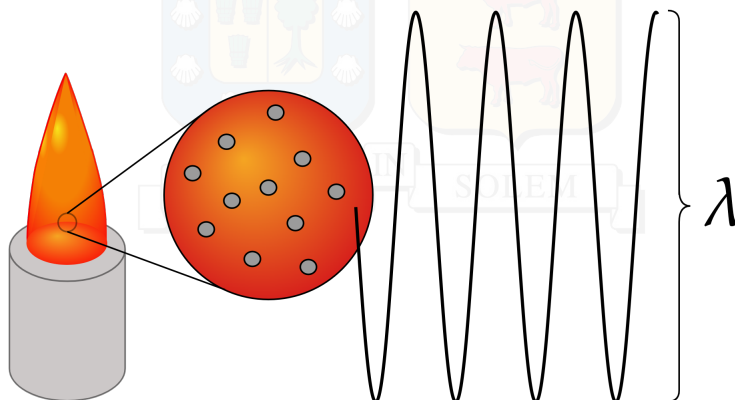


Figura 4.3: Diagrama de ejemplificación del régimen de Rayleigh

De este modo, el coeficiente de absorción del hollín se expresa como:

$$\kappa_{\text{soot},\nu} = \frac{6\pi\nu f_v}{c} E_m(\nu) \quad (4.10)$$

donde la función de absorción $E_m(\nu) = E_m(1/\lambda)$ se obtiene del modelo de Chang y Charalampopoulos [47]:

$$E_m(\lambda) = \frac{C_\lambda}{6\pi} \quad (4.11)$$

con $C_\lambda, n(\lambda)$ y $k(\lambda)$ dados por las correlaciones empíricas:

$$C_\lambda = \frac{36\pi n_s k_s}{[(n_s^2 - k_s^2 + 2)^2 + 4n_s^2 k_s^2]} \quad (4.12)$$

$$n_s(\lambda) = 1,811 + 0,1263 \ln(\lambda) + 0,0270 \ln^2(\lambda) + 0,0417 \ln^3(\lambda) \quad (4.13)$$

$$k_s(\lambda) = 0,5821 + 0,1213 \ln(\lambda) + 0,2309 \ln^2(\lambda) - 0,0100 \ln^3(\lambda) \quad (4.14)$$

Finalmente, el coeficiente de absorción total se calcula como se indicó en la Ecuación (4.5):

$$\kappa_\nu(r, z) = \kappa_{\text{gas},\nu}(T, X_{\text{CO}_2}, X_{\text{H}_2\text{O}}, X_{\text{CO}}) + \kappa_{\text{soot},\nu}(f_\nu) \quad (4.15)$$

4.3.6. Integración numérica de la RTE

Una vez discretizado el dominio espacial y calculados los coeficientes de absorción en cada punto de la línea de visión, la ecuación de transferencia radiativa se resuelve mediante el método descrito en el Paso 3 de la Apartado 4.3.3.

Para cada píxel (x, y) y cada número de onda ν , se calcula la intensidad espectral $I_\nu(x, y)$ mediante integración acumulativa desde el punto más alejado hacia el observador:

$$I_{\nu,k} = \frac{I_{\nu,k+1} + \kappa_{\nu,k} I_\nu^{bb}(T_k) \Delta\xi_k}{1 + \kappa_{\nu,k} \Delta\xi_k} \quad (4.16)$$

con condición inicial $I_{\nu, N_\xi-1} = 0$ (no hay radiación entrante desde el exterior de la llama) y resultado final $I_\nu(x, y) = I_{\nu,0}$ (intensidad en el punto más cercano al observador).

El cálculo se repite para cada combinación de píxel (x_i, y_j) y frecuencia ν_n , generando campos espectrales completos $I_\nu(x, y)$ que posteriormente se integran sobre las bandas de los filtros.

4.3.7. Integración espectral sobre bandas de filtros

La cámara Telops MS-M1K mide radiancia integrada en bandas espectrales discretas correspondientes a cada filtro a considerar. En este trabajo, la radiancia integrada en cada filtro se calcula como:

$$I_f(x, y) = \int_{\nu_{\min,f}}^{\nu_{\max,f}} I_\nu(x, y) d\nu \approx \sum_{i=1}^{N_{\nu,f}} I_{\nu_i}(x, y) \Delta\nu \quad (4.17)$$

donde $[\nu_{\min,f}, \nu_{\max,f}]$ es el rango espectral del filtro f , $N_{\nu,f}$ es el número de puntos espectrales en ese rango, y $\Delta\nu = 0,01 \text{ cm}^{-1}$ es el paso de la cuadrícula espectral de las tablas LBL. Las características espectrales de los cuatro filtros utilizados se encuentran en el Cuadro 4.5.

La intensidad espectral I_ν tiene unidades de $\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr cm}^{-1})$ cuando se expresa por número de onda. Tras la integración espectral, la radiancia I_f tiene unidades de $\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr})$,

que es directamente comparable con las mediciones de la cámara (típicamente reportadas en $W/(m^2 \text{ sr})$ o unidades digitales convertidas a radiancia mediante calibración).

4.3.8. Separación de contribuciones por especie

Para cuantificar la contribución radiativa de cada especie (CO_2 , H_2O , CO , hollín) al total medido, se calculan radiancias parciales repitiendo el procedimiento de solución de la RTE pero utilizando únicamente el coeficiente de absorción de la especie de interés.

De este modo, para cada especie s se resuelve:

$$I_{\nu,k}^{(s)} = \frac{I_{\nu,k+1}^{(s)} + \kappa_{s,\nu,k} I_{\nu}^{bb}(T_k) \Delta\xi_k}{1 + \kappa_{s,\nu,k} \Delta\xi_k} \quad (4.18)$$

donde $\kappa_{s,\nu,k}$ contiene solo el coeficiente de la especie s .

Esta formulación simplificada es computacionalmente eficiente y, aunque no captura completamente los efectos cruzados de absorción entre especies, proporciona una descomposición razonable de las contribuciones radiativas.

Una vez calculados los campos espectrales $I_{\nu}^{(s)}(x, y)$ para cada especie, se integran sobre las bandas de los filtros para obtener radiancias parciales:

$$I_{f,s}(x, y) = \int_{\nu_{\min,f}}^{\nu_{\max,f}} I_{\nu}^{(s)}(x, y) d\nu \approx \sum_{i=1}^{N_{\nu,f}} I_{\nu_i}^{(s)}(x, y) \Delta\nu \quad (4.19)$$

De esta forma se obtienen:

- I_{f,CO_2} : Contribución del CO_2
- I_{f,H_2O} : Contribución del H_2O
- $I_{f,CO}$: Contribución del CO
- $I_{f,soot}$: Contribución del hollín

Y se verifica que:

$$I_{f,\text{total}}(x, y) \approx \sum_s I_{f,s}(x, y) \quad (4.20)$$

4.3.9. Costo computacional:

Para cada imagen sintética (4 filtros), se deben calcular:

- 1 imagen total: $I_f(x, y)$ para $f \in \{5, 6, 7, 8\}$

- 4 imágenes parciales por filtro: $I_{f,s}(x, y)$ para $s \in \{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{soot}\}$

Esto resulta en $4 \times 5 = 20$ imágenes por llama. Con $\sim 32,000$ líneas de visión por imagen y $\sim 50,000$ puntos espectrales promedio por filtro.

4.4. Configuración experimental

4.4.1. Especificaciones de la cámara infrarroja multiespectral Telops MS-M1K

En este trabajo se utiliza una cámara Telops MS-IR operando en el rango del infrarrojo medio (MWIR), algunas características relevantes de la cámara son [1]:

- Rango espectral de $1,5\text{--}5,0 \mu\text{m}$ ($2.000\text{--}6.667 \text{ cm}^{-1}$).
- 8 filtros intercambiables mediante rueda giratoria.
- Detector InSb enfriado criogénicamente (77 K), matriz focal de 512×640 píxeles.
- Resolución espacial de $0,35 \text{ mrad}$.
- Tiempo de integración ajustable entre $10 \mu\text{s} - 20 \text{ ms}$.

La cámara está equipada con un sistema de filtros rotativos que permite obtener imágenes en ocho bandas espectrales (descritos anteriormente en la Cuadro 3.2). De estos, se utilizan los cuatro descritos en el Cuadro 4.5, seleccionados por su cobertura espacial complementaria.

Tabla 4.5: Filtros espectrales a considerar de la cámara Telops MS-IR.

Filtro	Rango espectral [μm]	Rango de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
Filtro 5: BP-4650-300	4,47 – 4,79	79 – 747
Filtro 6: BP-4325-300	4,23 – 4,37	140 – 1.098
Filtro 7: BBP-3575-4125	3,59 – 4,12	86 – 574
Filtro 8: BBP-2900-3500	2,89 – 3,47	136 – 623

El Filtro 5 captura la banda fundamental de CO ($4,6 \mu\text{m}$), el Filtro 6 captura la banda de CO₂ ($4,2\text{--}4,8 \mu\text{m}$), el Filtro 7 es dominado por la emisión del hollín, y el Filtro 8 cubre la región de hidrocarburos ($2,9\text{--}3,5 \mu\text{m}$).

Esta cámara está calibrada en base a la metodología descrita en el Apartado 3.5.6 (Ver Figura 4.4). Y entrega datos de radiancia espectral en W/cm^2sr . La calibración relaciona los niveles digitales (DL) del detector con la radiancia espectral integrada en cada banda, permitiendo mediciones cuantitativas de intensidad radiativa con alta precisión.

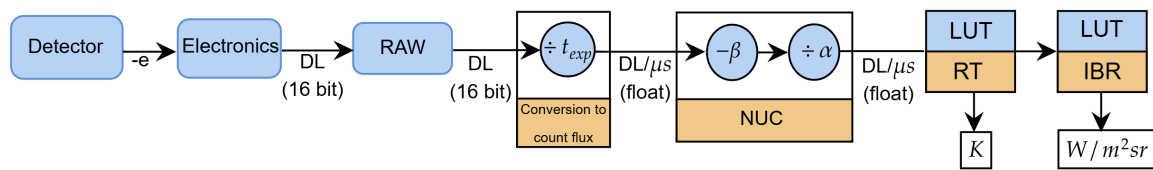


Figura 4.4: Resumen del proceso de Calibración de la cámara Telops [4].

4.4.2. Experimento con Llamas Yale 60 y Yale 80

Se estudiaron dos llamas de difusión laminar de etileno/nitrógeno en un quemador Yale coflow siguiendo las condiciones estandar indicadas en el Cuadro 4.3. Los flujos fueron controlados mediante tres controladores de flujo másico Bronkhorst, garantizando estabilidad y reproducibilidad de las llamas.

La Figura 4.5 muestra el montaje experimental.

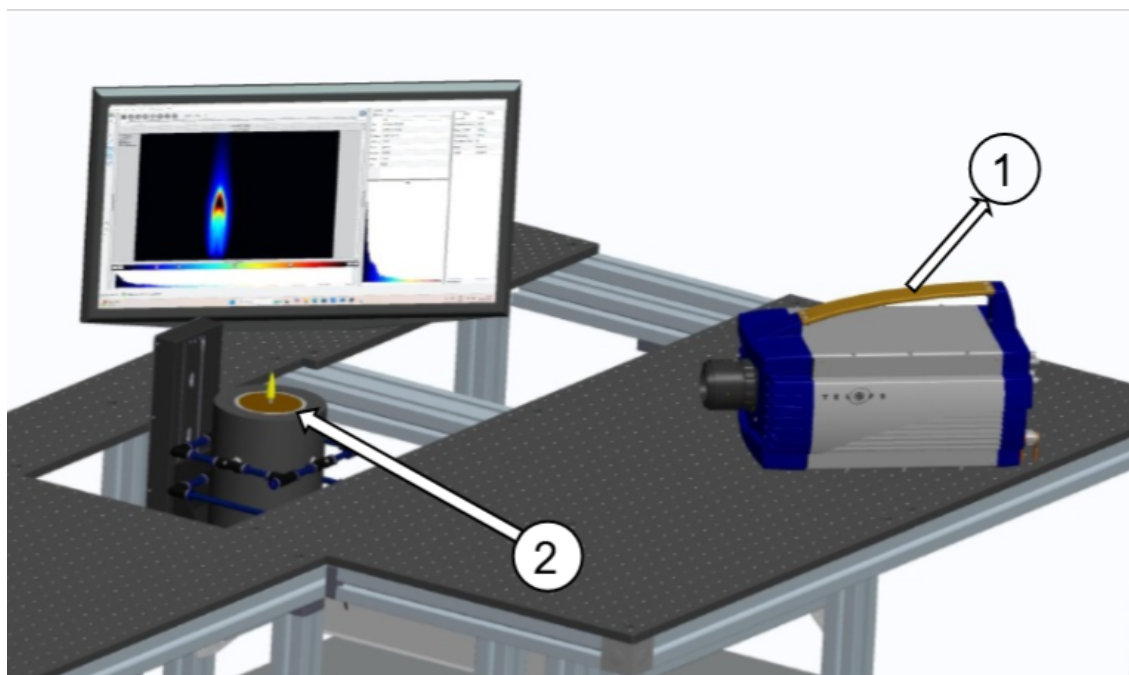


Figura 4.5: Configuración experimental para llamas Yale. La cámara (1) observa el quemador Yale (2) a una distancia de 51 cm.

Para el montaje del setup, se consideraron además las siguientes características:

- **Distancia cámara-quemador:** 51 cm (medida desde la salida del nozzle de combustible hasta la lente de la cámara).

- **Ángulo de observación:** Perpendicular al eje de simetría de la llama.
- **Resolución espacial en el plano de la llama:** 0,025 cm/píxel = 0,25 mm/píxel.
- **Modo de captura:** Full-frame (640 x 512 píxeles), cubriendo completamente la llama.
- **Condiciones ambientales:** Temperatura ambiente de 25 ± 2 °C a presión atmosférica, humedad relativa entre 40–60 %, ventilación natural y sala oscurecida.

Para cada llama y cada filtro, se capturaron secuencias de 100 frames a 10 Hz. Los tiempos de integración se ajustaron individualmente para evitar saturación (manteniendo el nivel máximo por debajo del 70 % de la escala completa, es decir, <math><45.000 \text{ DL}</math>). Los tiempos de integración se encuentran en el Cuadro 4.6.

Tabla 4.6: Tiempos de integración por filtro y llama.

Filtro	Yale 60 (μs)	Yale 80 (μs)
F5	21	20
F6	20	20
F7	30	20
F8	22	14

A continuación, de las 100 frames capturadas por llama y filtro, se calculó el promedio, de modo de suavizar las fluctuaciones de baja frecuencia en la llama. También, dado que las imágenes calibradas se entregan en $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$, para comparación con las simulaciones, se convirtió a $\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr})$ multiplicando por 10^{-4} .

4.5. Análisis, sensibilidad y descomposición espectral

Tras realizar los experimentos de la sección anterior, se aplicaron herramientas analíticas para interpretar los resultados obtenidos, identificar las variables dominantes en cada banda espectral, y cuantificar las contribuciones relativas de cada especie radiante.

4.5.1. Análisis de espectros Line-by-Line

En primer lugar, para examinar en detalle la estructura espectral predicha por el modelo LBL, se extraen espectros de alta resolución $I_\nu(x_0, y_0)$ en puntos representativos de la llama:

- **Punto 1:** Región de máxima emisión de hollín
- **Punto 2:** Zona de máxima temperatura
- **Punto 3:** Regiones con alta producción de gases

En cada punto se grafican:

1. **Espectros por especie:** $I_{\nu}^{(s)}$ para cada especie sobre el rango $2.000\text{--}3.500\text{ cm}^{-1}$ ($2,86\text{--}5,0\ \mu\text{m}$) superpuestos en la misma gráfica
2. **Bandas de filtros:** Marcadores verticales indicando los rangos de F5-F8

4.5.2. Descomposición por especies

A continuación, para cuantificar la contribución de cada especie radiante (CO_2 , H_2O , CO , hollín) a la radiancia total medida en cada filtro, se calculan radiancias parciales, repitiendo el cálculo de transferencia radiativa pero considerando únicamente el coeficiente de absorción de una especie a la vez.

Para la obtención de estas contribuciones, se siguió el proceso descrito en la Apartado 4.3.7 para la separación de contribuciones por especie.

Cabe destacar que, debido a los efectos no lineales de autoabsorción, la suma de las radiancias parciales no es igual a la radiancia total:

$$I_f^{\text{total}} \neq \sum_s I_{f,s} \quad (4.21)$$

Esto ocurre porque al calcular $I_{f,s}$ se ignora la absorción por otras especies en el camino óptico. Sin embargo, las radiancias parciales son útiles para identificar qué especies contribuyen significativamente en cada región espacial y banda espectral.

Para visualizar la importancia relativa de cada especie, se define la **contribución fraccional**:

$$\eta_{f,s}(x, y) = \frac{I_{f,s}(x, y)}{\sum_{s'} I_{f,s'}(x, y)} \times 100\% \quad (4.22)$$

Esta métrica permite identificar, para cada píxel y filtro:

- Regiones dominadas por gases (típicamente $\eta_{\text{gas}} > 80\%$)
- Regiones mixtas ($40\% < \eta_{\text{soot}} < 60\%$)
- Regiones dominadas por hollín ($\eta_{\text{soot}} > 70\%$)

Los campos de $\eta_{f,s}(x, y)$ se grafican como mapas de calor sobre el dominio de la llama, permitiendo visualizar espacialmente dónde cada especie aporta más a la señal detectada, cómo cambia el balance gas/hollín entre filtros y que regiones son críticas para la validación del modelo (alta sensibilidad a múltiples especies).

4.5.3. Análisis de elasticidad

El modelo directo depende de tres campos de entrada principales: temperatura $T(r, z)$, fracciones molares de gases $X_s(r, z)$, y fracción volumétrica de hollín $f_v(r, z)$. Para identificar cuáles de estas variables tienen mayor impacto en la radiancia observada (y por tanto son más importantes para inferir en un problema inverso), se realiza un análisis de sensibilidad local mediante elasticidades.

La elasticidad de la radiancia I_f respecto a una variable de entrada ϕ se define como:

$$\mathcal{E}_{I_f}^{\phi} = \frac{\partial \ln I_f}{\partial \ln \phi} = \frac{\phi}{I_f} \frac{\partial I_f}{\partial \phi} \quad (4.23)$$

con $\phi \in \{T, X_{CO_2}, X_{H_2O}, X_{CO}, f_v\}$

Esta cantidad adimensional representa el cambio porcentual en la radiancia resultante de un cambio porcentual en ϕ . Por ejemplo, $\mathcal{E}_{I_f}^T = 2$ indica que un incremento del 1% en T produce un incremento del 2% en I_f ; en cambio, $\mathcal{E}_{I_f}^{f_v} = 0,3$ indica que la radiancia es relativamente insensible a cambios en f_v . En general:

- $\mathcal{E}_{I_f}^{\phi} \gg 1$: banda muy sensible a la variable.
- $\mathcal{E}_{I_f}^{\phi} \approx 1$: sensibilidad lineal.
- $\mathcal{E}_{I_f}^{\phi} \ll 1$: banda poco sensible a la variable.

Las elasticidades se calculan numéricamente mediante perturbaciones de las variables de entrada. En primer lugar, se calcula la radiancia de referencia $I_f^{(0)}(x_i, y_j)$ usando los campos originales de CoFlame.

A continuación, se perturba cada variable ϕ en $\delta = \pm 10\%$, manteniendo las otras variables constantes. Con esto, se resuelve la RTE con el campo perturbado, obteniendo en cada banda $I_f^{(\phi+)}(x_i, y_j)$.

Con esto, la elasticidad se aproxima por:

$$\mathcal{E}_{I_f}^{\phi}(x_i, y_j) \approx \frac{I_f^{(\phi+)} - I_f^{(0)}}{I_f^{(0)}} \cdot \frac{1}{\delta} = \frac{I_f^{(\phi+)} - I_f^{(0)}}{I_f^{(0)}} \cdot 100 \quad (4.24)$$

Para evitar reevaluar múltiples veces los campos completos, se evalúa la elasticidad en 4 puntos representativos por cada filtro:

- Máximo de Temperatura
- Máximo de X_{CO_2}

- Máximo de X_{H_2O}
- Máximo de f_v

La evaluación de elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^\phi(x, y)$ permite identificar:

1. **Variable dominante por banda:** Si $|\mathcal{E}_{I_f}^T| \gg |\mathcal{E}_{I_f}^{f_v}|$, la temperatura domina la respuesta en ese filtro.
2. **Sensibilidad al hollín:** En que filtros $\mathcal{E}_{I_f}^{f_v}$ es comparable a $\mathcal{E}_{I_f}^T$.
3. **Importancia de gases específicos:** Comparación de $\mathcal{E}_{I_f}^{X_{CO_2}}$ vs. $\mathcal{E}_{I_f}^{X_{H_2O}}$ en F5 y F6.
4. **Estrategia de inversión:** Variables con mayor elasticidad deben inferirse primero en un algoritmo de reconstrucción.

4.5.4. Comparación entre imágenes sintéticas y experimentales

Tras analizar los resultados obtenidos con el modelo sintético, estos se compararan con las mediciones experimentales de la cámara Telops.

Se presenta una comparación global, extrallendo perfiles unidimensionales en posiciones específicas:

1. Perfil radial a altura fija: $I_f(r) = I_f(x, y = y_0)$ donde y_0 corresponde a alturas de interés (ej. $z = 2$ cm, altura de máximo f_v).
2. Perfil axial en el eje de simetría: $I_f(z) = I_f(x = 0, y)$.

4.6. Caso de aplicación: pirólisis y combustión de PMMA

El experimento de aplicación en desarrollo busca estudiar como la composición del coflow afecta:

- Morfología de la llama (altura, ancho, forma)
- Intensidad radiativa en diferentes bandas espectrales
- Longitud de precalentamiento (*heater length*)
- Tasa de regresión de la superficie

Aprovechando las cuatro bandas cortas de la cámara, se buscan distinguir regiones dominadas por la emisión de productos de combustión, regiones con combustión incompleta e identificar regiones de menor temperatura que no serían distinguibles en filtros de banda ancha.

4.6.1. Configuración experimental

La configuración experimental utilizada se puede observar en la Figura 4.6.

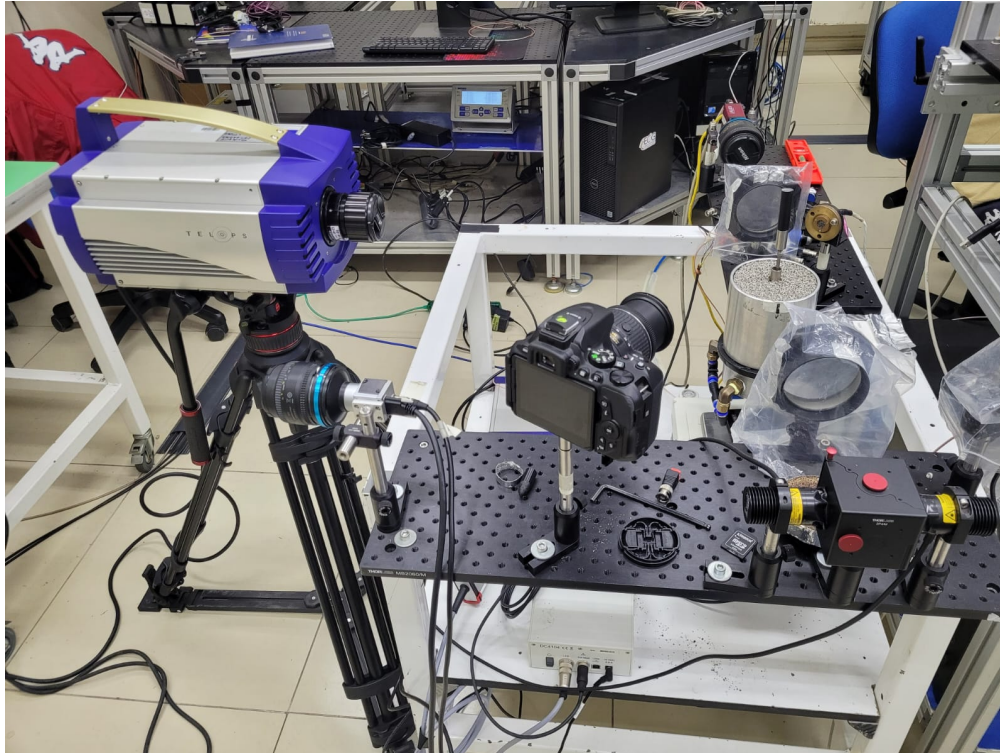


Figura 4.6: Configuración experimental para el experimento con PMMA.

Las muestras consistieron en cilindros de PMMA comercial con:

- **Diámetro:** $d = 12,7$ mm, media pulgada
- **Longitud inicial:** $L_0 = 90$ mm
- **Orientación:** Vertical
- **Soporte:** Pinza metálica en extremo inferior, dejando 70 mm expuestos

Esta configuración permite combustión descendente con formación de cono de fusión en el extremo superior, observación lateral completa de la llama y la zona de precalentamiento y un tiempo de combustión suficiente ($\sim 3-5$ minutos) para la captura multispectral.

Para variar la composición del coflow, las muestras se coloraron en un quemador de biomasa cilíndrico axisimétrico, o Coflow Burner, de 100 mm de diámetro, sostenidas por una varilla de acero de 28 cm de largo.

Se probaron nueve condiciones de coflow controladas mediante la mezcla de aire y nitrógeno usando controladores de flujo másico Bronkhorst, permitiendo variar el índice de oxígeno (OI) y la velocidad del coflow de manera independiente. Estas condiciones se resumen en el Cuadro 4.7.

Tabla 4.7: Condiciones probadas en experimentos PMMA. El flujo total se mantuvo constante para comparabilidad.

Condición	Aire (l/min)	N ₂ (l/min)	O ₂ (% vol)	Velocidad (cm/s)
29	29	0	21	6,2
86	86	0	21	18,3
141	141	0	21	30,0
25+4	25	4	18	6,2
27+2	27	2	19	6,2
79+7	79	7	19	18,3
28+1	28	1	20	6,2
81+5	81	5	20	18,3
133+8	133	8	20	30,0

La cámara infrarroja Telops se posicionó:

- **Distancia:** 50 cm desde la ventana lateral de cuarzo
- **Ángulo:** Perpendicular al eje del cilindro (vista lateral)
- **Resolución espacial:** ~0,25 mm/píxel en el plano de la muestra
- **Campo de visión:** Captura completa del cilindro y llama

4.6.2. Procedimiento experimental

Para cada condición de atmósfera, se siguió el siguiente protocolo:

1. Preparación:

- Insertar cilindro de PMMA en soporte
- Estabilizar flujo de coflow controlado durante 1 minuto
- Capturar imagen de fondo (llama apagada) para cada filtro F5-F8

2. Ignición:

- Aplicar soplete (llama de propano) en extremo superior durante 3–5 segundos
- Retirar soplete cuando se establece combustión autosostenida

3. Captura durante combustión:

- Iniciar secuencia de captura.
- Frecuencia: 10 Hz por filtro (ciclo completo cada 10 segundos)
- Duración: Desde ignición hasta extinción ($\sim 180-240$ s dependiendo de la condición)
- Frames por filtro: 10 promediados por snapshot
- Velocidad: se capturó la velocidad de propagación tomando un punto inicial y final de combustión, considerando el tiempo ocurrido entre un punto y otro.

4. Extinción:

- Extinción natural cuando la llama se apaga por si misma.
- Extinción forzada mediante soplado a $t \approx 240$ s.
- Heater length: Se obtiene en el instante siguiente a la extinción de la llama.

5. Repetibilidad:

- El experimento sólo se realizó una vez por cada condición de atmósfera. En futuros trabajos se verá repetir al menos 3 veces por condición.

Los tiempos de integración se ajustaron para evitar saturación en las regiones de máxima emisión (cono de fusión y base de la llama).

4.6.3. Análisis del heater length

Se desarrolló un procedimiento semi-automático para extraer el $L_h(t)$ de las imágenes infrarrojas:

1. **Detección de base de llama:** Umbralización en filtro F6 (banda de CO_2 , buena definición de llama) para identificar la región de combustión activa. El punto más bajo de intensidad $>10\%$ del máximo define $z_{\text{base llama}}$.
2. **Detección de la zona de precalentamiento:** Umbralización en filtro 2 y filtro 7 (bandas sensibles a menores temperaturas en el sólido caliente) para identificar el contorno de la zona de precalentamiento mientras estaba prendido. Posterior a la extinción, se revisó también la zona de calor remanente en el filtro 1. El extremo inferior del contorno define $z_{\text{largo calentamiento}}$.
3. **Cálculo de L_h :** Diferencia de coordenadas verticales entre z_{base} y $z_{\text{calentamiento}}$, convertida a distancia física usando la calibración espacial de la cámara.

5. Resultados

5.1. Campos de Entrada desde CoFlame

Las simulaciones reprodujeron las condiciones experimentales descritas en la Tabla 4.1, obteniéndose los campos termodinámicos y de especies que constituyen la entrada del modelo de transferencia radiativa hacia adelante.

La Figura 5.1 muestra los campos obtenidos para la llama Yale 60.

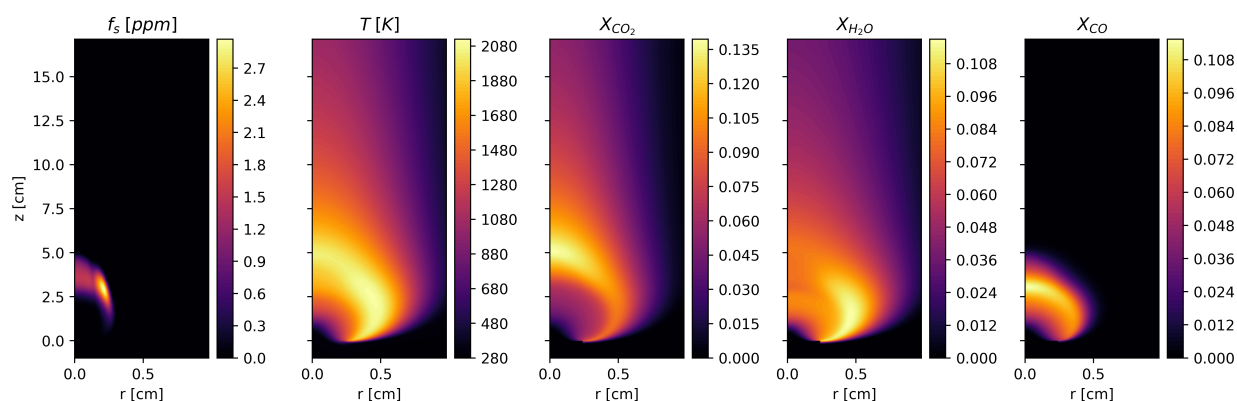


Figura 5.1: Campos de entrada desde CoFlame para Yale 60. De izquierda a derecha: fracción volumétrica de hollín f_v (ppm), temperatura T (K), fracción molar de CO_2 (X_{CO_2}), fracción molar de H_2O ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) y fracción molar de CO (X_{CO}).

Respecto a la estructura general de la llama, los campos presentan una disposición de llama de difusión típica, con un zona de reacción concentrada en la región donde el combustible y el oxidante se encuentran.

En cuanto a la fracción volumétrica de hollín (f_v), se puede observar que el hollín se concentra en una zona específica de la llama, con un máximo que ronda los 3 ppm. Esta distribución estrecha es característica de las llamas de difusión, donde el hollín se forma en la zona rica de combustible y luego se oxida parcialmente.

En el campo de temperatura, se observa una distribución con gradientes significativos desde la zona de reacción hasta las zonas exteriores, con un máximo cercano a los 2100 K y mayores temperaturas en las cercanías del eje central, desde la base hasta $z = 7 - 8$ cm.

En cuanto a los campos de fracción molar de las especies analizadas, se observa que los campos de CO_2 y H_2O tienen patrones similares, con una distribución espacial más amplia que la del hollín y el CO . De los tres gases de combustión analizados, la especie CO_2 alcanza las mayores concentraciones (alrededor de 0,138), mientras que el H_2O y el CO tienen máximos similares, cercanos a 0,116. Lo anterior sugiere condiciones ricas localmente o combustión incompleta en ciertas regiones.

A continuación, la Figura 5.2 muestra los campos obtenidos para la llama Yale 80.

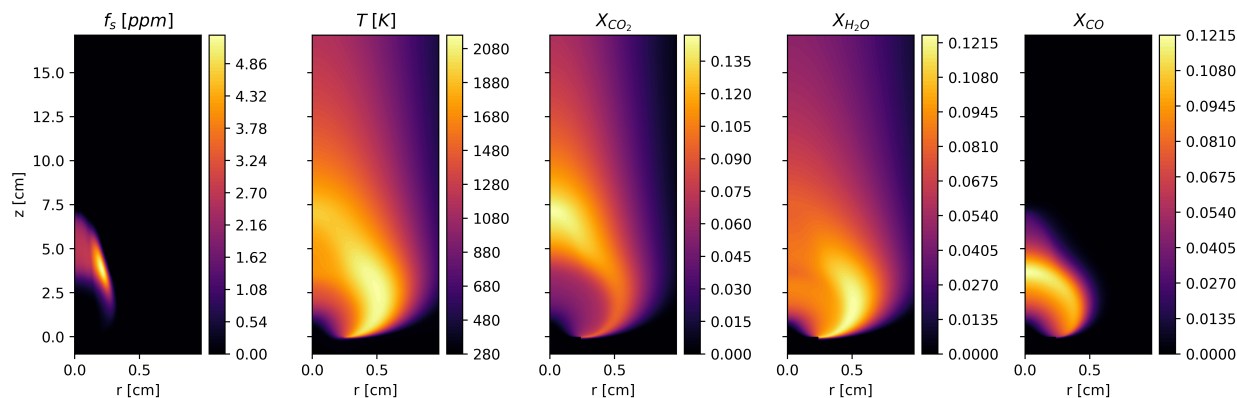


Figura 5.2: Campos de entrada desde CoFlame para Yale 80. De izquierda a derecha: fracción volumétrica de hollín f_v (ppm), temperatura T (K), fracción molar de CO_2 (X_{CO_2}), fracción molar de H_2O ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) y fracción molar de CO (X_{CO}).

Comparando los campos de la Yale 80 con los de la Yale 60, se puede ver a simple vista que en la Yale 80 la fracción volumétrica de hollín aumenta sustancialmente, alcanzando los 5 ppm. Esto es consistente con las condiciones más ricas en combustible que tiene la Yale 80. La región de formación de hollín también se extiende más en altura (hasta $z \approx 7$ cm versus $z \approx 5$ cm en la Yale 60), indicando una llama con mayor contenido de hollín distribuido en un volumen mayor.

El campo de temperatura mantiene valores máximos similares, con la Yale 80 siendo un poco mayor que la Yale 60. Sin embargo, la distribución espacial varía notablemente. La zona de alta temperatura se extiende más verticalmente en la Yale 80, lo cual es coherente con una llama más larga y con mayor liberación de energía local.

Finalmente, en los campos de las especies se observa un incremento ligero en los máximos de los 3 productos de combustión aunque el CO_2 sigue siendo la especie con mayor fracción molar.

Estos campos simulados fueron validados previamente con los datos experimentales obtenidos por Smooke et al. [5]. En resumen:

- **Temperatura:** Smooke et al. (2005) reportan temperaturas máximas de 2000 – 2100 K en llamas Yale, lo cual es consistente con simulaciones.
- f_v : Valores máximos están dentro del rango experimental reportado ($\pm 10 - 20\%$).
- **Morfología:** Las llamas de difusión de etileno tienen una forma característica (base ancha, estrechamiento hacia arriba), la cual es reproducida correctamente.

5.2. Espectros de alta resolución en puntos representativos

Para entender el origen de las contribuciones espectrales, se extrajeron espectros LBL (2000 – 3500 cm^{-1} , resolución 0,01 cm^{-1}) en tres puntos representativos:

- **Punto 1:** Máximo de f_v (Yale 60: $r = 36$, $z = 160$; Yale 80: $r = 35$, $z = 199$)
- **Punto 2:** Máximo de X_{CO_2} (Yale 60: $r = 0$, $z = 248$; Yale 80: $r = 0$, $z = 332$)
- **Punto 3:** Máximo de T (Yale 60: $r = 74$, $z = 139$ Yale 80: $r = 84$, $z = 146$)

5.2.1. Espectros Yale 60

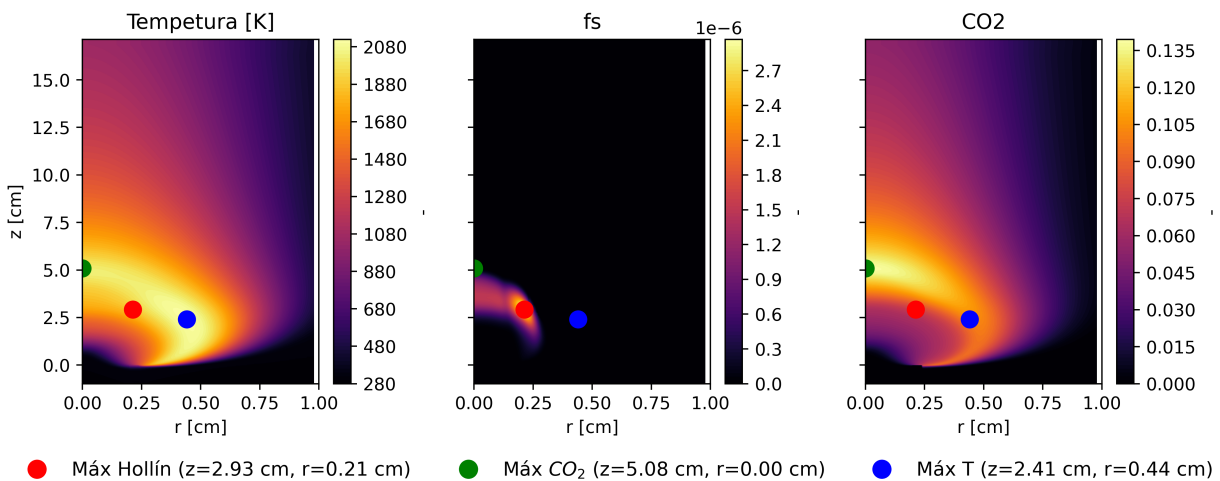


Figura 5.3: Puntos representativos Yale 60. Colores: rojo=hollín, verde= CO_2 , azul= T .

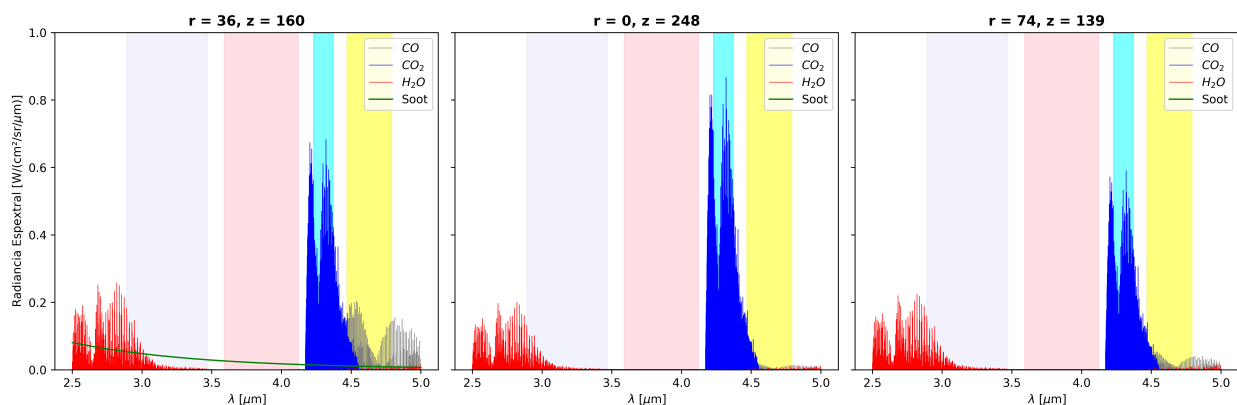


Figura 5.4: Yale 60: Espectros LBL de alta resolución en puntos representativos. Columnas: punto f_v max, punto CO_2 max, punto T max. Líneas: azul= CO_2 , roja= H_2O , gris= CO , verde=soot. Rectángulos sombreados: rangos de filtros F5-F8.

La Figura 5.4 muestra los espectros en los tres puntos, con las bandas espectrales de cada filtro destacadas por colores:

- Filtro 5: $4,47 - 4,79 \mu\text{m} / 2088 - 2237 \text{ cm}^{-1}$
- Filtro 6: $4,23 - 4,37 \mu\text{m} / 2288 - 2364 \text{ cm}^{-1}$
- Filtro 7: $3,59 - 4,12 \mu\text{m} / 2427 - 2786 \text{ cm}^{-1}$
- Filtro 8: $2,89 - 3,47 \mu\text{m} / 2882 - 3460 \text{ cm}^{-1}$

Las principales características espectrales observadas son las siguientes:

- **CO₂ (banda 4,2 – 4,8 μm / 2083 – 2381 cm^{-1}):** La Banda fundamental se centra en $4,26 \mu\text{m}$ (2349 cm^{-1}), con estructura rotacional P-Q-R claramente visible en los tres puntos representados.

La máxima intensidad se alcanza en el punto de máximo CO₂ (centro), con $I_{\lambda} \approx 0,8 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ en pico Q-branch, mientras que en el punto de máximo hollín $I_{\lambda} \approx 0,7 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ y en el punto de máxima T $I_{\lambda} \approx 0,5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$.

El F6 (azul) captura casi completamente el pico Q-branch y parte significativa de las ramas P y R, el F5 (amarillo) captura principalmente la rama P de CO₂ con menor intensidad.

- **H₂O (banda principal 2,5 – 3,2 μm / 3125 – 4000 cm^{-1}):** Se observa un complejo de bandas fundamentales (stretch y bending modes), con estructura extremadamente densa debido a la geometría no-lineal de la molécula.

La máxima intensidad espectral se alcanza en la región $2,5 - 3,0 \mu\text{m}$, con $I_{\lambda} \approx 0,15 - 0,25 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$. La intensidad de H₂O es significativamente menor que la de CO₂ en todos los puntos.

El F8 (gris claro) captura la cola de alta frecuencia (borde derecho) de esta banda, el F7 (rosa claro) captura parte de las ramas de menor frecuencia.

- **CO (banda 4,4 – 4,8 μm / 2083 – 2273 cm^{-1}):** La banda fundamental se centra en $4,67 \mu\text{m}$ (2143 cm^{-1}), aunque la intensidad es muy débil comparada con CO₂, con un máximo de $I_{\lambda} \approx 0,20 - 0,25 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$.

El F5 (amarillo) captura principalmente la rama R de CO, solapándose parcialmente con la rama P de CO₂.

La intensidad espectral se vuelve prácticamente invisible en el punto de máximo CO₂ (centro) debido al solapamiento con la banda intensa de CO₂. Sin embargo, existe mayor visibilidad en el punto de máximo hollín, donde CO₂ es menos dominante.

- **Hollín (continuo 2,5 – 5,0 μm):** El espectro es continuo y suave, sin estructura de bandas, aumentando monótonamente hacia longitudes de onda cortas (frecuencias altas) según ley de Rayleigh.

La máxima intensidad se alcanza en el punto de máximo f_v (izquierda), con $I_\lambda \approx 0,05 - 0,10 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ en región de F8-F7. En términos relativos, el hollín tiene mayor contribución en el punto de máximo hollín, mientras que es menos notorio en el punto de máximo CO_2 .

Presenta mayor contribución en la región $2,5 - 3,5 \mu\text{m}$ (F8-F7), donde se acerca a H_2O . En cambio, en región de F5-F6 ($4,2 - 5,0 \mu\text{m}$), el hollín es claramente superado por las bandas de CO_2 y CO .

Se debe notar que el continuo de hollín proporciona la “base” sobre la cual se superponen las bandas gaseosas.

Observaciones adicionales:

- La separación espacial entre máximos de diferentes especies refleja la estructura de la llama de difusión
- Punto de máximo CO_2 ($r=0, z=248$) muestra emisión dominada por gases, con banda de CO_2 muy intensa
- Punto de máximo hollín ($r=36, z=160$) muestra mayor contribución relativa del continuo en región F7-F8
- Punto de máxima T ($r=74, z=139$) presenta espectro intermedio con contribuciones más balanceadas de las especies gaseosas
- Los filtros F5-F6 son altamente sensibles a CO_2 , mientras que F7-F8 capturan combinación de H_2O y hollín

5.2.2. Espectros Yale 80

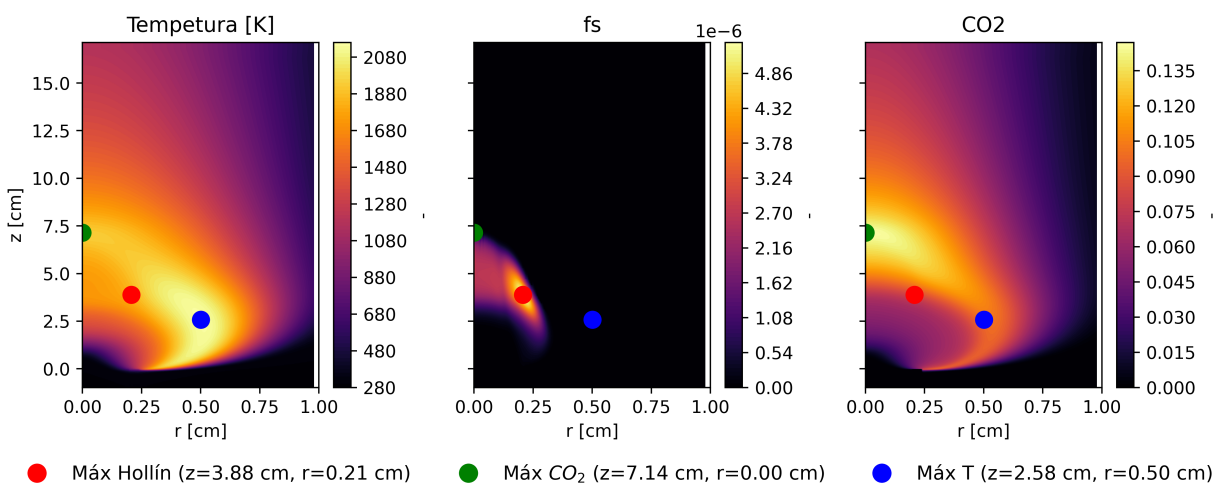


Figura 5.5: Puntos representativos Yale 80. Colores: rojo=hollín, verde= CO_2 , azul=T.

La Figura 5.6 muestra los espectros en los tres puntos. Con los mismos colores para la banda de cada filtro de la Figura 5.4.

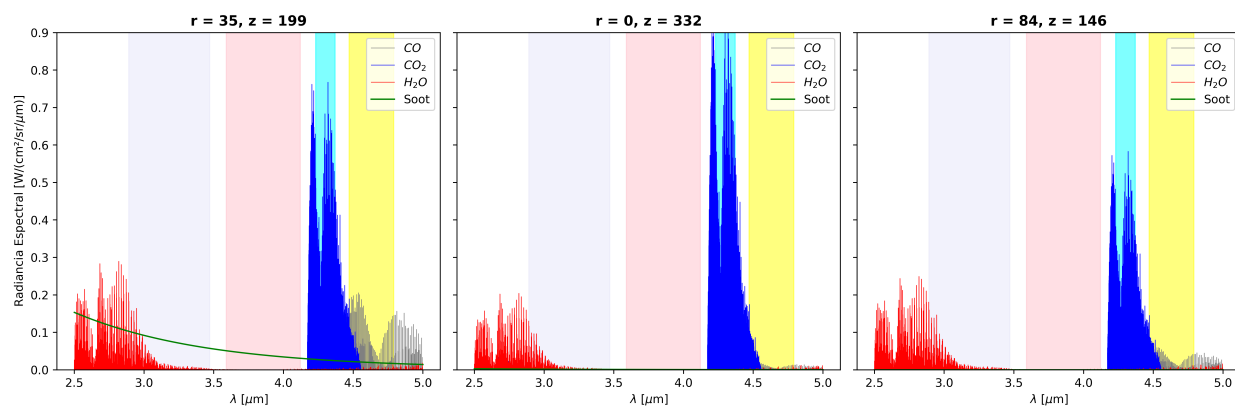


Figura 5.6: Yale 80: Espectros LBL de alta resolución en puntos representativos. Columnas: punto f_v max, punto CO_2 max, punto T max. Líneas: azul= CO_2 , roja= H_2O , gris= CO , verde=soot. Rectángulos sombreados: rangos de filtros F5-F8.

Los cambios principales respecto a Yale 60 son:

- Aumento general de intensidad radiativa:** En Yale 60, en el punto de máximo CO_2 se alcanza una intensidad $I_\lambda \approx 0,8 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, mientras que en Yale 80 el mismo punto muestra $I_\lambda \approx 0,9 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$. En general, la intensidad absoluta es comparable o ligeramente superior en la Yale 80.
- Incremento significativo en contribución de hollín:** El punto de máximo f_v en Yale 80 muestra un continuo más elevado con $I_\lambda \approx 0,12 - 0,15 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ en la región $2,5 - 3,0 \mu\text{m}$, comparado con $I_\lambda \approx 0,05 - 0,10 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ en Yale 60 para la misma región. Esto representa un incremento de $50 - 80 \%$ en la radiancia del continuo de hollín, volviéndose más competitivo con H_2O en la región F7-F8.
- Mayor competencia hollín-gases en región F7-F8 ($2,5 - 3,2 \mu\text{m}$):** En Yale 60, el punto de máximo f_v muestra que la intensidad espectral del H_2O claramente domina sobre la del hollín. Sin embargo, en Yale 80 para el mismo punto, el hollín y H_2O presentan intensidades comparables. Este cambio representa una dificultad para la separación espectral entre especies en los filtros F7-F8.
- Estructura espectral de gases preservada:** Las bandas de CO_2 mantienen su estructura rotacional P-Q-R bien definida, con el pico Q-branch siguiendo como el rasgo espectral dominante alcanzando $I_\lambda \approx 0,7 - 0,9 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$. La banda de H_2O conserva su estructura densa característica, y la rama R de CO permanece visible en F5, aunque con menor contraste.

- **F6 mantiene sensibilidad selectiva a CO₂:** En la región del pico Q-branch (4,26 μm), el CO₂ continúa siendo 6-8 veces más intenso que el continuo de hollín. El filtro F6 (cyan) captura predominantemente emisión de CO₂ en todos los puntos analizados, manteniendo su selectividad incluso con el incremento de hollín en Yale 80.
- **Desplazamiento espacial de máximos:** En Yale 60, el máximo de CO₂ se ubica en (r=0, z=248) y el máximo de f_v en (r=36, z=160), mientras que en Yale 80 estos puntos se desplazan a (r=0, z=332) y (r=35, z=199) respectivamente. La llama Yale 80 es más extendida verticalmente, con una altura del máximo CO₂ más o menos un 34 % mayor, aunque la posición radial del máximo hollín permanece prácticamente invariante.
- **Implicaciones para inversión espectral:** El mayor acoplamiento radiativo hollín-gases en Yale 80 aumenta la complejidad del problema inverso. Los filtros F7-F8 pierden selectividad hacia H₂O debido a la mayor contribución de hollín, mientras que F5-F6 mantienen buena sensibilidad a CO₂/CO gracias a sus bandas intensas. También es necesario considerar efectos de autoabsorción más significativos en Yale 80.

5.3. Intensidades totales integradas por filtro

Los resultados del cálculo numérico para las llamas Yale 60 y Yale 80 se encuentran en la Figura 5.7 y la Figura 5.8, donde se muestra la distribución espacial de intensidad radiativa total (I_{total}) medida en cada filtro.

Estos campos representan la radiación integrada espectralmente sobre el ancho de banda de cada filtro, considerando las contribuciones combinadas de todas las especies participantes (CO₂, H₂O, CO y hollín).

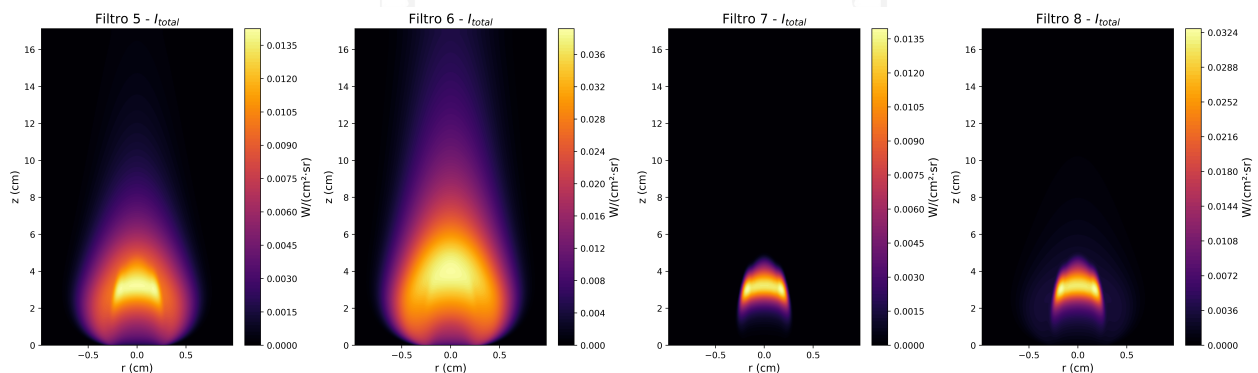


Figura 5.7: Campos de intensidad total para los cuatro filtros, Yale 60.

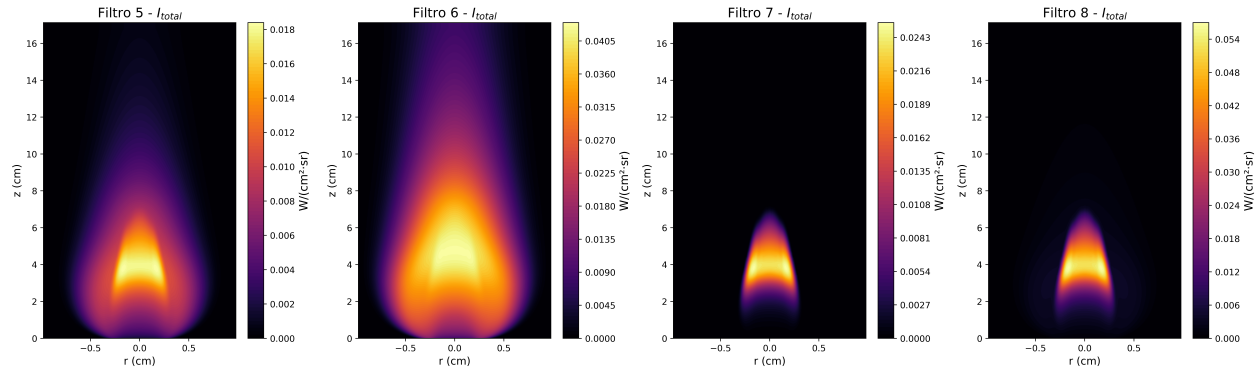


Figura 5.8: Campos de intensidad total para los cuatro filtros, Yale 80.

Se observa que existe una jerarquía en la intensidad radiativa por filtro que varía entre llamas. En Yale 60: $F6 > F8 > F5 \approx F7$, con F6 alcanzando valores máximos de $I_{total} \approx 0,0389$ $W/(cm^2 \cdot sr)$, seguido por F8 con $\approx 0,0327$ $W/(cm^2 \cdot sr)$, y F5-F7 mostrando intensidades similares de $\approx 0,014$ $W/(cm^2 \cdot sr)$. En Yale 80, la jerarquía cambia a $F8 > F6 > F7 > F5$, con F8 alcanzando $I_{total} \approx 0,0568$ $W/(cm^2 \cdot sr)$, superando a F6 que alcanza $\approx 0,0427$ $W/(cm^2 \cdot sr)$, seguido por F7 con $\approx 0,0254$ $W/(cm^2 \cdot sr)$ y F5 con $\approx 0,0184$ $W/(cm^2 \cdot sr)$. Este cambio de jerarquía refleja el incremento en la contribución del hollín en F7-F8: mientras que en Yale 60 el CO_2 de F6 domina sobre F8, en Yale 80 la mayor fracción volumétrica de partículas invierte esta relación.

También se debe notar que todos los filtros capturan la estructura característica de la llama de difusión, con máxima emisión concentrada en la zona de reacción ($z \approx 3 - 6$ cm, $r \approx 0 - 0.5$ cm). Los filtros F5 y F6 muestran una región emisora más extendida verticalmente (hasta $z \approx 10 - 12$ cm) comparada con F7 y F8 (hasta $z \approx 6 - 7$ cm), reflejando la mayor persistencia de las especies gaseosas CO_2 y CO en la pluma de combustión versus la oxidación más rápida del hollín y el enfriamiento que afecta a H_2O .

A continuación, comparando la Yale 60 con la Yale 80, se observa:

1. La Yale 80 muestra incrementos significativos en intensidad radiativa total en todos los filtros con respecto a la Yale 60. F6 aumenta alrededor de un 10 % (de 0,0389 a 0,0427 $W/(cm^2 \cdot sr)$), F8 aumenta un 74 % (de 0,0327 a 0,0568 $W/(cm^2 \cdot sr)$), F7 aumenta cerca de un 82 % (de 0,0139 a 0,0254 $W/(cm^2 \cdot sr)$), y F5 aumenta un valor cercano a 30 % (de 0,0142 a 0,0184 $W/(cm^2 \cdot sr)$). Este patrón refleja el mayor flujo de combustible y la mayor producción de productos de combustión y hollín en la Yale 80.
2. El incremento desigual entre filtros modifica las relaciones de intensidad. En Yale 60, la relación $F6/F8 \approx 1,19$, mientras que en Yale 80 esta relación disminuye a $F6/F8 \approx 0,75$. Esto indica que F8 experimenta un incremento proporcionalmente mayor, consistente con el aumento significativo en la contribución de hollín (cuyo espectro aumenta hacia longitudes de onda cortas) observado en los pulsos espectrales de la Yale 80.

3. En Yale 80, la región de emisión significativa se extiende verticalmente de manera más pronunciada, especialmente en F5 y F6 donde se observa emisión apreciable hasta $z \approx 14-15$ cm (versus $z \approx 12$ cm en Yale 60). Esto es consistente con la llama más larga observada en los campos de especies, donde el máximo de CO_2 se desplaza de $z = 248$ mm a $z = 332$ mm.
4. Ambas llamas mantienen una estructura radial similar con máxima emisión cerca del eje central ($r \approx 0 - 0.5$ cm). Sin embargo, Yale 80 muestra una región emisora ligeramente más ancha en la base de la llama, particularmente visible en F7 y F8, sugiriendo una zona de formación de hollín espacialmente más extendida.

5.4. Análisis Espectral y Descomposición por Especies

Para profundizar en el contenido espectral de la radiación emitida, se separan las contribuciones de gases y hollín para entender qué especies dominan en cada banda y región espacial.

5.4.1. Campos de contribución por especie: Filtro 5 - Yale 60

La Figura 5.9 muestra los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 5 para la llama Yale 60.

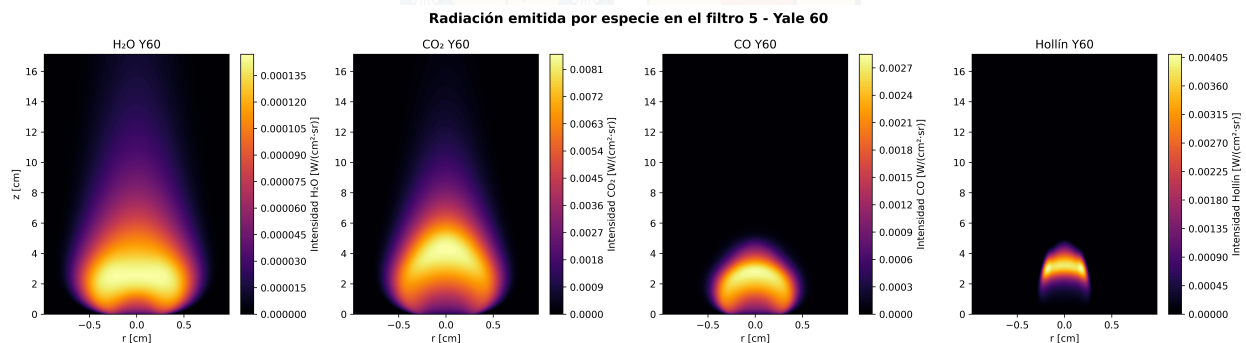


Figura 5.9: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 5 en Yale 60. Filas: H_2O , CO_2 , CO , hollín.

Analizando las intensidades absolutas por especie, el CO_2 exhibe la mayor intensidad radiativa con un máximo de $I_{\text{CO}_2} \approx 0,0086 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ localizado en la zona central de la llama ($r \approx 0$ cm, $z \approx 3 - 5$ cm). El CO presenta intensidades moderadas con máximos de $I_{\text{CO}} \approx 0,0028 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en la misma región espacial. El hollín muestra intensidades máximas de $I_{\text{soot}} \approx 0,00407 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ concentradas en una zona más localizada ($r \approx 0,25$ cm, $z \approx 2 - 4$ cm), mientras que el H_2O presenta las contribuciones más bajas con $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,000146 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, distribuidas principalmente en la región superior de la pluma de productos.

A continuación, la Figura 5.10 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

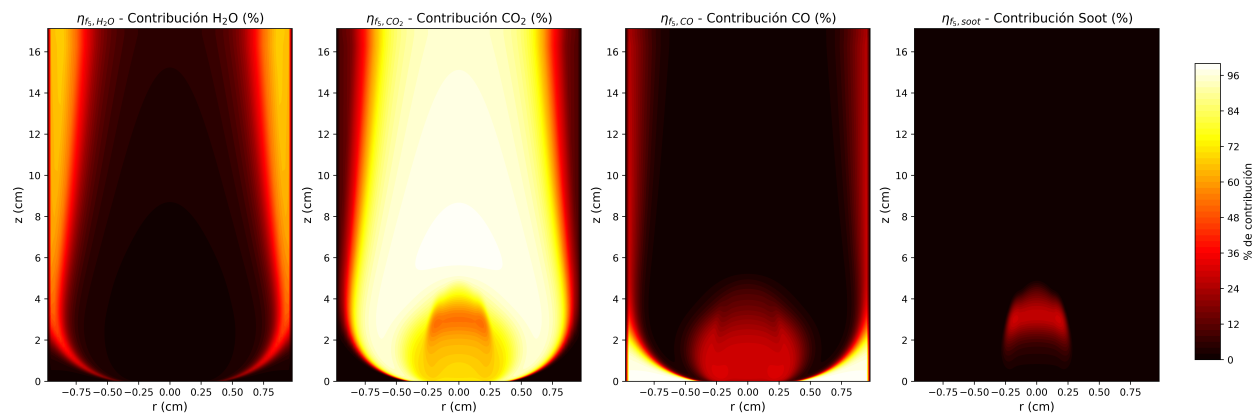


Figura 5.10: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 5 en Yale 60.
Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

Los mapas de contribución porcentual revelan que el CO₂ domina completamente la emisión en F5, alcanzando contribuciones del 84 – 96 % en la mayor parte del dominio, especialmente en el eje central y en la región superior ($z > 8$ cm). El H₂O mantiene contribuciones que alcanzan el 36 – 60 % en las regiones exteriores y superiores de la llama. El CO presenta contribuciones significativas únicamente en una región intermedia estrecha ($z \approx 0 - 4$ cm, $r \approx 0 - 0,5$ cm) donde alcanza hasta 12 – 36 % de la emisión total. El hollín muestra contribuciones apreciables (12 – 36 %) únicamente en una zona muy localizada correspondiente al punto máximo de fracción volumétrica ($r \approx 0,25$ cm, $z \approx 2 - 4$ cm).

Con lo anterior, se puede determinar como la morfología espacial de cada especie refleja su rol en la estructura de la llama de difusión. El CO₂, como producto principal de combustión completa, se distribuye ampliamente desde la zona de reacción hasta la pluma superior, manteniendo su dominancia radiativa en todo el campo. El CO, producto de combustión incompleta, está confinado a la zona de reacción donde coexiste con el hollín. El hollín presenta la distribución más compacta, limitada a la región de formación donde las condiciones ricas y las altas temperaturas favorecen su producción. El H₂O, aunque presente en toda la región de productos, tiene una contribución radiativa marginal en F5 debido a que este filtro se encuentra fuera de las bandas de absorción intensas del agua.

Cómo conclusión para el filtro 5 ($4,47 - 4,79 \mu\text{m}$), se comprueba como este captura principalmente la rama P de la banda fundamental de CO₂ centrada en $4,26 \mu\text{m}$ y la rama R de la banda fundamental de CO en $4,67 \mu\text{m}$. La dominancia de CO₂ (>84 % en la mayoría del dominio) confirma que F5 es altamente selectivo a esta especie. La contribución relativamente baja del hollín (<24 % incluso en su máximo) indica que el continuo de hollín es significativamente menos intenso que las bandas gaseosas en esta región espectral.

5.4.2. Campos de contribución por especie: Filtro 6 - Yale 60

Continuando, la Figura 5.11 muestra los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 6 para la llama Yale 60.

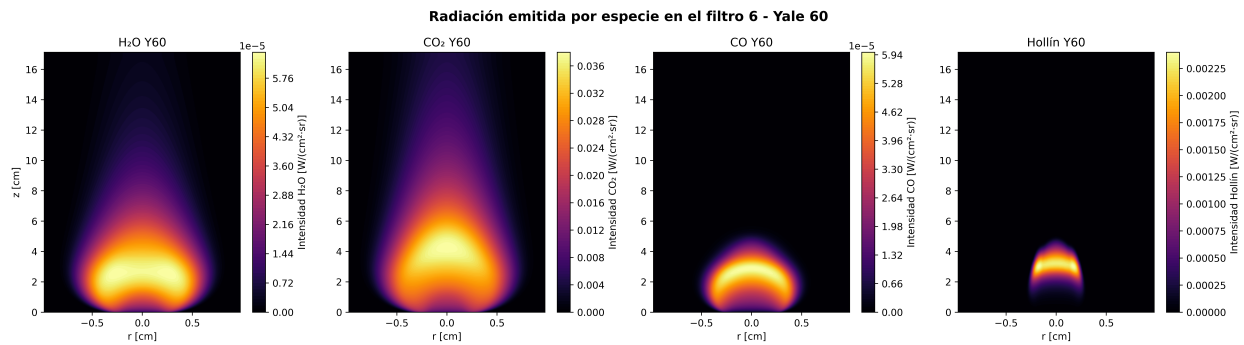


Figura 5.11: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 6 en Yale 60. Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

El CO₂ domina la emisión en F6, con una intensidad máxima de $I_{CO_2} \approx 0,038 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ localizada en la zona central de la llama ($r \approx 0 \text{ cm}$, $z \approx 3 - 5 \text{ cm}$). Esta intensidad es aproximadamente 4,4 veces superior a la observada en F5, reflejando la captura del pico Q-branch de la banda fundamental de CO₂. El H₂O muestra intensidades extremadamente bajas con máximos de $I_{H_2O} \approx 6 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, prácticamente tres órdenes de magnitud inferiores al CO₂. El CO presenta intensidades máximas de $I_{CO} \approx 6 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, comparables al H₂O pero también despreciables frente al CO₂. El hollín exhibe intensidades máximas de $I_{soot} \approx 0,0024 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en su región característica ($r \approx 0,25 \text{ cm}$, $z \approx 2 - 4 \text{ cm}$), representando menos del 10 % de la intensidad del CO₂ en esa misma ubicación.

Luego, la Figura 5.12 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

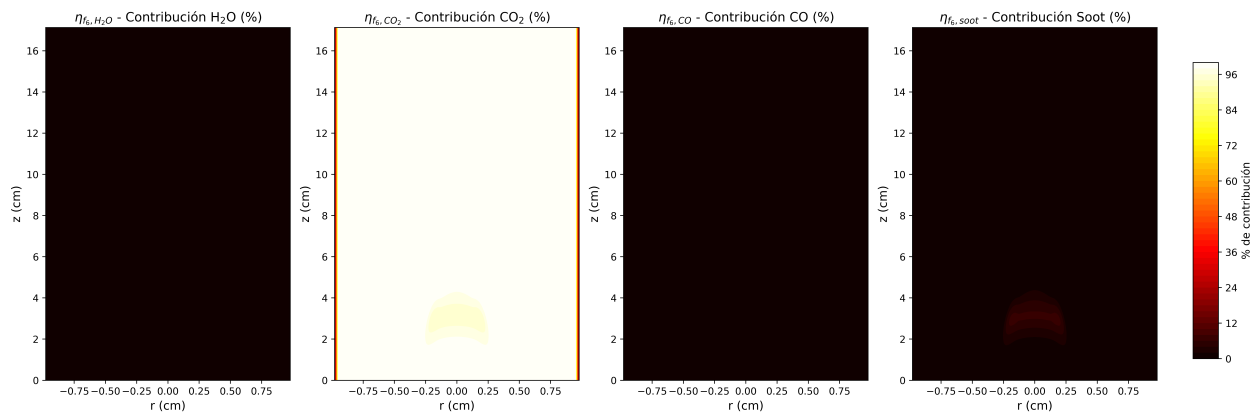


Figura 5.12: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 6 en Yale 60. Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

Los mapas de contribución porcentual confirman la selectividad de F6 hacia el CO_2 . En prácticamente todo el dominio computacional, el CO_2 contribuye con más del 96 % de la intensidad total, alcanzando valores cercanos al 100 % en el eje central y en la pluma superior ($z > 6$ cm). El H_2O presenta contribuciones prácticamente nulas ($<0,1$ %) en todo el dominio, confirmando que F6 se encuentra completamente fuera de las bandas de absorción significativas del agua. El CO muestra contribuciones igualmente despreciables ($<0,1$ %), indicando que la rama R de su banda fundamental en $4,67 \mu\text{m}$ no se solapa significativamente con el rango espectral de F6. El hollín es la única especie que presenta una contribución fraccional apreciable, alcanzando hasta 12 – 24 % únicamente en la zona muy localizada de máxima fracción volumétrica, donde el continuo de Rayleigh tiene suficiente intensidad para competir marginalmente con el CO_2 .

Espacialmente, la distribución del CO_2 en F6 es notablemente más extendida verticalmente que en F5, con emisión significativa hasta $z \approx 12 - 14$ cm. Esto refleja que el pico Q-branch mantiene alta intensidad incluso en regiones de la pluma donde la temperatura ha disminuido moderadamente. El hollín, en contraste, mantiene una distribución muy compacta y localizada, evidenciando que su contribución relativa disminuye rápidamente fuera de la zona de máxima formación. Las contribuciones marginales de H_2O y CO no muestran estructura espacial discernible debido a sus magnitudes extremadamente bajas.

En conclusión, dado que el filtro 6 ($4,23 - 4,37 \mu\text{m}$) está estratégicamente centrado en el pico Q-branch de la banda fundamental de CO_2 en $4,26 \mu\text{m}$, su alta selectividad lo hace el filtro óptimo para diagnóstico cuantitativo de CO_2 en llamas de difusión, minimizando las interferencias de otras especies.

5.4.3. Campos de contribución por especie: Filtro 7 - Yale 60

Los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 7 para la llama Yale 60 se muestran en la Figura 5.13.

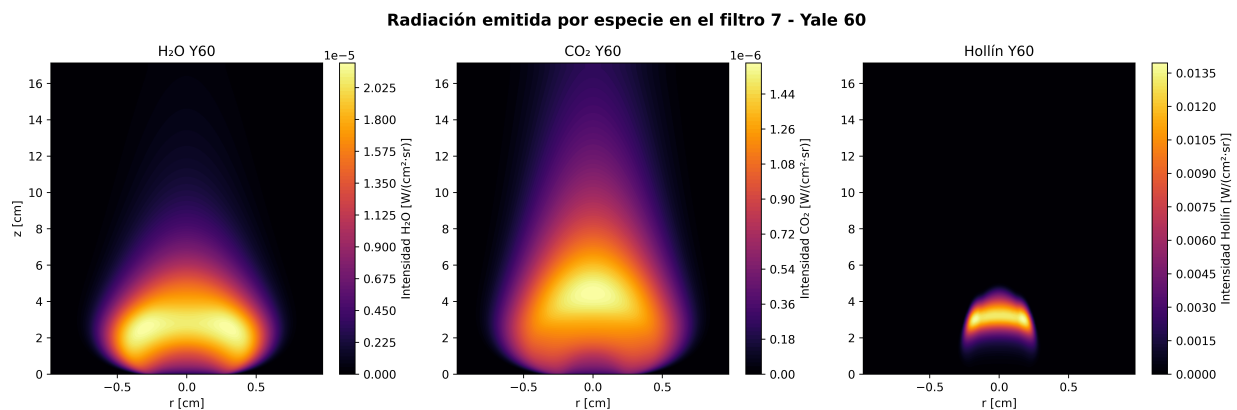


Figura 5.13: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 7 en Yale 60. Filas: H_2O , CO_2 , hollín.

En este filtro, el H_2O posee un máximo de intensidad radiativa de $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2,2 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, localizado en una región extendida de la zona de productos ($r \approx 0,2 - 0,5 \text{ cm}$, $z \approx 2 - 4 \text{ cm}$). El hollín presenta intensidades máximas de $I_{\text{soot}} \approx 0,0139 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en su zona característica ($r \approx 0,25 \text{ cm}$, $z \approx 2 - 4 \text{ cm}$), siendo varias órdenes de magnitud superior al H_2O . El CO_2 muestra intensidades muy bajas con máximos de $I_{\text{CO}_2} \approx 1,59 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, prácticamente despreciables comparadas con las otras especies. Esta jerarquía contrasta marcadamente con F5 y F6, donde el CO_2 dominaba completamente la emisión.

La Figura 5.14 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

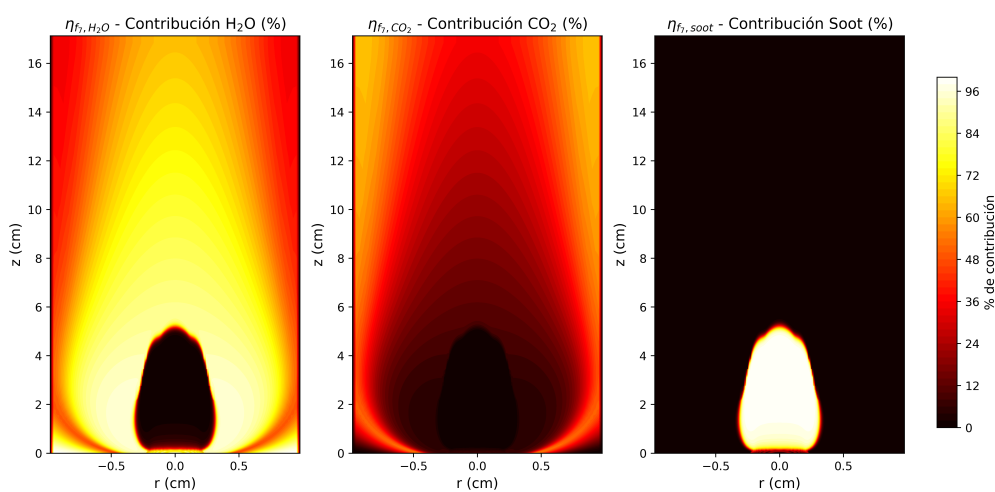


Figura 5.14: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 7 en Yale 60.
Filas: H_2O , CO_2 , hollín.

Los mapas de contribución porcentual revelan una estructura compleja con competencia entre especies. El hollín domina en su región de máxima fracción volumétrica, alcanzando contribuciones del 84 – 96 % en una zona compacta ($r \approx 0 - 0,25 \text{ cm}$, $z \approx 0 - 5 \text{ cm}$). Esta región de dominancia del hollín aparece como una zona brillante (blanca-amarilla) rodeada por regiones donde, en cambio, H_2O y CO_2 tienen mayor peso relativo. El H_2O presenta contribuciones significativas del 48 – 96 % en las regiones exteriores y superiores de la llama, especialmente en el eje central donde el hollín está ausente ($r \approx 0 \text{ cm}$, $z > 5 \text{ cm}$) y en las zonas laterales ($|r| > 0,25 \text{ cm}$). El CO_2 mantiene contribuciones moderadas del 24 – 60 % principalmente en la región superior de la pluma ($z > 8 \text{ cm}$) donde tanto el hollín como el H_2O han disminuido. En las regiones exteriores de la llama, las especies gaseosas (H_2O y CO_2) coexisten con contribuciones comparables del 36 – 60 %, generando una competencia espectral compleja.

Por otro lado, la morfología espacial en F7 refleja la estructura física de una llama de difusión de manera única. El hollín presenta la distribución más compacta y localizada, formando una región de alta emisión en forma de casquete o “cap” en la zona donde las condiciones

ricas y altas temperaturas favorecen su formación. El H_2O muestra una distribución mucho más extendida, ocupando principalmente el eje central y las regiones exteriores, reflejando su rol como producto de combustión distribuido ampliamente en la pluma. El CO_2 presenta intensidad apreciable únicamente en las regiones superiores donde la temperatura aún es suficientemente alta para generar emisión térmica en las bandas débiles presentes en este rango espectral. La ausencia total de CO se debe a que F7 no captura las bandas de esta especie.

Como conclusión, el filtro 7 ($3,59 - 4,12 \mu\text{m}$) presenta características únicas que lo diferencian de F5 y F6. A diferencia de estos últimos que son altamente selectivos al CO_2 , F7 muestra sensibilidad dual al hollín y al H_2O , con contribuciones espacialmente segregadas. Esta selectividad hace de F7 un filtro valioso para el diagnóstico de hollín en llamas de difusión, ya que la región de máxima concentración de hollín coincide con la región de máxima contribución fraccional. Sin embargo, la competencia entre especies en las zonas de transición introduce complejidad en el problema de inversión espectral, requiriendo consideración cuidadosa de la distribución espacial de todas las especies para una interpretación cuantitativa correcta. F7 es particularmente útil para detectar y cuantificar hollín en llamas con contenido bajo a moderado de f_v , donde la señal del continuo de Rayleigh puede competir efectivamente con las bandas gaseosas.

5.4.4. Campos de contribución por especie: Filtro 8 - Yale 60

Finalizando con los campos de radiancia emitida por cada especie para la llama Yale 60, los resultados del filtro 8 se muestran en la Figura 5.15.

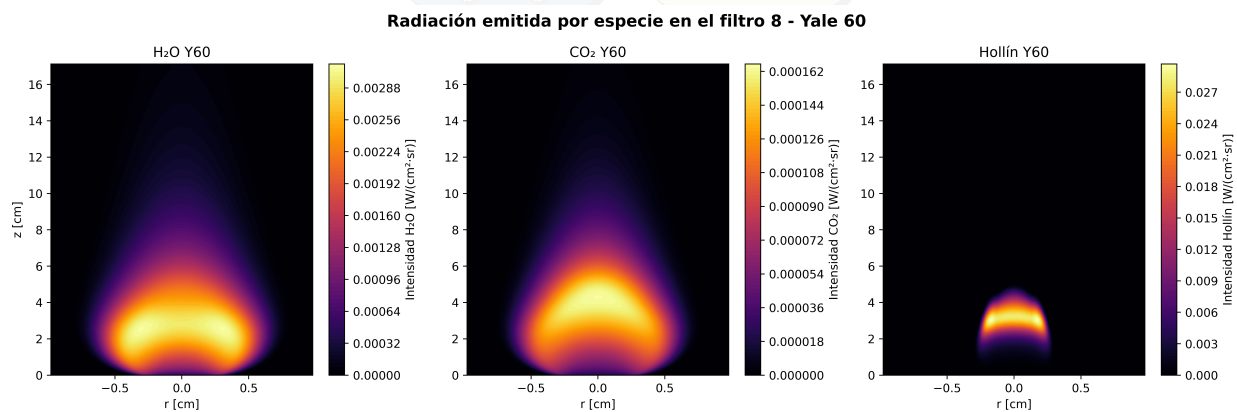


Figura 5.15: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 8 en Yale 60. Filas: H_2O , CO_2 , hollín.

Para este filtro, el hollín exhibe la mayor intensidad radiativa con un máximo de $I_{\text{soot}} \approx 0,029 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ localizado en su zona característica ($r \approx 0,25 \text{ cm}$, $z \approx 2 - 4 \text{ cm}$). Esta intensidad es el doble de la observada en F7, reflejando la dependencia del continuo de Rayleigh con la frecuencia. El H_2O presenta intensidades máximas de $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,0030 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$

en una región extendida de la zona de productos ($r \approx 0,2 - 0,5$ cm, $z \approx 1 - 3$ cm), siendo aproximadamente 9 veces inferior al hollín pero significativamente superior a su contribución en F7. Este incremento sustancial refleja que F8 captura el borde de alta frecuencia de las bandas fundamentales de H_2O centradas en la región $2,5 - 3,2 \mu m$. El CO_2 muestra intensidades muy bajas con máximos de $I_{CO_2} \approx 1,64 \times 10^{-4}$ W/(cm²·sr), siendo prácticamente dos órdenes de magnitud inferior al H_2O y despreciable comparado con el hollín.

A continuación, la Figura 5.16 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

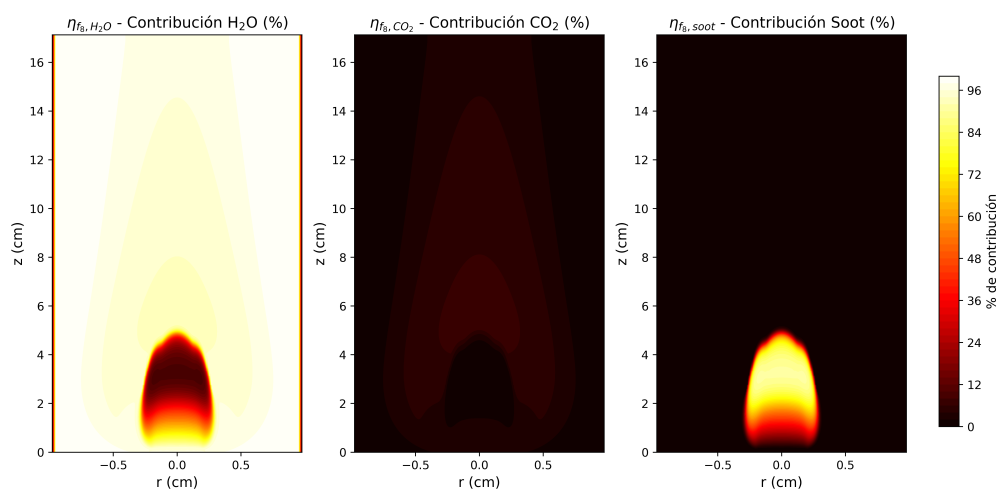


Figura 5.16: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 8 en Yale 60.
Filas: H_2O , CO_2 , hollín.

Los mapas de contribución porcentual muestran una competencia entre hollín y H_2O con clara segregación espacial. El hollín domina en su región de máxima formación, alcanzando contribuciones del 84 – 96 % en una zona compacta ($r \approx 0,1 - 0,3$ cm, $z \approx 2 - 5$ cm). Esta región aparece como una zona brillante con forma de casquete invertido, reflejando la alta emisividad del continuo de partículas. En cambio, el H_2O presenta contribuciones dominantes del 84 – 96 % en prácticamente todo el resto del dominio, especialmente en el eje central ($r \approx 0$ cm) donde el hollín está ausente, en las regiones exteriores ($|r| > 0,5$ cm), y en la pluma superior ($z > 6$ cm) donde el hollín ha sido oxidado. La transición entre la región dominada por hollín y la dominada por H_2O es relativamente abrupta, con una zona de transición estrecha donde ambas especies contribuyen con 24 – 60 %. El CO_2 mantiene contribuciones marginales (<12 %) en todo el dominio, siendo prácticamente despreciable excepto en pequeñas regiones de la pluma superior donde tanto el hollín como el H_2O han disminuido.

Por otra parte, la morfología espacial en F8 muestra la segregación física más clara entre hollín y gases de todas las bandas estudiadas. El hollín presenta una distribución compacta en forma de “cap” o casquete, coincidente con la zona de máxima fracción volumétrica donde las condiciones ricas y temperaturas elevadas favorecen su formación. Esta región de alta

emisión de hollín está completamente rodeada por una región donde H_2O domina, creando una estructura de “núcleo de hollín envuelto en H_2O ”. El H_2O muestra la distribución espacial más extendida de todas las especies, ocupando prácticamente todo el volumen de la llama excepto la zona compacta de máximo hollín. Esta distribución amplia refleja su rol dual como producto de combustión y como especie con bandas de absorción intensas en este rango espectral. El CO_2 , como se indicó anteriormente, presenta emisión apreciable únicamente en regiones muy localizadas de la pluma superior.

Así, el filtro 8 ($2,89 - 3,47 \mu m$) presenta características únicas que lo convierten en el más complejo para interpretación cuantitativa pero también el más rico en información sobre la competencia hollín-gases. A diferencia de F6 (altamente selectivo a CO_2) y F5 (moderadamente selectivo a CO_2/CO), F8 muestra sensibilidad dual con segregación espacial: es altamente selectivo al hollín en la zona de formación y altamente selectivo al H_2O en el resto del dominio. Esta dicotomía espacial hace de F8 un filtro valioso para diagnóstico simultáneo de hollín y H_2O , aprovechando que ambas especies ocupan regiones espaciales complementarias. Sin embargo, la presencia de zonas de transición donde ambas especies contribuyen significativamente introduce complejidad en el problema de inversión espectral, requiriendo resolución espacial adecuada para separar las contribuciones. La combinación de F8 con F7 (que también muestra sensibilidad hollín- H_2O pero con diferente balance relativo) permitiría mejorar la robustez del diagnóstico al proporcionar información complementaria sobre la distribución de estas especies. Finalmente, el incremento de intensidad del hollín respecto a F7 confirma la dependencia espectral esperada del continuo de Rayleigh, mientras que el incremento mucho mayor en la intensidad de H_2O confirma la captura de sus bandas fundamentales intensas.

5.4.5. Campos de contribución por especie: Filtro 5 - Yale 80

La Figura 5.17 muestra los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 5 para la llama Yale 80.

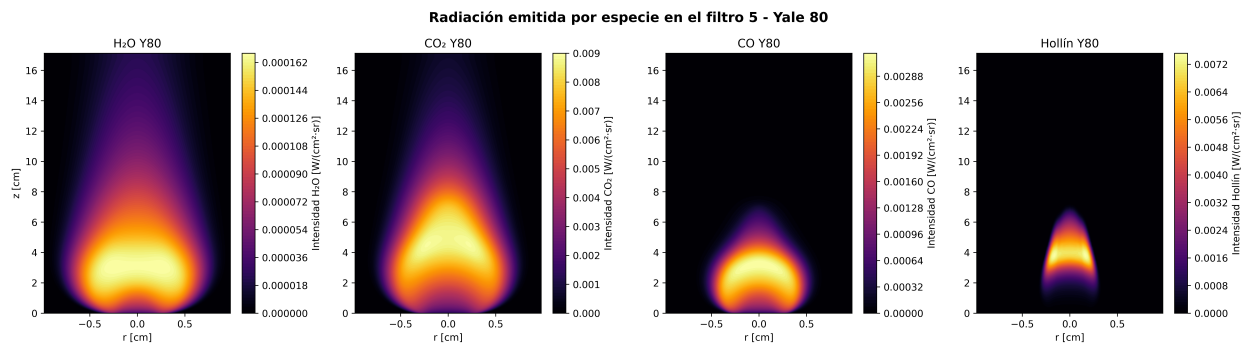


Figura 5.17: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 5 en Yale 80. Filas: H_2O , CO_2 , CO , hollín.

La llama Yale 80 presenta incrementos en las intensidades de todas las especies comparado con Yale 60. El CO_2 mantiene su posición dominante con máximos de $I_{\text{CO}_2} \approx 0,009 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, ligeramente superior a los $0,0086 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ de Yale 60. El hollín muestra un incremento más pronunciado, alcanzando $I_{\text{soot}} \approx 0,0075 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ versus $0,00407 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en Yale 60, reflejando la mayor fracción volumétrica observada en los campos de especies. El CO presenta máximos de $I_{\text{CO}} \approx 0,00316 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, un poco mayor a los $0,0028 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ de Yale 60. El H_2O mantiene intensidades comparables con $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1,67 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, del mismo orden que Yale 60.

Para profundizar, la Figura 5.18 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

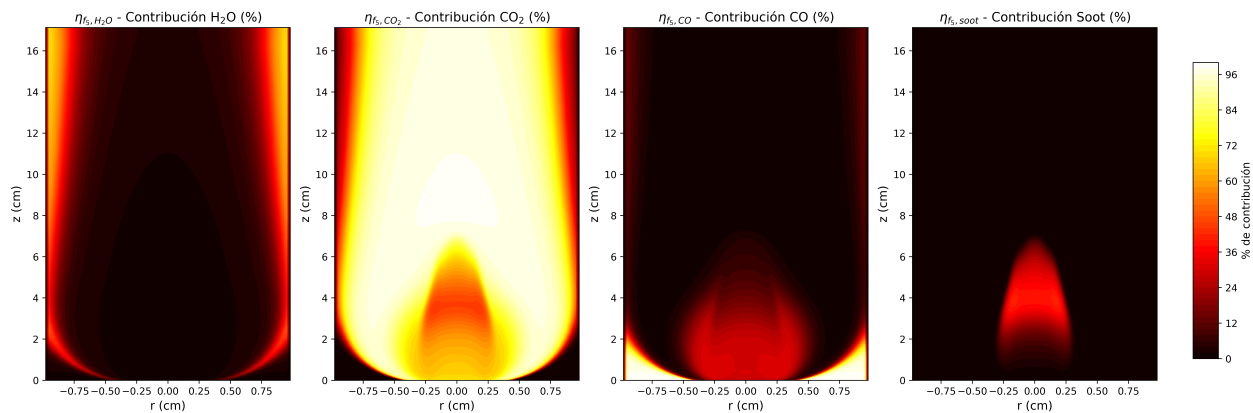


Figura 5.18: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 5 en Yale 80.
 Filas: H_2O , CO_2 , CO, hollín.

En los mapas de contribución porcentual se observa que Yale 80 mantiene la misma jerarquía cualitativa observada en Yale 60. El CO_2 continúa dominando la emisión con contribuciones del 84 – 96 % en la mayor parte del dominio, especialmente en el eje central y en la pluma superior, el H_2O mantiene contribuciones uniformes del 36 – 60 % en las regiones exteriores y el CO conserva su distribución en la región intermedia de la zona de reacción con contribuciones del 12 – 36 %. En la región de máximo hollín tampoco se observan diferencias notables, pues esta especie mantiene contribuciones significativas del 24 – 48 %, similar a Yale 60.

Espacialmente, Yale 80 presenta una región emisora verticalmente más extendida que Yale 60. La emisión apreciable de CO_2 se extiende hasta $z \approx 14 - 16 \text{ cm}$, comparado con $z \approx 12 \text{ cm}$ en Yale 60, consistente con la llama más larga observada en los campos de especies. La región de máxima emisión de hollín también se desplaza verticalmente, localizándose ahora en $z \approx 4 - 6 \text{ cm}$ versus $z \approx 3 - 4 \text{ cm}$ en Yale 60. Esta extensión vertical refleja el mayor flujo de combustible y la estructura de llama más elongada de la configuración Yale 80.

Algo importante a notar es que, a pesar del incremento absoluto en la emisión de hollín, la estructura de contribuciones fraccionales se mantiene sorprendentemente similar a Yale

60. El CO_2 conserva su dominancia abrumadora en F5, y el hollín permanece confinado a su región característica. Esto indica que, aunque Yale 80 tiene mayor contenido de hollín, el incremento en la emisión de CO_2 (producto de mayor combustión) compensa este aumento, manteniendo el balance relativo entre especies relativamente estable en este filtro. De este modo, la selectividad de F5 hacia CO_2 se preserva en Yale 80, independientemente del contenido de hollín.

5.4.6. Campos de contribución por especie: Filtro 6 - Yale 80

A continuación, la Figura 5.19 muestra los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 6 para la llama Yale 80.

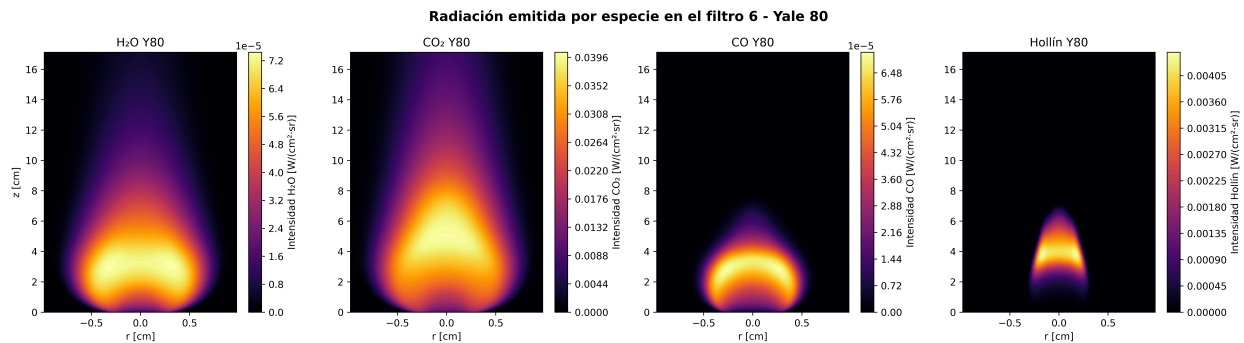


Figura 5.19: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 6 en Yale 80. Filas: H_2O , CO_2 , CO, hollín.

Al igual que en el filtro anterior, Yale 80 presenta incrementos en las intensidades de las especies radiantes respecto a Yale 60. El CO_2 alcanza máximos de $I_{\text{CO}_2} \approx 0,04 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, ligeramente superiores a los $0,038 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ de Yale 60, manteniendo su posición como especie absolutamente dominante. El hollín muestra un incremento significativo alcanzando $I_{\text{soot}} \approx 0,0044 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ versus $0,0024 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en Yale 60, casi duplicando su intensidad en la región de máxima formación. El H_2O y el CO mantienen intensidades bajas del orden de $7 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, un poco mayores a Yale 60, confirmando que F6 permanece fuera de sus bandas de absorción principales.

Por otro lado, Yale 80 mantiene características radiales muy similares a Yale 60. El CO_2 continúa concentrándose en el eje central con una distribución amplia, mientras que el hollín permanece confinado a una región anular estrecha alrededor de $r \approx 0,4 - 0,5 \text{ cm}$. La principal diferencia es una ligera expansión radial de la zona de contribución apreciable del hollín, consistente con la estructura de llama más ancha observada en los campos de especies.

También, consistentemente con F5, Yale 80 presenta una región emisora más extendida verticalmente. La emisión significativa de CO_2 se extiende hasta $z \approx 16 \text{ cm}$, comparado con $z \approx 14 \text{ cm}$ en Yale 60, reflejando la llama más larga. La región de máxima emisión se desplaza

verticalmente de $z \approx 4 - 5$ cm en Yale 60 a $z \approx 5 - 7$ cm en Yale 80. Esta extensión vertical es más pronunciada que en F5, sugiriendo que el pico Q-branch de CO_2 capturado por F6 mantiene alta intensidad en regiones más extendidas de la pluma.

Ahora, la Figura 5.20 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

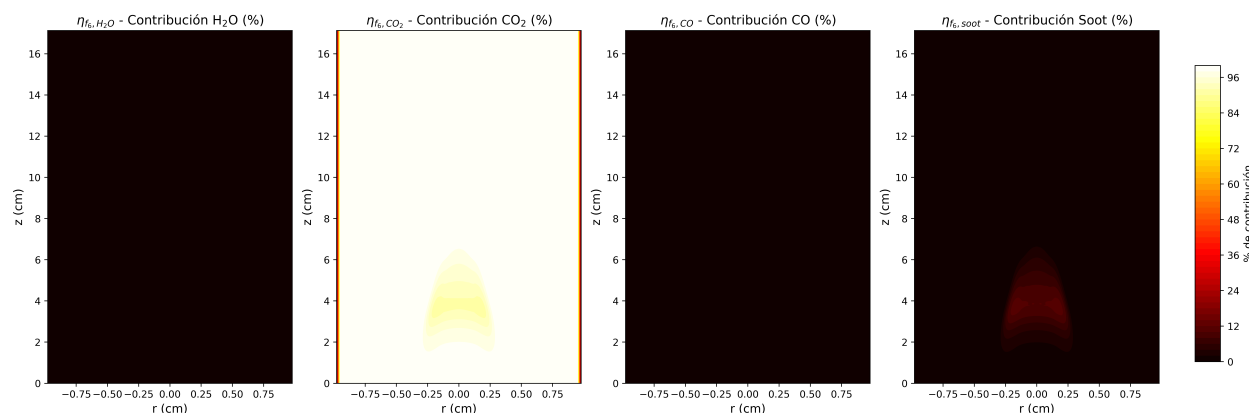


Figura 5.20: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 6 en Yale 60.
Filas: H_2O , CO_2 , CO , hollín.

Los mapas de contribución porcentual muestran que Yale 80 mantiene la selectividad excepcional de F6 hacia CO_2 observada en Yale 60. El CO_2 continúa contribuyendo con $>96\%$ en prácticamente todo el dominio, alcanzando valores cercanos al 100% en el eje central y en la pluma superior. Esta preservación de la dominancia ocurre a pesar del incremento sustancial en la fracción volumétrica de hollín, confirmando la robustez de F6 como filtro selectivo a CO_2 . El H_2O y el CO mantienen contribuciones despreciables ($<0.1\%$) en todo el dominio, sin cambios apreciables respecto a Yale 60.

Como conclusión, Yale 80 confirma la robustez del filtro como selectivo a CO_2 , incluso bajo condiciones de mayor contenido de hollín. Esto pues, mientras que en Yale 60 el CO_2 era aproximadamente 16 veces más intenso que el hollín en la zona de máximo de este último y en Yale 80 esta relación se reduce a aproximadamente 10 veces, el CO_2 mantiene su dominancia absoluta, con contribución fraccional por encima del 64% incluso en la pequeña región donde el hollín alcanza su máximo. Lo anterior confirma la utilidad de F6 para diagnóstico cuantitativo de CO_2 en llamas con contenido de hollín variable, siendo relativamente insensible a la presencia de partículas en comparación con los filtros que vienen a continuación.

5.4.7. Campos de contribución por especie: Filtro 7 - Yale 80

En la Figura 5.21 se observan los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 7 para la llama Yale 80.

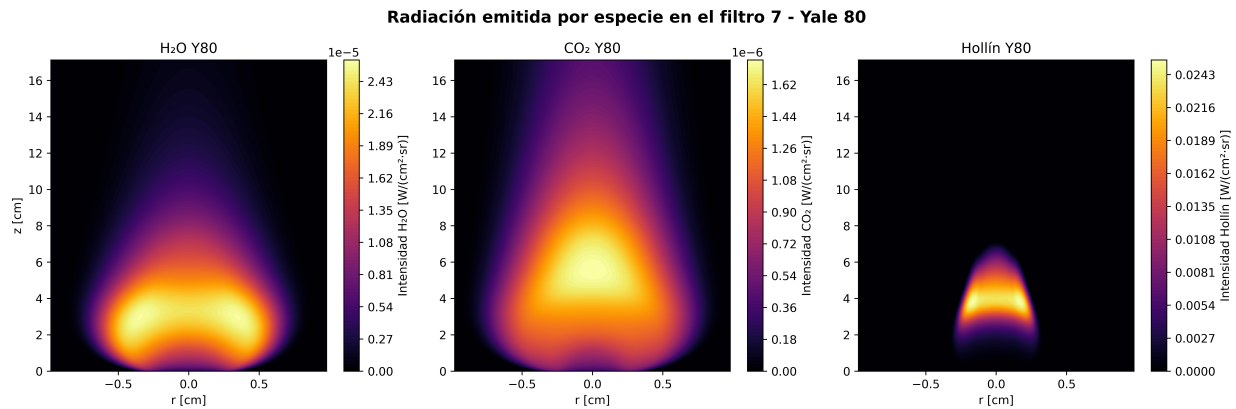


Figura 5.21: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 7 en Yale 80. Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

Como en los otros filtros, existen incrementos sustanciales en la intensidad del hollín en el filtro 7 de Yale 80 comparado con Yale 60. El hollín alcanza máximos de $I_{\text{soot}} \approx 0,0253$ W/(cm²·sr) versus 0,0139 W/(cm²·sr) en Yale 60, representando un incremento de casi el doble, consistente con el aumento en fracción volumétrica. El H₂O muestra intensidades máximas de $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2,58 \times 10^{-5}$ W/(cm²·sr), ligeramente superiores a los $2,2 \times 10^{-5}$ W/(cm²·sr) de Yale 60, reflejando mayor producción de vapor de agua. El CO₂ mantiene intensidades muy bajas con máximos de $I_{\text{CO}_2} \approx 1,76 \times 10^{-6}$ W/(cm²·sr), no muy superiores a Yale 60, confirmando la débil emisión de esta especie en este rango espectral.

La diferencia más notable en F7 entre Yale 60 y Yale 80 es la expansión significativa de la región donde el hollín domina la emisión. En Yale 60, la zona de contribución $>84\%$ del hollín ocupaba una región compacta con extensión vertical de aproximadamente 2 cm ($z \approx 2,5 - 4,5$ cm). En Yale 80, esta región se extiende verticalmente hasta aproximadamente 4 cm ($z \approx 3 - 7$ cm), duplicando su alcance vertical. Adicionalmente, la región se extiende radialmente ocupando un volumen considerablemente mayor. Esta expansión refleja la zona de formación de hollín espacialmente más extendida en la llama Yale 80, consistente con los campos de fracción volumétrica.

Luego, la Figura 5.22 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

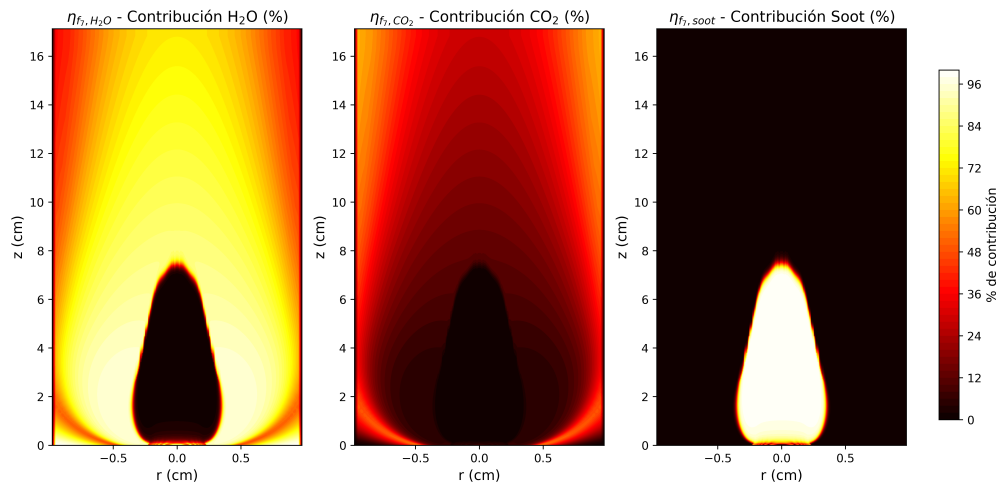


Figura 5.22: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 7 en Yale 80.
Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

Los mapas de contribución porcentual revelan que Yale 80 mantiene la estructura espacial de competencia entre especies observada en Yale 60, pero con modificaciones importantes en las magnitudes relativas. El hollín continúa dominando en su región característica, alcanzando contribuciones del 84 – 96 % en la zona central de formación. Sin embargo, esta región de dominancia del hollín es notablemente más extendida vertical y radialmente que en Yale 60, donde se limitaba a $z \approx 2,5 - 4,5$ cm. El H₂O mantiene contribuciones significativas del 60 – 96 % en las regiones exteriores y superiores, similar a Yale 60. El CO₂ conserva contribuciones del 48 – 60 % en la pluma superior externa.

Las zonas de transición entre la región dominada por hollín y las regiones dominadas por H₂O/CO₂ también muestran cambios apreciables. En Yale 60, estas zonas de transición eran relativamente estrechas con contribuciones del 24 – 48 % de cada especie. En Yale 80, las zonas de transición son espacialmente más extensas, particularmente en la interfaz superior de la región de hollín ($z \approx 6 - 8$ cm), donde la competencia entre hollín y H₂O se extiende sobre un rango vertical mayor, relacionado con la extensión vertical de la región dominada por el hollín.

Se debe destacar que, al igual que en los filtros anteriores, Yale 80 presenta una región emisora más extendida verticalmente. La emisión apreciable se extiende hasta $z \approx 16 - 17$ cm, comparado con $z \approx 12 - 13$ cm en Yale 60. La región de máxima emisión de hollín también se desplaza verticalmente de $z \approx 3$ cm en Yale 60 a $z \approx 4 - 5$ cm en Yale 80, reflejando la estructura de llama más elongada y el desplazamiento vertical de la zona de máxima formación de hollín observado en los campos de especies.

Concluyendo, F7 confirma su utilidad como filtro sensible a hollín en ambas configuraciones, pero con sensibilidades espaciales diferentes. En Yale 60, F7 es selectivo a hollín en una región compacta y bien definida, facilitando la localización precisa de la zona de máxima concentración. En Yale 80, F7 captura una región de hollín más extendida, proporcionando

información sobre una porción mayor de la distribución espacial de partículas. Sin embargo, la mayor extensión de las zonas de transición en Yale 80 significa que se requiere una resolución espacial adecuada para separar las contribuciones de hollín y H₂O en estas regiones intermedias. La estructura de contribuciones fraccionales en F7 confirma que el incremento en fracción volumétrica de hollín en Yale 80 se manifiesta tanto en aumento de intensidad absoluta como en expansión espacial de la región donde el hollín es el emisor dominante.

5.4.8. Campos de contribución por especie: Filtro 8 - Yale 80

Finalmente, en la Figura 5.23 se observan los campos de radiancia emitida por cada especie en el filtro 8 para la llama Yale 80.

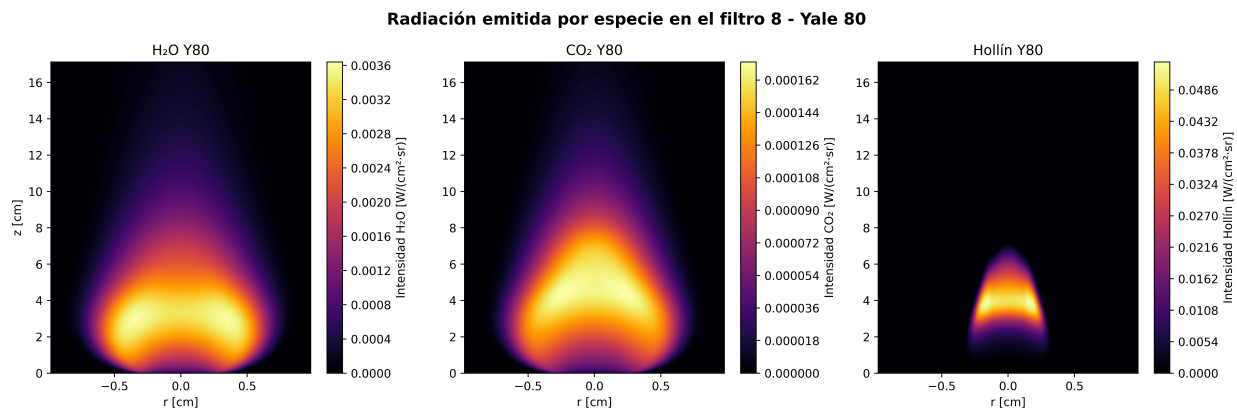


Figura 5.23: Campos de contribución parcial por especie para el Filtro 8 en Yale 80. Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

La Yale 80 presenta los incrementos más destacables de todos los filtros estudiados. El hollín alcanza máximos de $I_{\text{soot}} \approx 0,0534 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ versus $0,029 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en Yale 60, representando un incremento de casi el doble, consistente con el aumento observado en F7. Esta intensidad de hollín es significativamente superior a la de cualquier otra especie en F8, consolidando su rol como emisor dominante en este rango espectral para Yale 80. El H₂O muestra intensidades máximas de $I_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,0036 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ comparado con $0,0030 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en Yale 60, representando un incremento moderado. Este incremento de H₂O es proporcionalmente menor que el del hollín, modificando el balance relativo entre ambas especies. El CO₂ mantiene intensidades bajas con máximos de $I_{\text{CO}_2} \approx 1,72 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, prácticamente idénticas a Yale 60, confirmando su rol marginal en este filtro.

Ahora, la Figura 5.24 presenta la contribución fraccional porcentual de cada especie a la intensidad total del filtro.

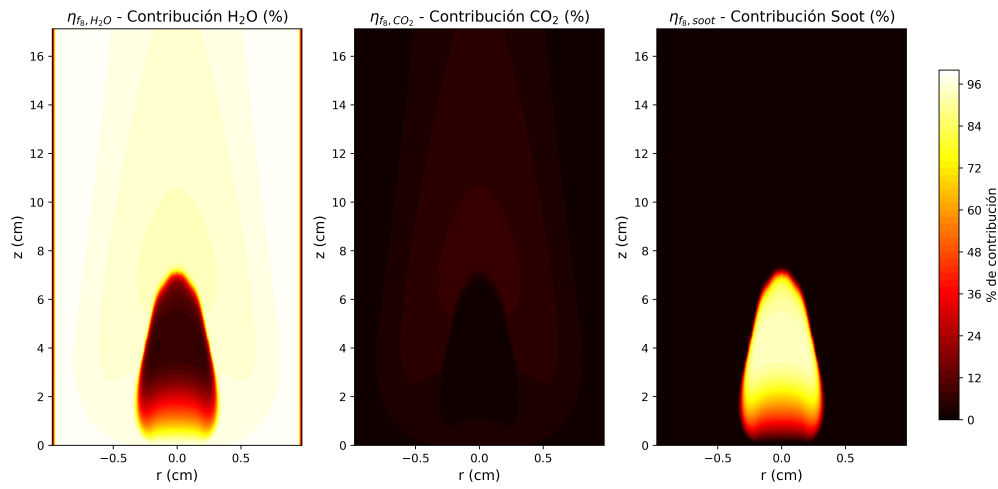


Figura 5.24: Campos de contribución porcentual por especie para el Filtro 8 en Yale 80.
Filas: H₂O, CO₂, CO, hollín.

Los mapas porcentuales revelan cambios significativos en la competencia espacial entre hollín y H₂O. La región donde el hollín domina con contribuciones del 84 – 96 % se expande sustancialmente en Yale 80, ocupando una zona más extensa tanto vertical como radialmente. Esta expansión es más pronunciada que la observada en F7, indicando que el incremento en contenido de hollín afecta más significativamente al balance radiativo en F8. El H₂O mantiene su dominancia (84 – 96 %) en las regiones exteriores, eje central superior y pluma, pero estas regiones están proporcionalmente reducidas debido a la mayor extensión de la zona dominada por hollín. Las zonas de transición donde ambas especies compiten (36 – 60 % cada una) se extienden espacialmente, particularmente en la interfaz superior y lateral de la región de hollín, ocupando ahora $z \approx 6 - 8$ cm con mayor extensión radial. El CO₂ mantiene contribuciones marginales (<12 %) limitadas a pequeñas regiones de la pluma superior, sin cambios apreciables respecto a Yale 60.

De este modo, el aspecto más relevante de F8 en Yale 80 es el cambio sustancial en el balance relativo entre hollín y H₂O. En Yale 60, ambas especies mostraban una dicotomía espacial relativamente equilibrada: el hollín dominaba en una región compacta central mientras que el H₂O dominaba en el resto del dominio. En Yale 80, esta dicotomía se desplaza claramente a favor del hollín, con la región de dominancia del hollín expandiéndose significativamente y ocupando una fracción mayor del volumen total de la llama. La relación de intensidades absolutas hollín/H₂O aumenta de aproximadamente 9:1 en Yale 60 a aproximadamente 13:1 en Yale 80, reflejando el incremento desproporcionado del continuo de Rayleigh. Esta modificación del balance tiene implicaciones importantes para la inversión espectral, ya que F8 se vuelve más sensible a hollín y menos a H₂O en Yale 80 comparado con Yale 60.

También se debe destacar que, espacialmente, Yale 80 presenta una región emisora más extendida verticalmente, con emisión apreciable hasta $z \approx 17$ cm comparado con $z \approx 14 - 15$ cm en Yale 60. El máximo de emisión de hollín se desplaza verticalmente de $z \approx 3 - 4$

cm en Yale 60 a $z \approx 4 - 5$ cm en Yale 80, consistente con los otros filtros. La distribución del hollín en Yale 80 muestra una estructura en forma de “casquete invertido” más elongada verticalmente, reflejando la zona de formación extendida. El H_2O mantiene su distribución amplia pero con menor predominancia espacial debido a la expansión de la región de hollín.

En conclusión, estos resultados confirman el rol del filtro 8 como filtro de sensibilidad dual hollín- H_2O , pero con diferentes características en cada configuración. En Yale 60, F8 proporcionaba información relativamente balanceada sobre ambas especies con regiones espaciales complementarias de dominancia. En Yale 80, F8 se vuelve más fuertemente dominado por hollín, con una región de sensibilidad a esta especie significativamente expandida. Esta modificación sugiere que la estrategia de inversión espectral debe adaptarse según el contenido de hollín: en llamas con bajo-moderado contenido, F8 podría contribuir al diagnóstico de ambas especies, mientras que en llamas con mayor contenido (Yale 80), F8 se vuelve primordialmente un filtro de diagnóstico de hollín con información secundaria sobre H_2O en las regiones periféricas. La combinación de F7 y F8, que muestran incrementos similares en intensidad de hollín, pero con diferentes balances relativos respecto a H_2O , proporciona información complementaria robusta para la caracterización de la distribución espacial de partículas en ambas configuraciones.

5.4.9. Contribuciones espectrales en puntos clave de la llama

A continuación, para complementar la determinación del balance gas/hollín, se evaluaron las contribuciones fraccionales de cada especie en cuatro puntos clave: Máximo de I_{CO_2} , máximo de I_{H_2O} , máximo de I_{CO} y máximo de I_{Soot} .

Los puntos evaluados para la Yale 60 se muestran en la Figura 5.25.

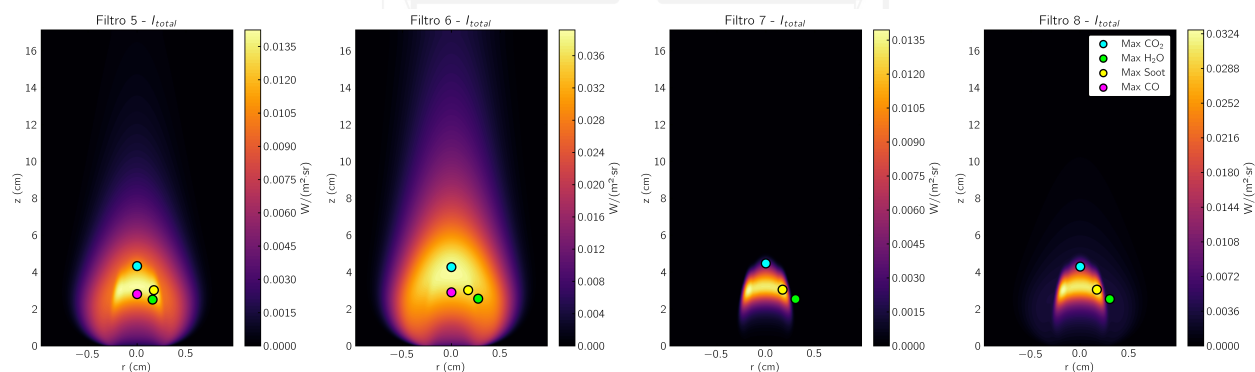


Figura 5.25: Puntos seleccionados para evaluar la contribución fraccional en la Yale 60

Luego, la Figura 5.26 muestra los resultados mediante gráficos de barras apiladas. Posteriormente, se llevaron los gráficos a un análisis cuantitativo, resumido en la Cuadro 5.1.

Contribuciones espectrales en puntos clave de la llama (Y60)

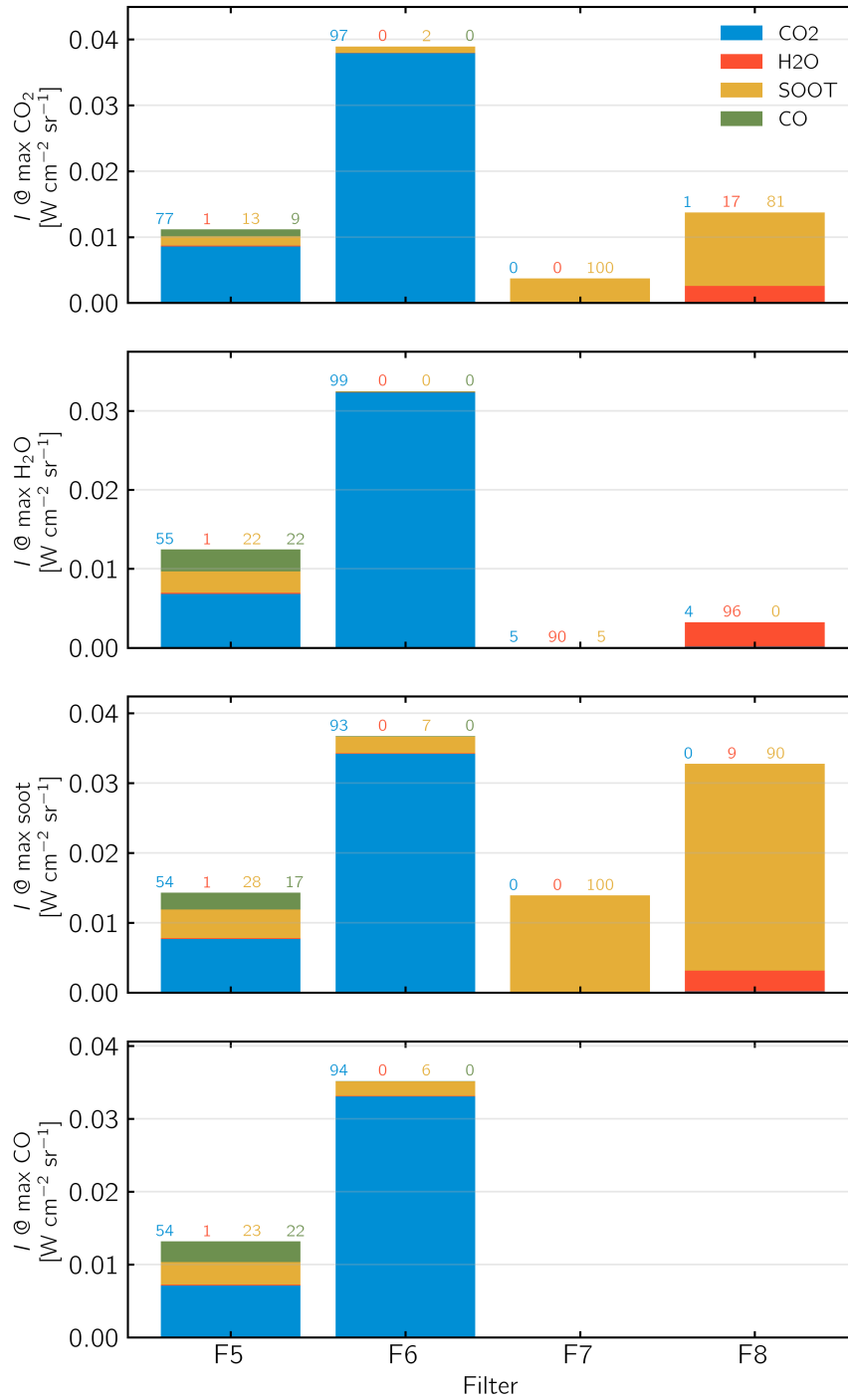


Figura 5.26: Contribución fraccional por especie en puntos representativos Yale 60. Cada grupo de 4 barras corresponde a un filtro (F5-F8). Colores: azul=CO₂, rojo=H₂O, verde=CO, amarillo=hollín.

Tabla 5.1: Yale 60: Contribuciones porcentuales de cada especie en los 4 filtros evaluadas en puntos representativos.

Filtro	Máx CO ₂	Máx H ₂ O	Máx Hollín	Máx CO
<i>Yale 60 - Contribución de CO₂ (%)</i>				
F5	77	55	54	54
F6	97	99	93	94
F7	0	5	0	0
F8	0	4	0	0
<i>Yale 60 - Contribución de H₂O (%)</i>				
F5	1	1	1	1
F6	0	0	0	0
F7	0	90	0	0
F8	17	96	9	0
<i>Yale 60 - Contribución de hollín (%)</i>				
F5	13	22	28	23
F6	2	0	7	6
F7	100	5	100	0
F8	81	0	90	0
<i>Yale 60 - Contribución de CO (%)</i>				
F5	9	22	17	22
F6	0	0	0	0
F7	0	0	0	0
F8	0	0	0	0

Por otro lado, los puntos evaluados para la Yale 80 se muestran en la Figura 5.27.

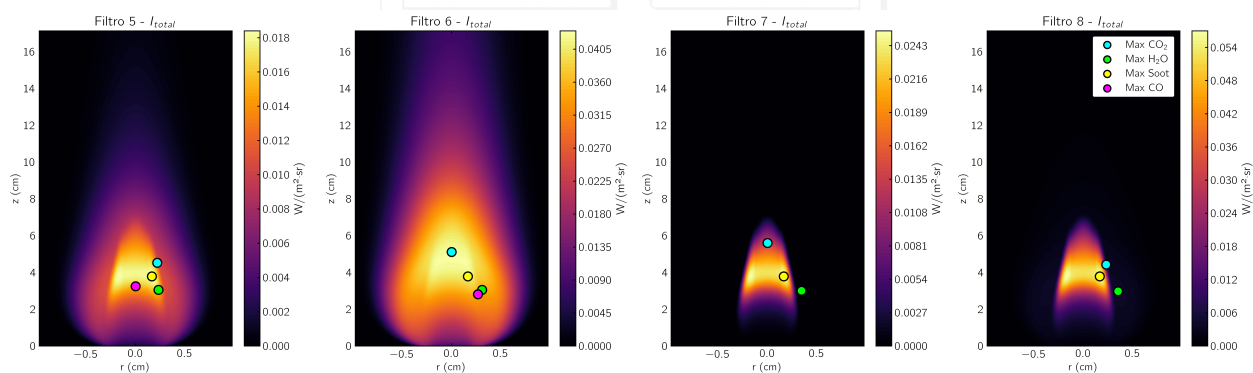


Figura 5.27: Puntos seleccionados para evaluar la contribución fraccional en la Yale 80

Entonces la Figura 5.28 muestra los resultados mediante gráficos de barras y el Cuadro 5.2 resume los valores para el análisis cuantitativo.

Contribuciones espectrales en puntos clave de la llama (Y80)

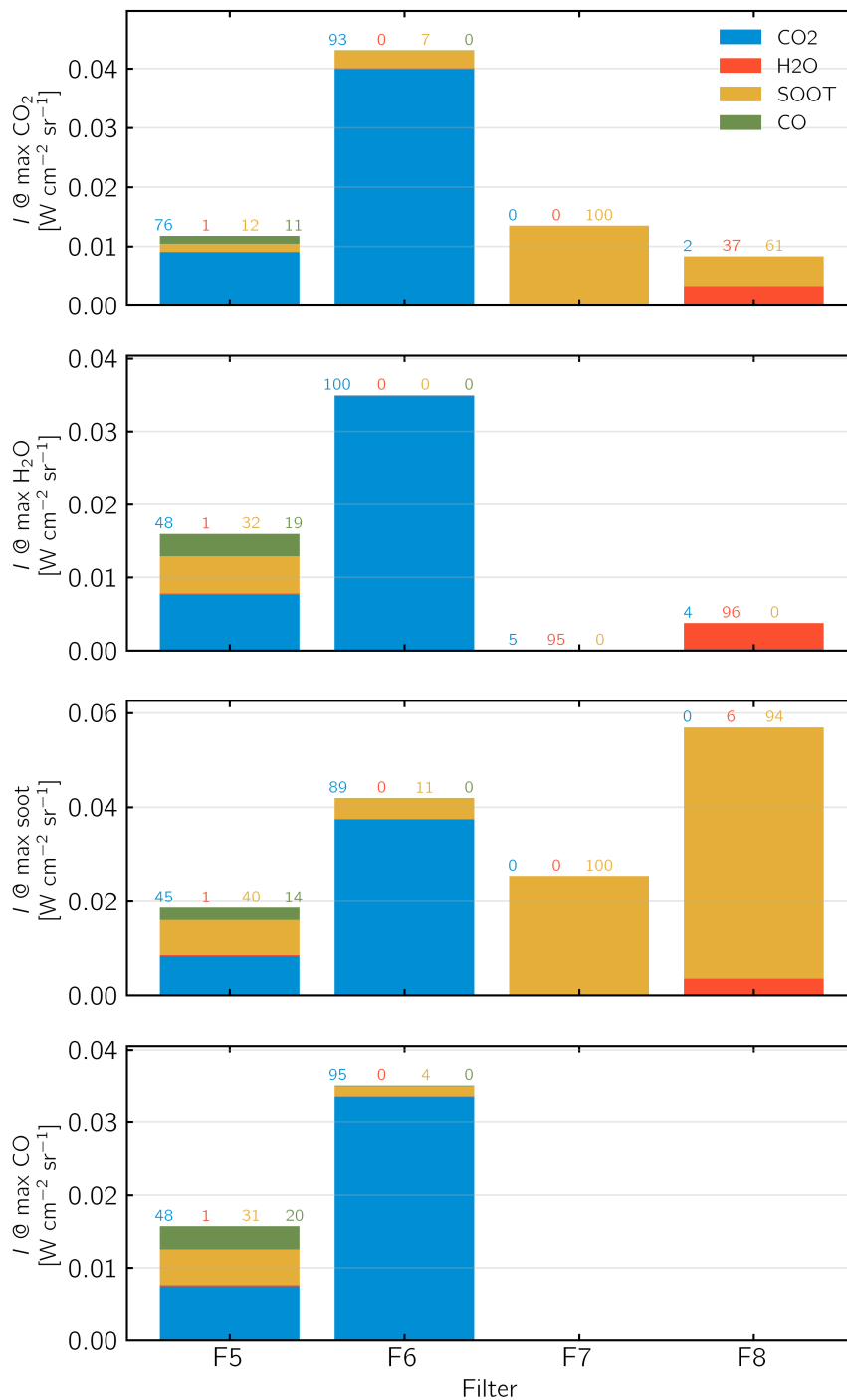


Figura 5.28: Contribución fraccional por especie en puntos representativos Yale 80. Cada grupo de 4 barras corresponde a un filtro (F5-F8). Colores: azul=CO₂, rojo=H₂O, verde=CO, amarillo=hollín.

Tabla 5.2: Yale 80: Contribuciones porcentuales de cada especie en los 4 filtros evaluadas en puntos representativos de la llama.

Filtro	Máx CO ₂	Máx H ₂ O	Máx Hollín	Máx CO
<i>Yale 80 - Contribución de CO₂ (%)</i>				
F5	76	48	45	48
F6	93	100	89	95
F7	0	5	0	0
F8	2	4	0	0
<i>Yale 80 - Contribución de H₂O (%)</i>				
F5	1	1	1	1
F6	0	0	0	0
F7	0	95	0	0
F8	37	96	6	0
<i>Yale 80 - Contribución de hollín (%)</i>				
F5	12	32	40	31
F6	7	0	22	4
F7	100	0	100	0
F8	61	0	94	0
<i>Yale 80 - Contribución de CO (%)</i>				
F5	11	19	14	20
F6	0	0	0	0
F7	0	0	0	0
F8	0	0	0	0

Se puede observar que F6 mantiene la mayor selectividad a CO₂ en ambas llamas (89-100 % en todos los puntos), confirmándose como el filtro óptimo para diagnóstico de esta especie. F7, en cambio, muestra selectividad complementaria: altamente selectivo a H₂O en el punto de máximo H₂O (90-95 %), y altamente selectivo a hollín en puntos de máximo hollín y CO₂ (90-100 %). F8 presenta sensibilidad dual con H₂O dominante (96 %) en puntos altos en agua y hollín dominante (90-94 %) en punto de máximo hollín y CO₂. F5 muestra la menor selectividad, con contribuciones mixtas de CO₂, CO y hollín en todos los puntos.

A continuación, comparando Yale 60 respecto a Yale 80, se tiene que el incremento en fracción volumétrica de hollín se manifiesta principalmente F5, pues en este la contribución de hollín en punto de máximo hollín aumenta de 28 % a 40 %, y en punto de máximo H₂O de 22 % a 32 %. En F6, la contribución de hollín aumenta bastante poco, de 7 % a 11 % en punto de máximo hollín, y en CO₂ de 2 % a 7 %. En F7 y F8, la estructura de contribuciones permanece prácticamente inalterada, con F7 manteniendo 100 % de hollín en su punto máximo en ambas llamas, y F8 mostrando solo un aumento de 90 % a 94 % en el punto de máximo hollín y una reducción de 81 % a 61 % en el punto de máximo CO₂.

Una conclusión importante que se puede extraer de las tablas es que no existen filtros completamente puros. Incluso F6, el más selectivo, presenta 2-7 % de contribución combinada con hollín en punto de máximo CO₂. F5 muestra el mayor acoplamiento con contribuciones sig-

nificativas de CO_2 (45-77%), hollín (12-40%) y CO (9-22%) variando según la ubicación. Esto confirma la necesidad de considerar el acoplamiento radiativo entre especies en el problema de inversión espectral, especialmente para filtros F5 y F7-F8 donde diferentes especies contribuyen significativamente dependiendo de la posición espacial.

5.5. Análisis de Sensibilidad

Para continuar el análisis de los resultados, en esta sección se cuantifica cómo perturbaciones en las variables de entrada (T , X_{CO_2} , $X_{\text{H}_2\text{O}}$, X_{CO} , f_v) afectan la radiancia observada en cada filtro, mediante el cálculo de elasticidades.

5.5.1. Elasticidades en puntos representativos de la Yale 60

Para cuantificar la sensibilidad de cada filtro a perturbaciones en los campos de especies y temperatura, se calcularon las elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^\phi$ en los mismos puntos utilizados en el Apartado 5.2, agregando máximo de $X_{\text{H}_2\text{O}}$ (Yale 60: $r = 77$, $z = 91$; Yale 80: $r = 84$, $z = 97$). Se aplicaron perturbaciones del 10% ($\delta = 0,1$) a cada parámetro de forma independiente, manteniendo los demás constantes.

La Figura 5.29 muestra las elasticidades calculadas para la Yale 60.

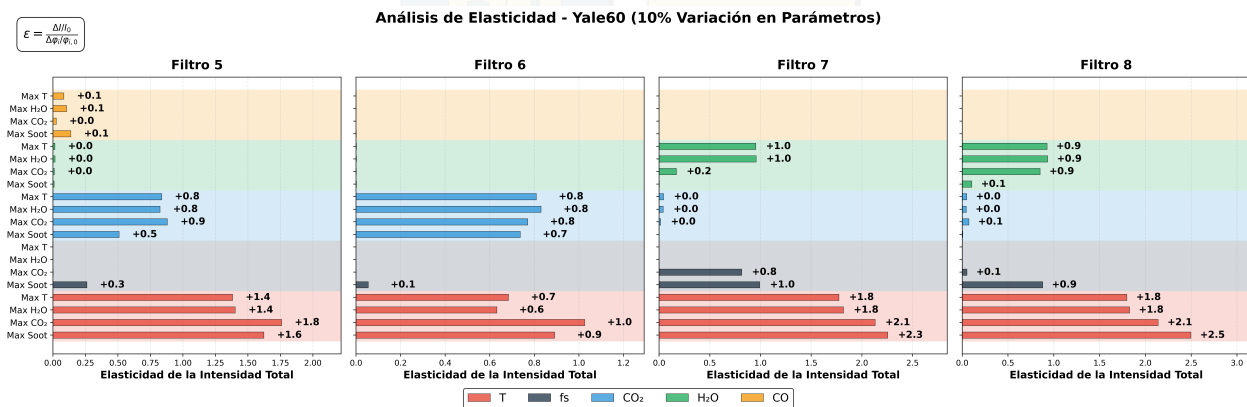


Figura 5.29: Yale 60: Elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^\phi$ en cuatro puntos (máximo T, CO_2 , H_2O , f_v). Colores: verde = H_2O , azul = CO_2 , gris = hollín, rojo = temperatura.

Analizando los resultados:

1. En el punto de máxima temperatura:

- *Temperatura domina en casi todos los filtros*: Las elasticidades térmicas son las más altas en F5, F7 y F8, con valores más altos en longitudes de onda cortas:

$\mathcal{E}_{I_{F5}}^T \approx +1,4$, $\mathcal{E}_{I_{F7}}^T \approx +1,8$, y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^T \approx +1,8$. Esto refleja la mayor pendiente de la función de Planck a longitudes de onda cortas, donde un incremento del 10% en temperatura genera hasta 18% de aumento en intensidad radiativa en F7-F8. También se debe destacar la reducción de la elasticidad térmica en F6, donde $\mathcal{E}_{I_{F6}}^T \approx +0,7$, que se puede relacionar a la selectividad del filtro a CO_2 .

- *CO_2 tiene sensibilidad moderada en F6-F7*: El CO_2 presenta elasticidad moderada en el filtro que captura su banda fundamental: $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$. Este valor, mayor a la elasticidad térmica en el mismo punto, confirma la selectividad de F6 hacia CO_2 . En F5 la elasticidad obtenida es menor a la térmica $\mathcal{E}_{I_{F5}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$, pero todavía es suficiente para que un cambio en CO_2 genere variaciones notables. En F7-F8, las elasticidades son prácticamente nulas ($< 0,1$), consistente con la ausencia de bandas intensas de CO_2 en esos rangos espectrales.
 - *H_2O relevante principalmente en F7 y F8*: El H_2O presenta elasticidades despreciables en F5-F6 ($< 0,1$) pero alcanza valores moderados en los filtros de longitud de onda corta: $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +1,0$ y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +0,9$. La mayor sensibilidad en F7 confirma el alto efecto del agua en las regiones de productos calientes para este filtro.
 - *Hollín casi nulo en zona de alta temperatura*: Las elasticidades del hollín son muy bajas ($< 0,1$) en todos los filtros, consistente con la fracción volumétrica extremadamente baja en este punto ($f_v \approx 0,1$ ppm). Esto confirma que en las regiones de productos calientes, el continuo de partículas no contribuye significativamente a la radiación total.
 - *CO despreciable*: El CO muestra elasticidades bajas en todos los filtros ($< 0,1$), excepto en F5 donde alcanza un valor marginal, consistente con su baja fracción molar en la zona de productos completamente oxidados.
2. En punto de máximo CO_2 : Este punto, también ubicado en la región de productos calientes, muestra elasticidades térmicas dominantes en todos los filtros: $\mathcal{E}_{I_{F5}}^T \approx +1,8$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^T \approx +1,0$ en filtros de onda larga, y $\mathcal{E}_{I_{F7}}^T \approx +2,1$, $\mathcal{E}_{I_{F8}}^T \approx +2,1$ en filtros de onda corta. Por otra parte, el CO_2 mantiene elasticidades prácticamente idénticas al caso anterior ($\mathcal{E}_{I_{F5}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$), mientras que el hollín permanece con valores bajos en todos los filtros menos el F7 ($\mathcal{E}_{I_{F7}}^{f_v} \approx +0,8$), confirmando que este punto está fuera de la zona de máxima formación de partículas.
3. En punto de máximo H_2O :
- *H_2O alcanza su máxima sensibilidad*: Las elasticidades del H_2O son las más altas observadas respecto a cualquier otro punto, particularmente en F7-F8: $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +1,0$ y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +0,9$. Estos valores confirman que F7-F8 son altamente sensibles a variaciones en la concentración de vapor de agua en regiones donde esta especie es abundante.

- *Temperatura y CO₂ mantienen patrones similares a puntos anteriores:* La temperatura domina con elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^T \approx +1,4$ en F5, $\mathcal{E}_{I_f}^T \approx +0,6$ en F6 y $\mathcal{E}_{I_f}^T \approx +1,8$ en F7-F8. El CO₂ mantiene elasticidades moderadas en F5-F6 ($\approx +0,8$) pero bajas en F7-F8 ($< 0,1$). El hollín permanece con contribución baja ($\mathcal{E}_{I_f}^{fv} < 0,1$).

4. En punto de máximo hollín:

- *Temperatura sigue dominando pero con ventaja reducida:* Las elasticidades térmicas mantienen los valores más altos: $\mathcal{E}_{I_{F5}}^T \approx +1,6$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^T \approx +0,9$, $\mathcal{E}_{I_{F7}}^T \approx +2,3$, y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^T \approx +2,5$. Sin embargo, la ventaja respecto al hollín se reduce significativamente comparado con los puntos en la región de productos, particularmente en F7-F8 donde el hollín emerge como competidor.
- *Hollín emerge como factor significativo en F7-F8:* El hollín alcanza elasticidades de $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{fv} \approx +1,0$ y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^{fv} \approx +0,9$, representando aproximadamente 40-45% de la sensibilidad térmica en estos filtros. Esto confirma que en la zona de máxima formación de partículas, F7-F8 son altamente sensibles a variaciones en el contenido de hollín. En F5-F6, el hollín mantiene elasticidades moderadamente bajas ($\mathcal{E}_{I_{F5}}^{fv} \approx +0,3$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{fv} \approx +0,1$), confirmando su menor sensibilidad a las partículas.
- *Especies gaseosas mantienen contribuciones apreciables:* A pesar de la presencia de hollín, las especies gaseosas continúan contribuyendo significativamente en los filtros en que son dominantes. El CO₂ muestra elasticidades elevadas en F5-F6 ($\mathcal{E}_{I_{F5}}^{X_{CO_2}} \approx +0,5$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{X_{CO_2}} \approx +0,7$), mientras que el H₂O tampoco desaparece en F7 ($\mathcal{E}_{I_{F7}}^{X_{H_2O}} \approx +0,2$). Este balance entre temperatura, hollín y gases confirma la complejidad del acoplamiento radiativo en esta zona crítica de la llama.

5.5.2. Elasticidades en puntos representativos de la Yale 80

A continuación, la Figura 5.30 muestra los resultados para la Yale 80.

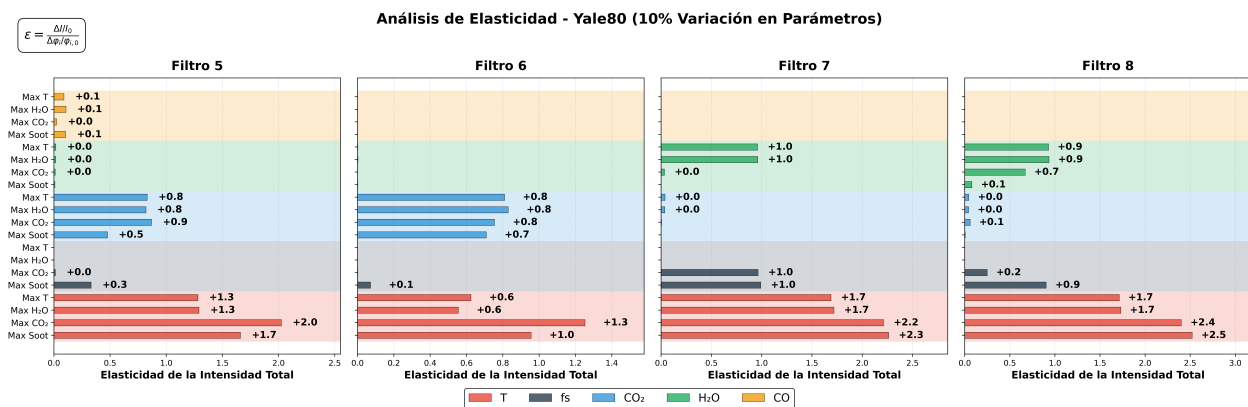


Figura 5.30: Yale 60: Elasticidades $\mathcal{E}_{I_f}^{\phi}$ en cuatro puntos (máximo T, CO₂, H₂O, f_v).
Colores: verde = H₂O, azul = CO₂, gris = hollín, rojo = temperatura.

Respecto a los resultados obtenidos en Yale 60 se puede destacar:

1. En puntos de alta temperatura y máximos de gases:

- *Temperatura mantiene dominancia:* Las elasticidades térmicas permanecen en rangos similares a Yale 60: $\mathcal{E}_{I_{F5}}^T \approx +1,3$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^T \approx +0,6$, $\mathcal{E}_{I_{F7}}^T \approx +1,7$, y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^T \approx +1,7$ en el punto de máxima temperatura. Este resultado confirma que en las regiones de productos calientes, la temperatura sigue siendo el parámetro dominante independientemente del contenido de hollín de la llama.
- *Especies gaseosas mantienen elasticidades similares:* El CO_2 presenta elasticidades $\mathcal{E}_{I_{F5}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$ y $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{X_{\text{CO}_2}} \approx +0,8$ en puntos de alta temperatura, prácticamente idénticas a Yale 60. El H_2O mantiene $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +1,0$ y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^{X_{\text{H}_2\text{O}}} \approx +0,9$ en su punto de máximo, confirmando que la sensibilidad a gases en regiones sin hollín permanece estable entre configuraciones.
- *Hollín incrementa su efecto zonas de productos:* Las elasticidades del hollín se mantienen bajas ($< 0,3$) en los filtros F5 y F6, sin embargo, incrementa su efecto en el F7-F8, con $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{f_v} \approx +1,0$ en el punto de mayor CO_2 versus $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{f_v} \approx +0,8$ en Yale 60 y $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{f_v} \approx +0,2$ frente a $\mathcal{E}_{I_{F7}}^{f_v} \approx +0,1$ en Yale 60. Esto confirma que el incremento en contenido de hollín no afecta significativamente la radiación en regiones alejadas de la zona de formación de partículas para los filtros de menor longitud, pero si tiene repercusión en los de mayor longitud.

2. En punto de máximo hollín:

- *Hollín mantiene su importancia en F5-F6:* En F5, el hollín alcanza $\mathcal{E}_{I_{F5}}^{f_v} \approx +0,3$, igual que Yale 60. En F6, también mantiene su valor con $\mathcal{E}_{I_{F6}}^{f_v} \approx +0,1$. Esto confirma que F5-F6 preservan su selectividad hacia CO_2 incluso en Yale 80, con mayor continuo de partículas.
- *Temperatura mantiene valores elevados y similar impacto que Yale 60:* Las elasticidades térmicas permanecen altas: $\mathcal{E}_{I_{F5}}^T \approx +1,7$, $\mathcal{E}_{I_{F6}}^T \approx +1,0$, $\mathcal{E}_{I_{F7}}^T \approx +2,3$, y $\mathcal{E}_{I_{F8}}^T \approx +2,5$. Sin embargo, la ventaja de la temperatura sobre el hollín se reduce drásticamente en F7-F8: el hollín mantiene su elasticidad $\mathcal{E}^T/\mathcal{E}^{f_v}$ en $\approx 1,0$ para F7, y de $\approx 0,9$ para F8, implicando que errores en la estimación de f_v tendrán impacto comparable a los de Yale 60 para estos filtros en Yale 80.
- *Especies gaseosas mantienen importancia relativa:* El H_2O , CO_2 y CO muestran las mismas elasticidades en F7-F8 que en Yale 60. Esto refleja como, para este punto, el hollín continua siendo dominante, pero sin mayor efecto en comparación a llamas con menor cantidad de partículas.

5.5.3. Síntesis de los resultados de sensibilidad

El análisis de elasticidad revela algunas características muy importantes sobre la estructura de las sensibilidades radiativas en las llamas de difusión estudiadas. Las conclusiones se organizan en hallazgos generales sobre la estructura de sensibilidades y observaciones específicas sobre las diferencias entre Yale 60 y Yale 80.

En primer lugar, del análisis de elasticidad se puede determinar que:

- *La sensibilidad es altamente dependiente del punto de observación y filtro espectral:* La estructura de sensibilidades varía según la ubicación espacial y el filtro considerado. En puntos de máxima temperatura, CO₂ y H₂O (regiones de productos calientes), la temperatura muestra elasticidades elevadas, pero las especies gaseosas también presentan sensibilidades significativas en sus filtros selectivos: CO₂ alcanza $\mathcal{E}^{X_{CO_2}} \approx 0,8 - 1,0$ en F6, superando incluso la elasticidad térmica en algunos puntos; H₂O alcanza $\mathcal{E}^{X_{H_2O}} \approx 0,9 - 1,0$ en F7-F8 en su punto de máximo. En el punto de máximo hollín, emerge un régimen de competencia donde temperatura ($\mathcal{E}^T \approx 1,6 - 2,5$), hollín ($\mathcal{E}^{f_v} \approx 0,9 - 1,0$ en F7-F8), y especies gaseosas ($\mathcal{E}^{X_{CO_2}} \approx 0,5 - 0,7$ en F5-F6, $\mathcal{E}^{X_{H_2O}} \approx 0,2$ en F7) contribuyen simultáneamente de forma apreciable.
- *Cada filtro presenta selectividad específica dependiente del contexto espacial:* F6 muestra selectividad robusta hacia CO₂ en todos los puntos, con su elasticidad consistentemente superando otras especies, y notablemente siendo el único filtro donde la elasticidad de CO₂ supera la térmica en puntos de productos calientes. F7 presenta un comportamiento dual altamente dependiente del punto: en regiones de productos está dominado por H₂O ($\mathcal{E}^{X_{H_2O}} \approx 1,0$) con hollín despreciable, mientras que en la zona de máximo hollín invierte completamente su sensibilidad hacia f_v ($\mathcal{E}^{f_v} \approx 1,0$) con H₂O reducido. F8 mantiene sensibilidad apreciable tanto a H₂O ($\mathcal{E}^{X_{H_2O}} \approx 0,9$) como a hollín ($\mathcal{E}^{f_v} \approx 0,9$) en sus respectivas zonas de máximo. F5 presenta sensibilidades mixtas moderadas a CO₂, CO y hollín sin absoluta dominancia de especies.
- *La temperatura no es universalmente dominante, su importancia relativa varía según filtro y punto:* Aunque la temperatura presenta elasticidades elevadas en la mayoría de configuraciones ($\mathcal{E}^T > 0,7$ típicamente), su dominancia relativa es fuertemente dependiente del contexto. En F6, el CO₂ iguala o supera la temperatura en puntos de productos, indicando que F6 es un filtro donde las especies pueden ser tan o más importantes que la temperatura. En F7-F8 en el punto de máximo hollín, temperatura y hollín tienen elasticidades notables, indicando régimen de sensibilidad dual. Esta variabilidad implica que estrategias de inversión deben ser adaptativas: en algunos contextos (F6 en productos, F7-F8 en zona de hollín) la determinación de especies puede ser tan crítica como la temperatura.

Luego, las observaciones de los cambios encontrados entre Yale 60 a Yale 80 implican:

- *Las elasticidades se mantienen notablemente estables entre configuraciones:* Contrario a lo que podría esperarse dado el incremento de 80% en contenido de hollín, las elasticidades permanecen en rangos muy similares entre Yale 60 y Yale 80. Esta estabilidad indica que la estructura fundamental de sensibilidades considerada es robusta al contenido de hollín.
- *Los cambios más notables ocurren en puntos de productos para F7:* El cambio más significativo entre configuraciones aparece en F7 en puntos de máximo CO₂, donde la elasticidad del hollín aumenta de $\mathcal{E}^{fv} \approx 0,8$ (Yale 60) a $\mathcal{E}^{fv} \approx 1,0$ (Yale 80). Esto indica que el mayor contenido de hollín en Yale 80 extiende la región donde el hollín contribuye significativamente, afectando incluso zonas tradicionalmente dominadas por gases. Sin embargo, este cambio no altera fundamentalmente el régimen de sensibilidad: F7 sigue siendo altamente sensible a H₂O en puntos de productos ($\mathcal{E}^{X_{H_2O}} \approx 1,0$ en ambas configuraciones) y altamente sensible a hollín en su zona de máximo.
- *Robustez de F6 confirmada independientemente del contenido de hollín:* F6 mantiene su selectividad excepcional hacia CO₂ en ambas configuraciones. Aunque la elasticidad del hollín aumenta marginalmente en el punto de máximo hollín, el CO₂ mantiene clara dominancia en todos los puntos. Esto confirma que F6 es robusto para diagnóstico de CO₂ incluso bajo condiciones de alto hollín, siendo el filtro más selectivo de los cuatro estudiados independientemente de la configuración de la llama.

La Tabla 5.3 resume las tendencias principales identificadas y sus implicaciones directas.

Tabla 5.3: Síntesis de hallazgos del análisis de sensibilidad y sus implicaciones para inversión.

Hallazgo	Implicación
Sensibilidad depende del punto y el filtro	Estrategias de inversión deben ser especialmente adaptativas.
F6 selectivo a CO ₂	Filtro óptimo para determinación robusta de CO ₂ .
F7 tiene comportamiento dual	Requiere tratamiento diferenciado según región.
F8 sensible tanto a H ₂ O como hollín	Proporciona información complementaria, pero requiere desacoplamiento cuidadoso.
Elasticidades estables entre Yale 60 y Yale 80	Estrategias desarrolladas para una configuración son probablemente aplicables a otras con contenido variable de hollín.
Temperatura importante	Inversión simultánea T-especies necesaria en todas las configuraciones.
CO difícil de aislar espectralmente	Su cuantificación precisa requiere información adicional.

5.6. Comparación Imágenes Sintéticas vs. Experimentales

Para validar cuantitativamente el modelo directo de transferencia radiativa, se comparan las imágenes sintéticas generadas con las mediciones de la cámara Telops MS-M1K.

5.6.1. Visión general: Imágenes 2D

Para cada filtro espectral (F5-F8) y cada llama (Yale 60, Yale 80), se comparan:

1. **Imágenes 2D:** Campos de radiancia $I_f(x, y)$ [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]
2. **Perfiles axiales:** $I_f(z)$ extraídos en el eje central ($r = 0$)
3. **Perfiles radiales:** $I_f(r)$ extraídos en $z = 2$ cm (región de máxima emisión de hollín)

Los datos experimentales corresponden a promedios temporales de 100 imágenes capturadas en estado estacionario.

5.6.2. Resultados para Yale 60

La Figura 5.31 muestra la comparación lado a lado para Yale 60:

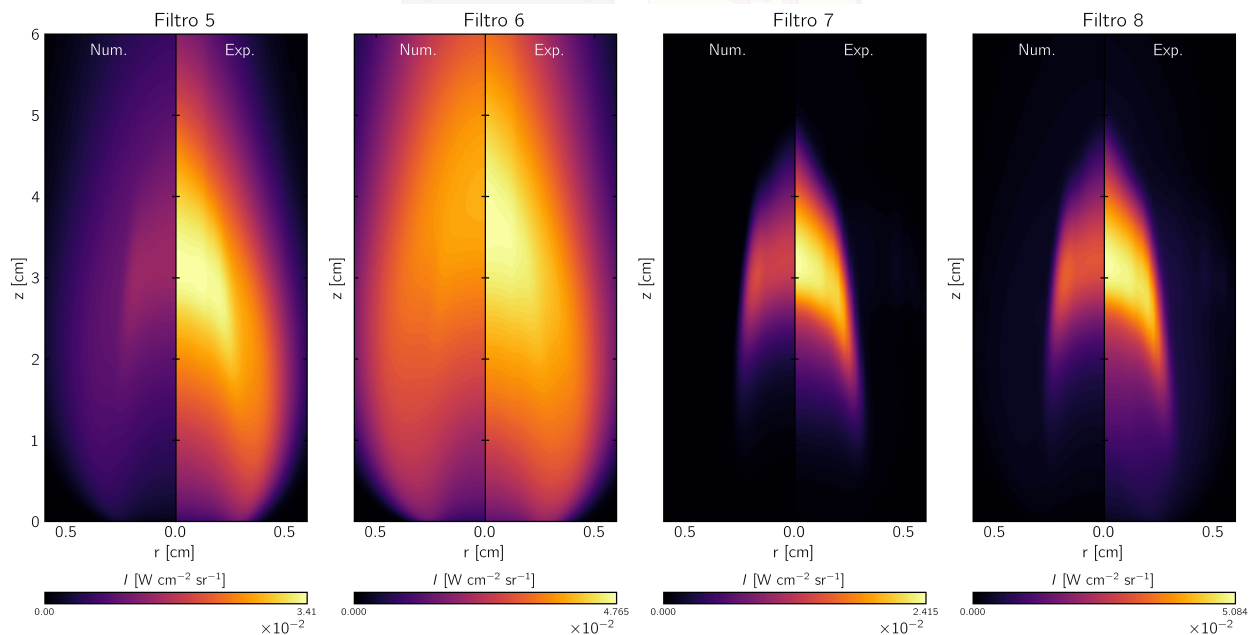


Figura 5.31: Yale 60: Imágenes de radiancia para los cuatro filtros. Izquierda: sintéticas. Derecha: experimentales. Unidades: $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$.

En términos generales, las imágenes sintéticas reproducen correctamente las características cualitativas fundamentales en todos los filtros: la morfología general de la llama, la ubicación espacial de los máximos de emisión, y la extensión vertical de la zona emisora.

Los cuatro filtros capturan la estructura característica de llama de difusión, con la región de máxima emisión en $z \approx 2 - 4$ cm. Tanto en los resultados numéricos como experimentales F5 y F6 muestran regiones emisoras más extendidas verticalmente (hasta $z \approx 6$ cm con intensidad apreciable) comparadas con F7 y F8 (hasta $z \approx 5$ cm), reflejando la mayor persistencia de CO_2 en la pluma versus la oxidación más rápida del hollín. Igualmente, F7 presenta la morfología más compacta con forma de “cap” característica del hollín, mientras que F8 muestra una estructura intermedia combinando la distribución amplia de H_2O con la compacta del hollín.

Sin embargo, en términos de magnitud absoluta, existen diferencias sistemáticas que se analizan mediante los perfiles cuantitativos.

A continuación, la Figura 5.32 muestra los perfiles axiales de intensidad a lo largo del eje central de la flama.

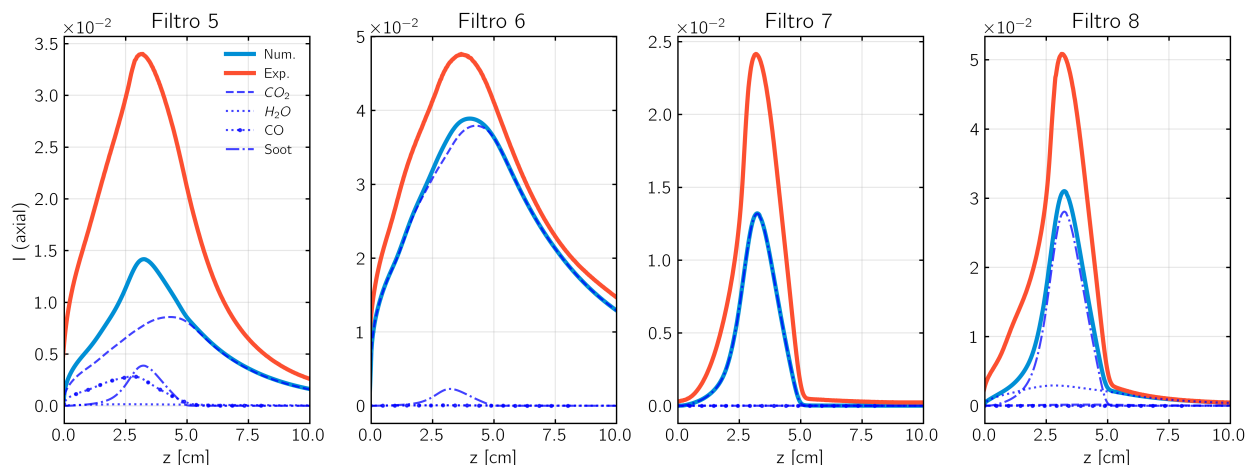


Figura 5.32: Yale 60: Perfiles axiales de intensidad en el eje central para F5-F8. Línea roja continua: experimental. Línea azul continua: numérico total. Líneas punteadas: contribuciones separadas de CO_2 , H_2O , CO , hollín del modelo numérico.

La Cuadro 5.4 resume las intensidades máximas en el eje central para cada filtro.

Tabla 5.4: Yale 60 - Perfiles axiales: Comparación de intensidades máximas en eje central.

Filtro	I_{\max}^{num} [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]	I_{\max}^{exp} [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]	Diferencia (%)
F5	$1,4 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	-59
F6	$3,9 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	-19
F7	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	-46
F8	$3,1 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-2}$	-39

Analizando por cada filtro:

- **Filtro 5:** Existe concordancia aceptable con subestimación significativa. El perfil experimental y el modelo presentan un pico en $z \approx 3$ cm, pero con una diferencia de aproximadamente 59%. La descomposición espectral revela que CO_2 domina la emisión, seguido por hollín, CO y H_2O . El acuerdo espacial es excelente, con ambos perfiles mostrando decaimiento gradual hacia $z > 5$ cm, pero la discrepancia en magnitud sugiere posible subestimación en la concentración de especies o en las propiedades ópticas empleadas.
- **Filtro 6:** Exhibe el mejor acuerdo de todos los filtros. El pico experimental se ubica en la misma altura del modelo, con una diferencia de solo el 19%. Este es el mejor acuerdo observado en todos los filtros, confirmando la robustez del modelo para la banda de CO_2 . La descomposición muestra que CO_2 domina abrumadoramente (>97% de la señal), con contribuciones despreciables de otras especies. El excelente acuerdo tanto en forma como en magnitud valida la modelación de las propiedades radiativas del CO_2 y confirma que F6 es efectivamente una banda gas-pura con interferencia mínima de hollín.
- **Filtro 7:** La emisión se compone principalmente de hollín. El modelo predice con una subestimación de aproximadamente 46%. La descomposición muestra únicamente hollín, lo que puede relacionarse al punto medido. Aunque la morfología del perfil es correcta (pico en $z \approx 3$ cm, decaimiento hacia regiones superiores), la discrepancia en magnitud sugiere posible subestimación en las propiedades radiativas del hollín en este rango espectral.
- **Filtro 8:** Muestra valores consistentes con F7. El perfil experimental refleja la combinación de H_2O y hollín. El modelo predice con una subestimación de aproximadamente un 39%. La descomposición indica dominancia de hollín ($\sim 80\%$) con contribuciones de H_2O ($\sim 20\%$). La subestimación sistemática en F7-F8, ambos sensibles a H_2O y hollín, sugiere que las propiedades radiativas de alguna de las especies podrían estar siendo subestimadas en el modelo, posiblemente debido a limitaciones en las bases de datos espectrales HITEMP o a efectos de ensanchamiento no considerados completamente.

Se debe destacar que, a pesar de las discrepancias en magnitud absoluta, todos los filtros muestran concordancia excelente en morfología: ubicación del pico ($z \approx 3$ cm consistentemente), forma del perfil, y extensión vertical de la zona emisora. Este acuerdo espacial valida que los campos de entrada (T , X_{CO_2} , $X_{\text{H}_2\text{O}}$, X_{CO} , f_v) de la simulación CFD capturan correctamente la estructura axial de la llama de difusión.

Para concretar el análisis, la Figura 5.33 muestra los perfiles radiales en la altura donde el hollín alcanza su valor máximo.

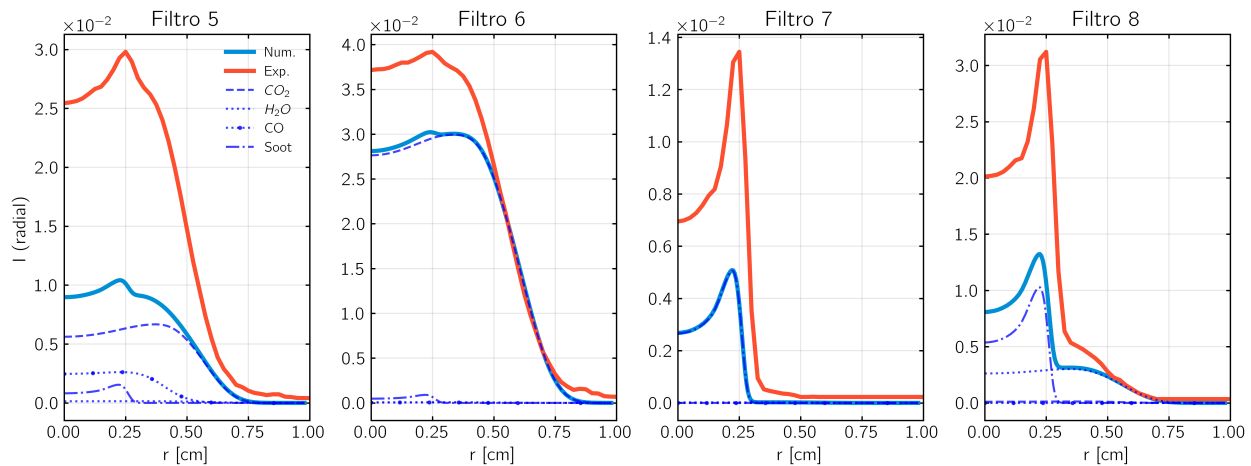


Figura 5.33: Yale 60: Perfiles radiales de intensidad en $z = 2$ cm para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas del modelo numérico.

La Tabla 5.5 resume las intensidades máximas en los perfiles radiales.

Tabla 5.5: Yale 60 - Perfiles radiales: Comparación de intensidades máximas en $z = 2$ cm.

Filtro	I_{\max}^{num} [W/(cm ² ·sr)]	I_{\max}^{exp} [W/(cm ² ·sr)]	Diferencia (%)
F5	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	-67
F6	$3,0 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-2}$	-25
F7	$0,5 \times 10^{-2}$	$1,35 \times 10^{-2}$	-63
F8	$1,35 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$	-58

Respecto a estos resultados, se debe destacar que:

- Todos los filtros muestran picos experimentales y numéricos en $r \approx 0,2 - 0,3$ cm, correspondiendo a la región donde el hollín alcanza su máxima concentración.
- F6 mantiene el mejor acuerdo, lo cual es consistente con los perfiles axiales.
- F7 presenta el perfil más estrecho de todos (-63% de diferencia), reflejando la distribución espacial compacta del hollín. La descomposición revela que el hollín contribuye ~100% en el pico ($r \approx 0,25$ cm). Ambos perfiles (experimental y numérico) muestran decaimiento rápido hacia $r > 0,4$ cm, confirmando que el modelo captura correctamente la distribución espacial estrecha del hollín, aunque subestima significativamente su intensidad absoluta. Esta mayor discrepancia en perfiles radiales (-63%) comparada con perfiles axiales (-46%) sugiere posibles incertidumbres adicionales en las propiedades ópticas del hollín, específicamente en la región de máxima concentración.
- El F8 presenta un perfil intermedio, combinación de emisión amplia de H₂O y estrecha de hollín, pero con alta discrepancia como el F7.

- Las diferencias en perfiles radiales son sistemáticamente mayores que en los perfiles axiales, con incrementos particularmente notables en F5 (de -59% a -67%) y F7 (de -46% a -63%). Esta tendencia sugiere que el modelo captura mejor la distribución vertical integrada que la estructura radial detallada, posiblemente debido a efectos tridimensionales de transferencia radiativa o limitaciones en la resolución espacial de los campos CFD de entrada en dirección radial.
- Existe acuerdo espacial excelente en todos los casos (ubicación de máximos en las alas de la llama, anchos de distribución bien reproducidos).

En resumen, se puede observar que para la Yale 60 el modelo reproduce exitosamente las características cualitativas de la radiación en los cuatro filtros, con F6 mostrando el mejor acuerdo cuantitativo, lo cual valida la modelación de CO_2 . Sin embargo, existe una subestimación notable en la magnitud absoluta en F5, F7 y F8, con las mayores discrepancias encontradas en los filtros sensibles a H_2O y hollín.

A pesar de las discrepancias en magnitud, el acuerdo espacial confirma que el modelo captura correctamente la física fundamental de la transferencia radiativa en llamas de difusión.

5.6.3. Resultados para Yale 80

La Figura 5.34 muestra la comparación lado a lado entre los resultados experimentales y numéricos para Yale 80.

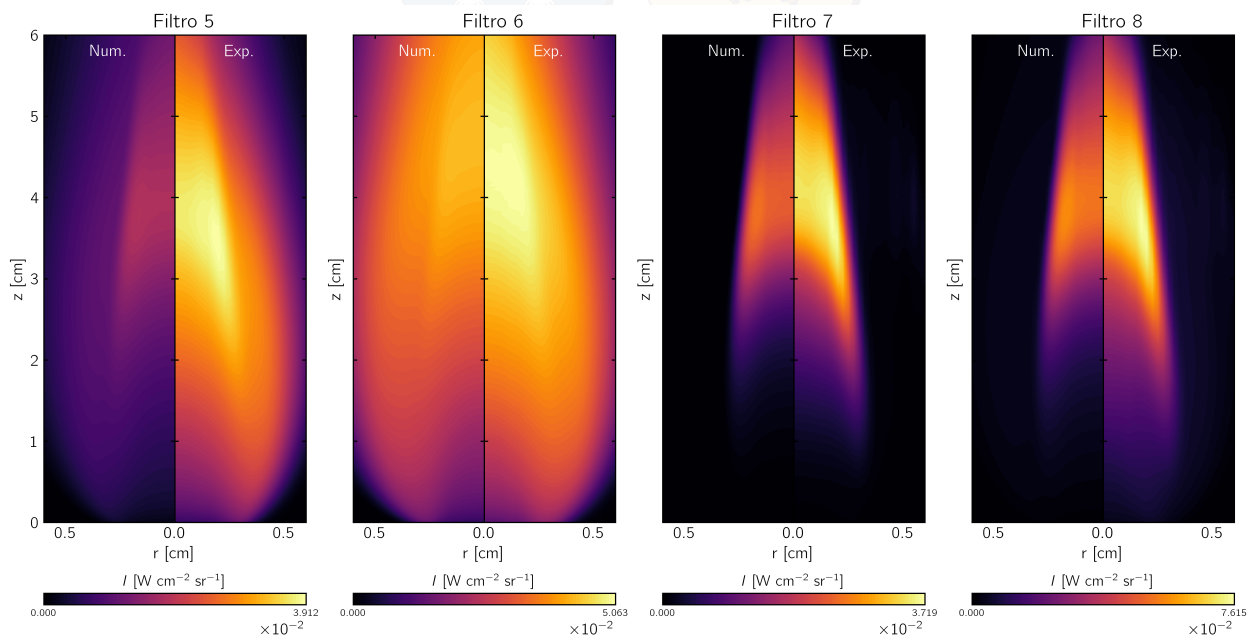


Figura 5.34: Yale 80: Imágenes de radiancia para los cuatro filtros. Izquierda: sintéticas. Derecha: experimentales. Unidades: $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$.

La Yale 80, que posee mayor temperatura y contenido de hollín, presenta intensidades significativamente mayores en todos los filtros, pero particularmente en F7 y F8, donde el hollín contribuye predominantemente.

También se puede observar que las imágenes sintéticas reproducen correctamente la morfología extendida de la llama: F5 y F6 muestran regiones emisoras hasta $z \approx 7 - 8$ cm, mientras que F7 y F8 presentan estructuras más compactas hasta $z \approx 6$ cm. La región de máxima emisión se desplaza verticalmente de $z \approx 2,5$ cm en Yale 60 a $z \approx 3 - 4$ cm en Yale 80, consistente con la llama más larga observada en los campos de especies. F7 mantiene su morfología característica de “cap” pero ahora más extendida tanto vertical como radialmente, reflejando la mayor distribución espacial del hollín.

El acuerdo cualitativo es excelente en todos los filtros, capturando correctamente la intensificación de la emisión y la extensión de las zonas activas. Sin embargo, al igual que en la Yale 60, existen diferencias notables en términos de magnitud.

La Figura 5.35 muestra los perfiles de intensidad a lo largo del eje central de la llama para Yale 80.

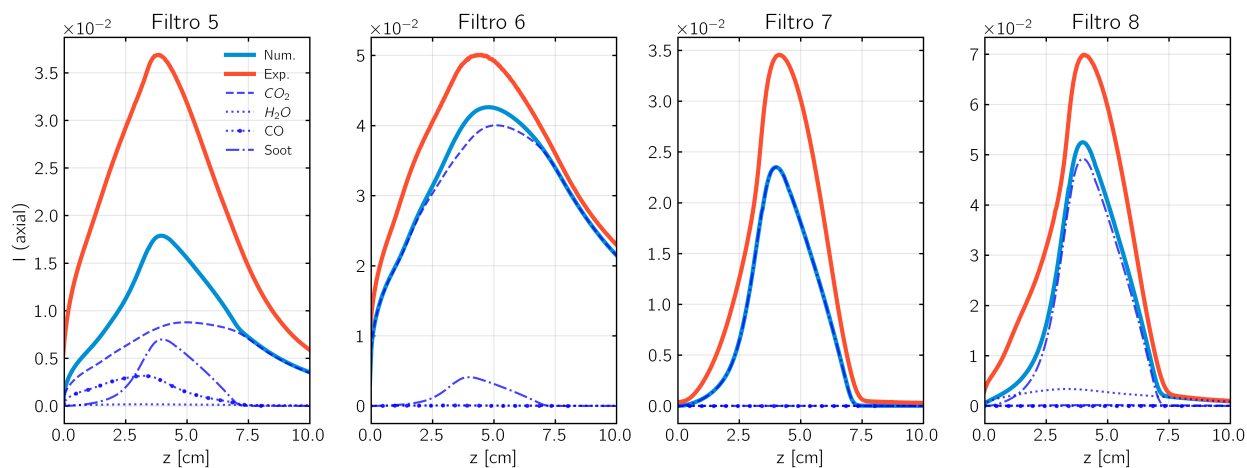


Figura 5.35: Yale 80: Perfiles axiales de intensidad en el eje central para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas de CO_2 , H_2O , CO , hollín del modelo numérico.

Luego, el Cuadro 5.6 resume las intensidades máximas.

Tabla 5.6: Yale 80 - Perfiles axiales: Comparación de intensidades máximas en eje central.

Filtro	I_{\max}^{num} [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]	I_{\max}^{exp} [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$]	Diferencia (%)
F5	$1,75 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	-53
F6	$4,2 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	-16
F7	$2,4 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$	-31
F8	$5,2 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$	-26

Se pueden hacer las siguientes observaciones:

- *F6 mantiene mejor acuerdo en Yale 80 respecto a Yale 60*: F6 muestra una diferencia de solo -16% , mejorando ligeramente respecto a Yale 60 (-19%). Este resultado confirma la robustez del modelo para CO_2 independientemente del contenido de hollín. La descomposición revela que CO_2 sigue dominando ($\sim 90\%$ en el eje central), con contribución marginal pero no despreciable de hollín ($\sim 10\%$) comparado con Yale 60 donde el hollín era prácticamente insignificante.
- *Mejora generalizada en acuerdo cuantitativo para Yale 80*: Comparando con Yale 60, Yale 80 muestra mejoras en el acuerdo cuantitativo en todos los filtros: F5 mejora de -59% a -53% , F6 de -19% a -16% , F7 de -46% a -31% y F8 de -39% a -26% . Esta tendencia sugiere que el modelo captura mejor las condiciones de mayor contenido de hollín y temperatura más alta, posiblemente porque los efectos de emisión térmica y continuo de Rayleigh se vuelven más dominantes y mejor representados.
- *F7 y F8 muestran mayor sensibilidad al hollín en Yale 80*: F7 alcanza intensidades de $I_{\max}^{\text{exp}} \approx 2,4 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, aproximadamente 45% mayor que Yale 60 ($1,3 \times 10^{-2}$), reflejando el incremento en contenido de hollín. F8 muestra incrementos aún más dramáticos, de $3,1 \times 10^{-2}$ a $5,2 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ (41% de aumento). Las descomposiciones muestran que el hollín mantiene su importancia relativa en el eje central en Yale 80.
- *Desplazamiento vertical correctamente capturado*: Los picos de intensidad en Yale 80 se desplazan verticalmente a $z \approx 3,0 - 3,5 \text{ cm}$ (versus $z = 2,5 \text{ cm}$ en Yale 60), consistente con la llama más larga y la mayor extensión de la zona de reacción. Este desplazamiento es correctamente reproducido por el modelo en todos los filtros, validando que los campos CFD capturan adecuadamente la estructura axial extendida de Yale 80.

A continuación, la Figura 5.36 muestra los perfiles radiales extraídos en $z = 2 \text{ cm}$.

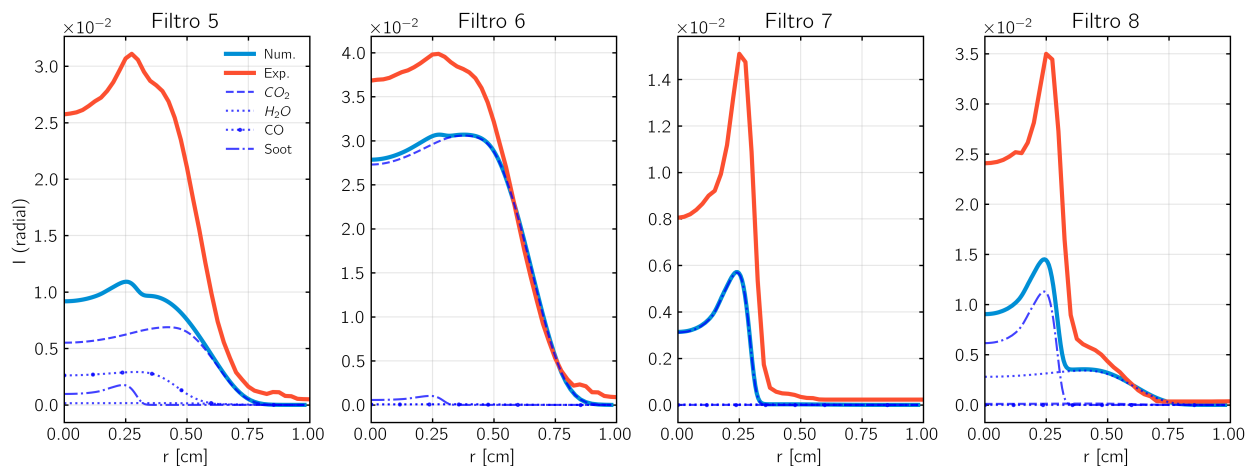


Figura 5.36: Yale 80: Perfiles radiales de intensidad en $z = 2 \text{ cm}$ para F5-F8. Líneas continuas: experimental. Líneas punteadas: contribuciones separadas del modelo numérico.

El Cuadro 5.7 resume las intensidades máximas en los perfiles radiales.

Tabla 5.7: Yale 80 - Perfiles radiales: Comparación de intensidades máximas en $z = 2$ cm.

Filtro	I_{\max}^{num} [W/(cm ² ·sr)]	I_{\max}^{exp} [W/(cm ² ·sr)]	Diferencia (%)
F5	$1,1 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	-65
F6	$3,1 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-2}$	-23
F7	$0,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	-60
F8	$1,45 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$	-59

Analizando:

- *F6 mantiene mejor acuerdo:* F6 muestra -23 % de diferencia, prácticamente idéntico a Yale 60 (-25 %), confirmando la robustez del modelo para CO₂ en dirección radial. La ubicación del pico permanece en $r \approx 0,25$ cm en ambas configuraciones, validando la captura correcta de la estructura radial de la zona de máxima emisión gaseosa.
- *Perfiles radiales más anchos reflejando distribución de hollín:* Los perfiles experimentales en Yale 80 muestran emisión significativa del hollín extendiéndose hasta $r \approx 0,30$ cm en F7-F8, comparado con $r \approx 0,25$ cm en Yale 60. Esta expansión radial de la zona de hollín es correctamente capturada por el modelo en términos de morfología, aunque con subestimación sistemática en magnitud. F7 mantiene su perfil estrecho característico pero ahora más ancho que en Yale 60, consistente con la región de formación de hollín espacialmente más extendida observada en los campos de f_v .
- *Discrepancias radiales similares entre Yale 60 y Yale 80:* Las diferencias en perfiles radiales para Yale 80 son comparables a Yale 60. F5 y F7 muestran las mayores discrepancias, mientras que F6 y F8 presentan el mejor acuerdo. Esto es consistente con Yale 60, sugiriendo que las fuentes de error son sistemáticas y no dependientes del régimen de hollín.

5.6.4. Comparativa entre Yale 60 y Yale 80

La comparación entre configuraciones revela patrones consistentes y cambios sistemáticos relacionados con el incremento de hollín.

Yale 80 muestra mejor acuerdo que Yale 60 en perfiles axiales para la todos los filtros. Esta tendencia sugiere que verticalmente el modelo captura mejor las condiciones de mayor contenido de hollín, posiblemente porque los efectos de emisión térmica se vuelven más dominantes y los errores relativos en propiedades de especies minoritarias tienen menor impacto.

Por otro lado, los perfiles radiales mantienen discrepancias similares entre configuraciones. Esto sugiere fuentes sistemáticas independientes del contenido de hollín, posiblemente relacionadas con efectos tridimensionales de transferencia radiativa, resolución espacial radial de campos CFD, o limitaciones en las propiedades ópticas empleadas.

Se debe destacar que, de los 4 filtros estudiados, F6 mantiene el mejor acuerdo cuantitativo en ambas llamas, confirmando que la modelación de CO_2 es robusta.

Con respecto al hollín, se observa que el incremento de aproximadamente en fracción volumétrica de hollín resulta en incrementos de intensidad experimental destacables en F7-F8, tendencia correctamente capturada por el modelo aunque con subestimación en magnitud absoluta. Esto valida que la dependencia funcional de la radiación con f_v está bien representada, aunque el nivel absoluto pueda estar sesgado.

En síntesis, aunque el modelo directo de transferencia radiativa reproduce exitosamente las características cualitativas fundamentales de la radiación de llamas de difusión en ambas configuraciones, los filtros presentan subestimación sistemática con mejor acuerdo en perfiles axiales que radiales, y con mejora generalizada en Yale 80 versus Yale 60 axialmente.

5.7. Síntesis e Implicaciones para Diagnóstico Espectral

Integrando los resultados obtenidos, se pueden establecer los roles específicos de cada filtro y los lineamientos fundamentales para futuros métodos de inversión espectral.

5.7.1. Roles espectrales de cada filtro

Sintetizando los resultados obtenidos, es posible establecer el rol específico de cada filtro para el diagnóstico espectral de las llamas de difusión estudiadas:

Tabla 5.8: Síntesis de roles espectrales de los cuatro filtros basada en análisis integrado de contribuciones, elasticidades y validación experimental.

Filtro	Rol espectral y uso recomendado
F5	Mixto $\text{CO}_2/\text{CO}/\text{hollín}$: Captura principalmente CO_2 , hollín y contribuciones de CO , según la ubicación. Útil para estimación de CO en llamas ricas, pero requiere corrección cuidadosa por hollín en llamas con alto f_v .
F6	Banda altamente selectiva para CO_2: Captura la banda fundamental de CO_2 . Interferencia mínima de hollín incluso en Yale 80. Óptima para estimación robusta de X_{CO_2} y temperatura. Rol crítico como filtro de referencia para validación y calibración.
F7	Banda dual con comportamiento espacialmente segregado: Dominado por continuo de partículas en zona de formación de hollín, dominado por H_2O en regiones de productos. Óptima para estimación de f_v en zona de alas aprovechando la ventana con mínima absorción gaseosa.
F8	Banda mixta H_2O-hollín con segregación espacial: Captura las bandas fundamentales de H_2O , que posee contribución dominante en el eje central y las regiones de productos. El hollín contribuye predominantemente en su zona de formación. Útil para estimación de $X_{\text{H}_2\text{O}}$ en llamas con bajo-moderado hollín, o como restricción adicional para f_v en llamas con alto hollín.



5.7.2. Validación cuantitativa del modelo directo

La comparación sistemática entre imágenes sintéticas y mediciones experimentales con cámara Telops MS-M1K permite validar el modelo directo de transferencia radiativa, identificando tanto sus fortalezas como sus limitaciones cuantitativas.

Fortalezas del modelo:

1. *Acuerdo espacial excelente en todos los filtros y configuraciones:* Ubicación de máximos, morfología de llama, extensión vertical y radial de zonas emisoras son correctamente capturadas en ambas configuraciones.
2. *Validación robusta de modelación de CO₂:* F6 muestra acuerdo cuantitativo excelente con diferencias de -16 % a -25 % en ambas configuraciones, validando las propiedades radiativas de CO₂ (HITEMP) y la captura correcta del pico Q-branch.
3. *Captura correcta de escalamiento con contenido de hollín:* En incremento de f_v en Yale 80 resulta en incrementos experimentales en la intensidad de F7-F8, aunque con subestimación sistemática en magnitud absoluta.
4. *Mejora generalizada para Yale 80:* El acuerdo cuantitativo mejora en perfiles axiales para Yale 80 versus Yale 60 en todos los filtros, sugiriendo que el modelo captura mejor condiciones de mayor contenido de hollín verticalmente.

Limitaciones identificadas:

- *Subestimación sistemática en F5, F7, F8:* Existen diferencias típicas de -30 % a -67 % en magnitud absoluta, con mayor discrepancia en perfiles radiales versus axiales.
- *Mayor discrepancia en filtros sensibles a H₂O y hollín:* F7-F8 presentan subestimación consistente de -26 % a -63 %, sugiriendo limitaciones en las propiedades radiativas de H₂O (bases de datos HITEMP) y/o propiedades ópticas de hollín (modelo Chang-Charalampopoulos).
- *Discrepancias mayores en dirección radial:* Existen errores sistemáticamente mayores en perfiles radiales versus axiales, lo cual sugiere posibles limitaciones en resolución espacial radial de campos CFD o efectos tridimensionales no completamente capturados por el modelo 2D axisimétrico.

5.7.3. Fuentes probables de discrepancia

Las posibles causas de las diferencias en magnitud entre los resultados numéricos y experimentales incluyen:

1. Posible subestimación de las propiedades radiativas de H_2O en las bases de datos HI-TEMP para la región 2,5-4,0 μm , particularmente en efectos de ensanchamiento de líneas a alta temperatura.
2. Las propiedades ópticas del hollín, pues el índice de refracción complejo $m(\lambda)$ muestra dispersión significativa entre diferentes fuentes experimentales y métodos de medición [47].
3. Posible subestimación de concentraciones de especies en los campos CFD de entrada, particularmente en dirección radial, donde las discrepancias son mayores. El modelo de hollín semi-empírico en CoFlame (nucleación PAH + crecimiento HACA) tiene incertidumbre inherente en los parámetros cinéticos [46].
4. Podrían haber efectos no considerados, pequeñas asimetrías experimentales no capturadas por simetría axial, gases menores no incluidos (CH_4 , C_2H_2) que podrían contribuir igualmente en F7-F8, efectos de no-equilibrio térmico local (LTE) en zonas de borde.
5. Incertidumbre experimental: La cadena de calibración con cuerpo negro a cámara tiene incertidumbre [4], contribuyendo a las discrepancias observadas.

5.7.4. Implicaciones para futura inversión espectral

Los resultados y el análisis realizado permiten establecer lineamientos fundamentales para el desarrollo de futuras estrategias de inversión en las llamas estudiadas.

Algunos principios generales derivados del análisis serían:

1. **La estrategia debe ser espacialmente adaptativa:** Pues la estructura de sensibilidades varía dramáticamente según ubicación (productos vs formación de hollín) y filtro, requiriendo tratamiento diferenciado por región.
2. **No existe estrategia secuencial universal:** En regiones de productos con F6, CO_2 tiene elasticidad comparable a la temperatura. En zona de hollín con F7-F8, hollín y temperatura también tienen elasticidades comparables. Inversión simultánea T-especies es necesaria en todos los contextos.
3. **F6 es filtro ancla para calibración:** Dado su excelente acuerdo cuantitativo, selectividad robusta a CO_2 , y sensibilidad a CO_2 que supera temperatura en la zona de productos, F6 es el filtro óptimo para la validación y determinación inicial de campos.
4. **Contenido de hollín no altera fundamentalmente las sensibilidades:** Las elasticidades son notablemente estables entre Yale 60 y Yale 80, implicando que estrategias desarrolladas para una configuración son probablemente aplicables a otras con contenido variable de partículas.

De este modo, se proponen las siguientes estrategias por regiones:

Región de productos calientes (eje central, $z > 4$ cm):

- Inversión simultánea T- X_{CO_2} usando F6, aprovechando que ambos parámetros tienen elasticidades comparables y F6 tiene interferencia mínima de otras especies.
- Determinación de X_{H_2O} usando F7-F8 con T fija del paso anterior, aprovechando dominancia de H_2O en el eje central.
- CO determinable marginalmente de F5 si se requiere, aunque con baja precisión.

Región de formación de hollín (alas, $r \approx 0,3 - 0,5$ cm, $z \approx 2 - 5$ cm):

- Inversión simultánea T- f_v usando F7-F8, donde ambos parámetros tienen elasticidades comparables y el hollín domina la contribución.
- Corrección por contribución de H_2O usando información de región de productos.
- F6 puede proporcionar restricción adicional sobre T- X_{CO_2} incluso en presencia de hollín dado que CO_2 mantiene la dominancia.

Consideraciones sobre la incertidumbre:

- Errores esperados de -16 % a -25 % en F6 pueden propagarse a la estimación de CO_2 .
- Errores mayores de -30 % a -60 % en F7-F8 sugieren mayor incertidumbre en la determinación de H_2O y f_v . Corrección empírica basada en validación experimental puede reducir sistemáticamente estos sesgos.
- Acuerdo mejor en perfiles axiales versus radiales sugiere mayor confiabilidad en información integrada verticalmente versus resolución radial detallada.

Limitaciones para inversión:

- El CO es difícilmente cuantificable con precisión usando los 4 filtros estudiados, dada su baja elasticidad y solapamiento con CO_2 en F5.
- La separación de H_2O y hollín en F8 requiere información espacial para distinguir régimen dominante (productos vs formación).
- Subestimación del modelo en F5, F7, F8 implica que inversión directa sin corrección resultará en sobreestimación de especies para reproducir intensidades experimentales.

El análisis confirma la viabilidad del diagnóstico espectral multi-filtro en llamas de difusión, estableciendo que combinación apropiada de F6 (CO_2), F7 (hollín/ H_2O según región), y F8 (H_2O /hollín) con tratamiento espacialmente diferenciado permitiría determinar la temperatura y concentraciones principales, aunque con precisión variable según especie y con necesidad de validación experimental caso por caso para caracterizar los sesgos sistemáticos.

5.8. Experimento de Aplicación: Pirólisis de PMMA

Se presentan los resultados del análisis de combustión de PMMA utilizando los Filtros 1, 2, 6 y 7 como referencia. Los resultados para los demás filtros espectrales se incluyen en el Anexo.

5.8.1. Observación de fases de combustión

La combustión de las varillas verticales de PMMA se divide en cuatro fases identificables visualmente. La Figura 5.37 muestra como ejemplo una secuencia en la condición 86, atmósfera de aire con 21% O_2 , vista a través del filtro 7 de la cámara infrarroja.

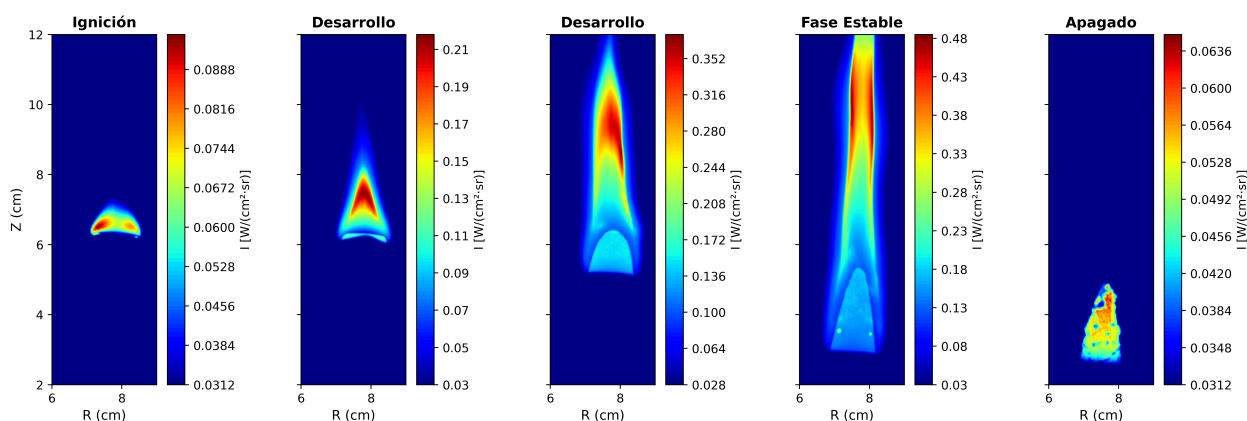


Figura 5.37: Fases de combustión del PMMA. Observadas a través del F7.

A continuación, la Figura 5.38 muestra la misma secuencia anterior, pero considerando un mismo valor máximo de intensidad para la comparación.

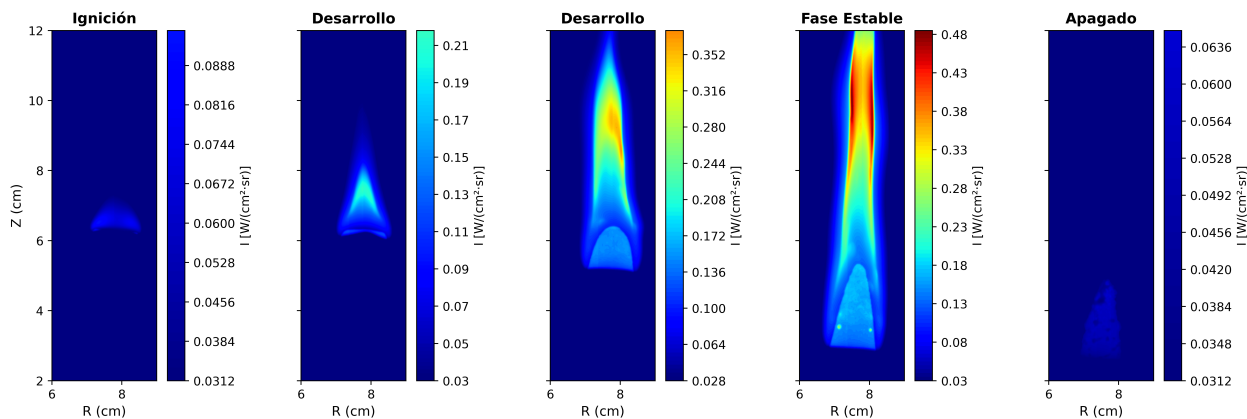


Figura 5.38: Fases de combustión del PMMA considerando el mismo máximo de intensidad. Observados a través del F7.

En la fase de ignición se observa una llama pequeña azul-celeste en el extremo superior del cilindro. La emisión IR es débil y existe formación incipiente del cono de fusión.

Luego, durante el establecimiento, la llama crece y se va tornando amarilla con tonos naranjas. El cono de fusión desciende visiblemente y la emisión aumenta rápidamente.

Entonces se alcanza una fase estable, con la llama alcanzando una morfología cuasi-estacionaria. La altura y el ancho del cono son aproximadamente constantes. Existe tasa de regresión del cono lineal con el tiempo.

Finalmente, el apagado que, en el caso experimental, fue forzado mediante soplado. La emisividad se reduce rápidamente y el cono se enfría.

Para el análisis general, se usaron datos de la fase estable, donde la variabilidad del cono es mínima. Luego, para el análisis del heater length, se toma en cuenta tanto la fase estable como el instante subsiguiente al apagado de la llama.

5.8.2. Efecto de la atmósfera en la morfología de llama

A continuación, la Figura 5.39, la Figura 5.40 y la Figura 5.41 muestran la comparación entre las 9 condiciones de atmósfera en fase estable:

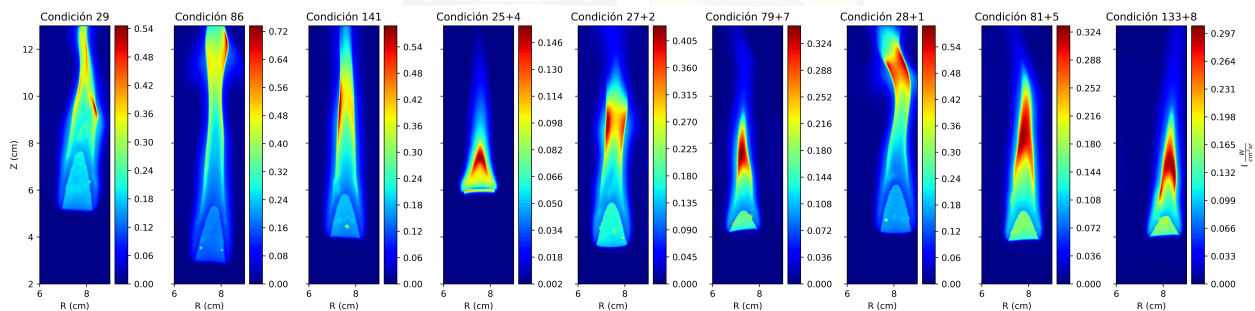


Figura 5.39: Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 2

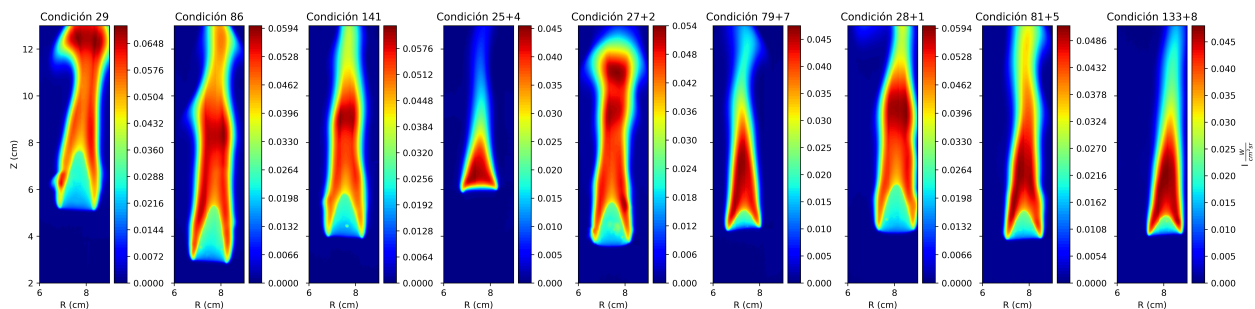


Figura 5.40: Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 6

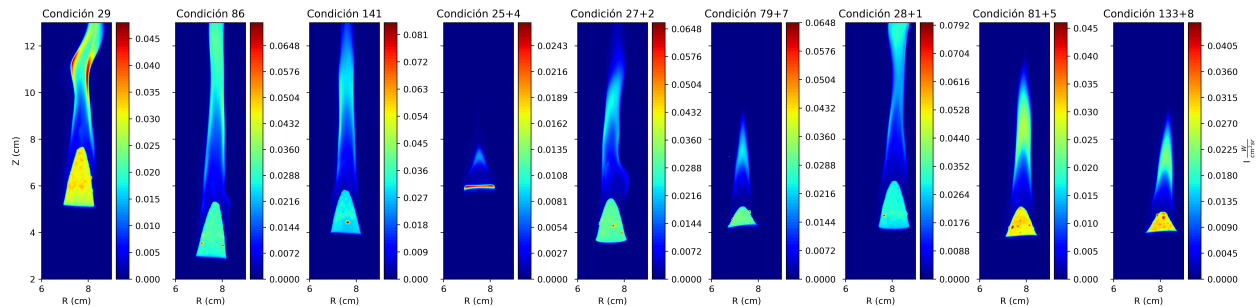


Figura 5.41: Experimentos en Fase estable vistos a través del Filtro 7

Luego, la Figura 5.42 muestra como quedaron los conos tras extinguir la llama.



Figura 5.42: Conos de PMMA posterior al experimento

Observaciones cualitativas:

Las imágenes infrarrojas revelan diferencias significativas en la morfología de la llama y en la intensidad de emisión según la composición de la atmósfera y la velocidad del coflow. Las condiciones con aire puro (29, 86 y 141) muestran las llamas más intensas y alargadas en todos los filtros. En particular, la condición 29 presenta la mayor emisión radiativa, con una llama que se extiende aproximadamente 6 cm sobre el cono de fusión en el Filtro 2. Al aumentar la velocidad del coflow en las condiciones 86 y 141, se observa un acortamiento progresivo de la llama y una redistribución de la emisión hacia zonas más compactas, sugiriendo una mayor tasa de mezcla combustible-oxidante que intensifica la combustión en una región más confinada.



La dilución con nitrógeno también tiene un efecto marcado en la intensidad de emisión y en la morfología de la llama. Las condiciones con menor contenido de oxígeno (25+4 con 18 % O₂ y 79+7 con 19 % O₂) exhiben las emisiones más débiles en todos los filtros. La llama en estas condiciones es visiblemente más corta y difusa, con una región de máxima emisión que se concentra más cerca del cono de fusión. Este comportamiento es consistente con una combustión más lenta y menos completa debido a la reducción en la disponibilidad de oxígeno, lo que resulta en menores temperaturas de llama y menor generación de productos de combustión radiantes como CO₂ y hollín.

Un caso particularmente relevante es la condición 25+4 (18 % O₂), que representa el límite inferior de sostenibilidad de la combustión entre los casos estudiados. A diferencia de todas las demás condiciones experimentales, donde la combustión se mantuvo estable hasta que fue forzosamente extinguida mediante soplado, en la condición 25+4 la llama no logró establecer un régimen autosostenido. Tras la ignición inicial con el soplete, la llama se desarrolló brevemente pero comenzó a decrecer en tamaño e intensidad de manera progresiva, hasta extinguirse naturalmente sin intervención externa. Esta extinción espontánea resultó en una morfología del cono notablemente diferente: el cilindro de PMMA remanente es considerablemente más largo que en las otras condiciones y, notablemente, no presenta la geometría cónica terminada en punta característica de los otros casos. En su lugar, muestra un extremo superior irregular y sin una forma definida, evidencia clara de que el proceso de pirólisis se detuvo abruptamente cuando la llama se apagó. Este comportamiento sugiere que 18 % O₂ está en el límite o por debajo del límite de inflamabilidad para la configuración geométrica y condiciones de flujo empleadas, donde la tasa de generación de calor por combustión es insuficiente para mantener la pirólisis del PMMA a una velocidad que sostenga la llama.

A continuación, analizando los resultados por cada filtro, se puede observar que el Filtro 6, sensible a la emisión de CO₂, muestra diferencias notables entre las condiciones experimentales. Las llamas en aire puro presentan emisión intensa y distribuida verticalmente a lo largo de la columna de gases calientes, indicando una producción significativa de CO₂ desde la base hasta la punta de la llama. En contraste, las condiciones diluidas con nitrógeno muestran emisión de CO₂ más débil y generalmente más cercana a la región del cono de fusión, especialmente en las condiciones de menor velocidad de flujo, sugiriendo una zona de reacción más compacta y potencialmente combustión incompleta en las zonas superiores de la llama. La condición 28+1, con 20 % O₂, presenta un comportamiento intermedio, con emisión moderada pero bien definida, lo que indica que esta composición mantiene una combustión relativamente eficiente a pesar de la ligera dilución. En la condición 25+4, la emisión en el Filtro 6 es notablemente menor a los otros casos, consistente con una llama débil y cerca del límite de extinción durante la mayor parte del tiempo de combustión registrado.

El Filtro 7, que captura emisión térmica de hollín y vapor de agua en la región espectral de 3,6-4,1 μm, revela información sobre la formación de partículas carbonosas y la estructura térmica de la llama. Las condiciones en aire puro muestran emisión intensa y localizada en el cono de fusión y en el sector alto de la llama, donde las temperaturas son más altas y la pirólisis del PMMA es más activa. A medida que la concentración de oxígeno disminuye,



la emisión en este filtro se reduce drásticamente, particularmente en las condiciones 25+4 y 79+7, donde apenas se distingue una región emisora por encima del cono. Esto sugiere que la dilución con nitrógeno no solo reduce la temperatura de la llama sino que también limita la formación de hollín, posiblemente debido a una menor disponibilidad de oxígeno para las reacciones de pirólisis que generan las partículas. Se debe notar que en estos casos existe también un efecto sobre el calor que se retroalimenta sobre el PMMA sólido, afectando su tasa de liberación y, por tanto, la inyección de combustible a la llama.

El Filtro 2, sensible a temperaturas bajas en el rango de 1,5-5,4 μm , permite visualizar tanto la llama como un poco de la zona de precalentamiento del cilindro. En las condiciones de aire puro, se observa una emisión extendida que abarca no solo la llama sino también una pequeña región por debajo del cono de fusión, indicando un calentamiento del PMMA sólido previo a su descomposición, es decir, la existencia de un heater length. Las condiciones diluidas muestran una zona de precalentamiento más o menos pronunciada, dependiendo del caso, lo que se relaciona a la relación entre transferencia de calor radiativo desde la llama al sólido y el efecto combinado de velocidad de flujo y cantidad de oxígeno en la temperatura y emisiones. Se debe destacar que, en la condición 25+4, se observa una emisión difusa que se extiende a lo largo de una porción considerable del cilindro, lo cual podría parecer contradictorio con la baja intensidad de combustión. Esta aparente anomalía se podría explicar a que el Filtro 2 esté detectando principalmente el calor residual almacenado en el cilindro de PMMA calentado durante la breve fase de combustión, más que una emisión llama activa.

El efecto de la velocidad del coflow también es relevante al comparar condiciones con composición similar. Por ejemplo, las condiciones 29, 86 y 141 (todas con 21 % O_2) muestran que el aumento de velocidad de 6,2 a 30,0 cm/s resulta en llamas progresivamente más cortas pero con emisión más concentrada, particularmente evidente en los Filtros 6 y 7. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor tasa de mezcla y a un incremento en el número de Reynolds del flujo, que intensifica la combustión pero reduce el tiempo de residencia de los gases en la zona de reacción. De manera similar, las condiciones 79+7 y 81+5, aunque con diferente contenido de O_2 (19 % y 20 % respectivamente), presentan morfologías de llama comparables cuando se ajusta por la velocidad del coflow, lo que se relaciona igualmente a una interacción compleja entre composición química y efectos fluidodinámicos.

Finalmente, la comparación de las tres series de imágenes en conjunto permite identificar patrones consistentes. Las condiciones con mayor contenido de oxígeno y menor velocidad de coflow (29, 28+1) producen conos largos con llamas extensas y brillantes, con emisión significativa en todos los filtros. Por otro lado, las condiciones con alta dilución de nitrógeno (25+4, 79+7) resultan en llamas débiles, cortas y con emisión radiativa mínima, siendo la condición 25+4 un caso donde la combustión autosostenida no es posible, estableciendo efectivamente un límite inferior de operación para el sistema experimental. Las condiciones intermedias (27+2, 81+5, 133+8) presentan comportamientos transicionales que reflejan el balance entre disponibilidad de oxígeno, velocidad del flujo y tasa de pirólisis del PMMA. Estos resultados cualitativos proporcionan una base sólida para el análisis posterior del heater length.

5.8.3. Análisis del heater length

El heater length (L_h) se determinó para cada condición experimental siguiendo el procedimiento descrito en la sección de metodología.

La Figura 5.43 ilustra el procedimiento de medición para la condición 29 (aire puro 21 % OI, 6,2 cm/s), mostrando las imágenes capturadas durante la combustión activa y en el instante inmediatamente posterior a la extinción forzada de la llama.

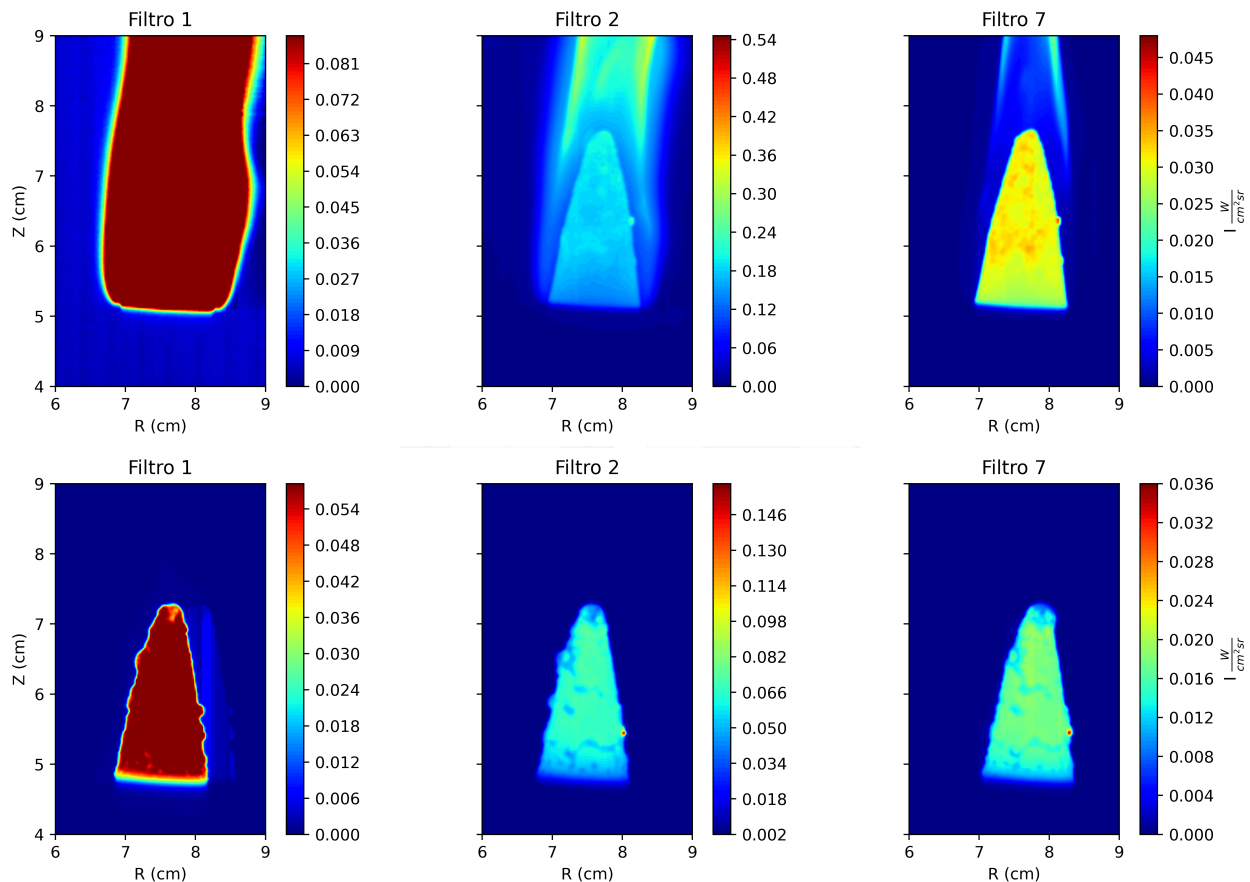


Figura 5.43: Imágenes infrarrojas durante la combustión activa (arriba) e inmediatamente después de la extinción forzada de la llama para la condición 29. Se muestran tres filtros espectrales: Filtro 1 (izquierda), Filtro 2 (centro) y Filtro 7 (derecha).

Durante la combustión activa, la intensidad radiativa de la llama domina la imagen en los Filtros 2 y 7, donde la emisión del cono de fusión (zona de máxima temperatura) alcanza valores de 0,54 y 0,048 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, respectivamente. El Filtro 1, al ser sensible a temperaturas más bajas, muestra una distribución espacial más extensa que incluye tanto la llama como una región de emisión moderada por debajo del cono de fusión, ligeramente visible alrededor

de $z = 5$ cm. Esta región corresponde al PMMA sólido que está siendo precalentado por la transferencia de calor desde la llama. Sin embargo, la superposición de la emisión intensa de la llama dificulta la determinación precisa del límite inferior de la zona de precalentamiento en estas condiciones.

Las imágenes capturadas en el instante inmediatamente posterior a la extinción de la llama permiten resolver esta ambigüedad, pues la emisión de los gases de combustión desaparece pero el calor residual en el cilindro de PMMA permanece detectable.

Tras la extinción, las imágenes revelan un patrón de emisión diferente. El Filtro 1 muestra una distribución espacial definida del calor residual, con intensidades que decrecen desde la base del cono hacia regiones inferiores donde el material permanece a temperatura ambiente. Los Filtros 2 y 7 exhiben patrones similares pero con intensidades máximas mayores en el caso del Filtro 2 (hasta $0,16 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$). Se debe notar que la intensidad se concentra en un punto de calor altamente visible en los Filtros 2 y 7, pero que no influye en la visibilidad del calor residual en el Filtro 1.

La Figura 5.44 presenta un acercamiento a la región crítica donde se realiza la medición del heater length, el cual se calcula como la distancia vertical desde la base del cono de fusión hasta el límite inferior de la zona de emisión detectable.

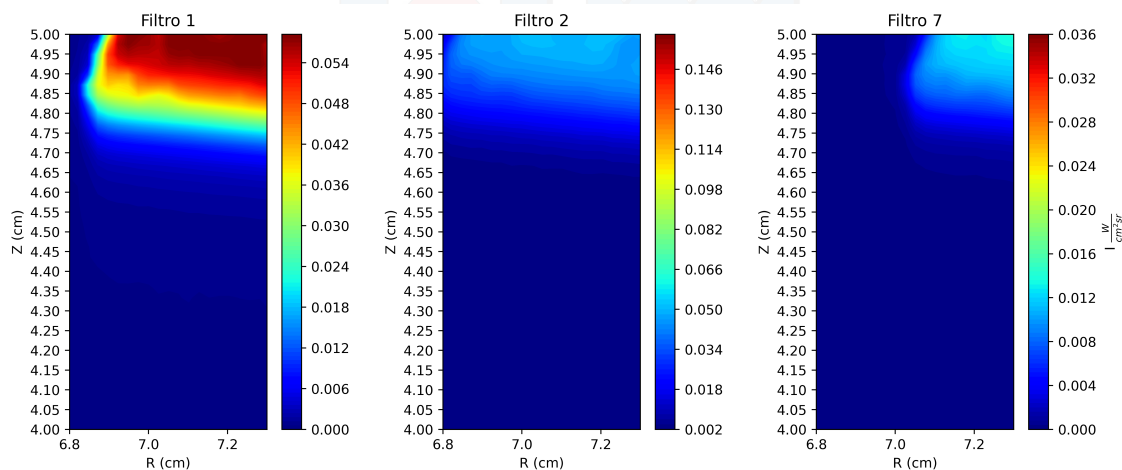


Figura 5.44: Acercamiento a la zona de precalentamiento en la condición 29 post-extinción.

La base del cono de fusión, z_{base} , es decir, el punto de máxima intensidad en la región inferior del cono, es claramente identificable en los tres canales y corresponde a $z_{\text{base}} \approx 4,8$ cm para la condición 29. Luego, el límite inferior de la zona de precalentamiento, $z_{\text{límite}}$, se identificó mediante umbralización en la intensidad radiativa. En base a la intensidad mínima detectable por encima del ruido de fondo, definida como 10% de la intensidad máxima en la región del cono, detectada en el Filtro 1, se obtuvo $z_{\text{límite}} \approx 4,37$ cm para esta condición.

De este modo, el heater length para la condición 29 resulta en:

$$L_h = z_{\text{base}} - z_{\text{límite}} = 4,80 - 4,37 = 0,43 \text{ cm} = 4,3 \text{ mm} \quad (5.1)$$

Aplicando el mismo procedimiento a todas las condiciones experimentales, se obtuvieron los valores de heater length resumidos en el Cuadro 5.9.

Tabla 5.9: Heater length medido para cada condición de atmósfera. Los valores corresponden al instante inmediatamente posterior a la extinción de la llama, determinados mediante análisis de las imágenes obtenidas en el Canal 1.

Condición	O ₂ (%)	Velocidad (cm/s)	z_{base} (cm)	$z_{\text{límite}}$ (cm)	L_h (mm)
29	21	6,2	4,80	4,37	4,3
86	21	18,3	2,60	2,20	4,0
141	21	30,0	3,45	3,10	3,5
25+4	18	6,2	5,20	3,95	12,5
27+2	19	6,2	3,25	2,85	4,0
79+7	19	18,3	3,95	3,40	5,5
28+1	20	6,2	3,25	2,95	3,0
81+5	20	18,3	3,45	3,02	4,3
133+8	20	30,0	3,70	3,15	5,5

Los resultados muestran una dependencia compleja del heater length con la concentración de oxígeno y la velocidad del coflow. A continuación, la Figura 5.45 presenta la evolución del heater length en función del índice de oxígeno para las tres velocidades de coflow ensayadas.

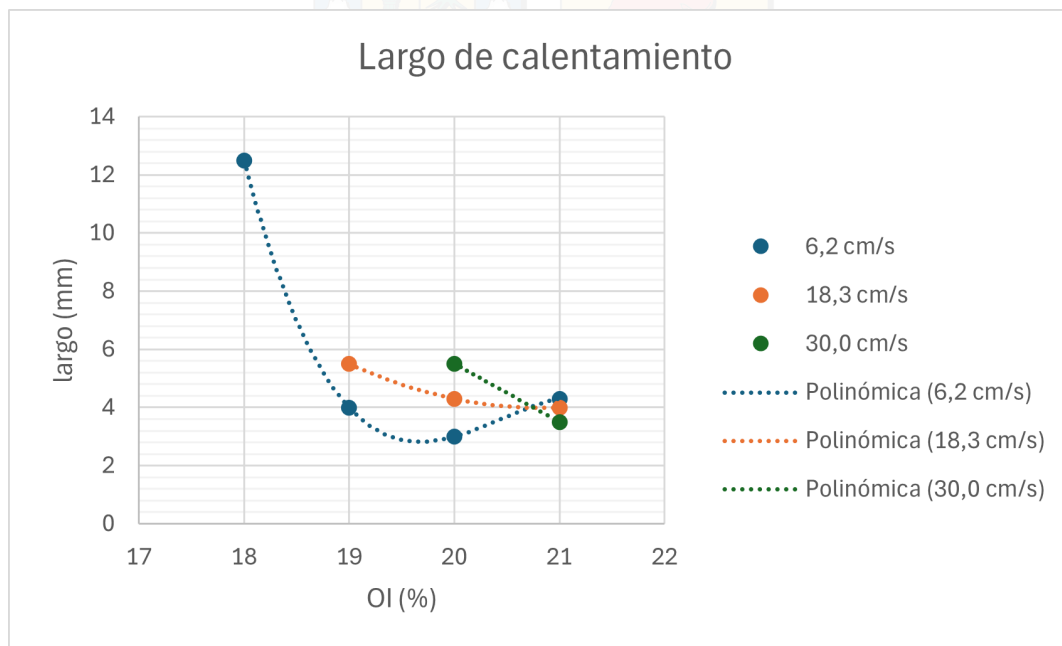


Figura 5.45: Heater length en función del índice de oxígeno (OI) para las tres velocidades de coflow. Las líneas punteadas representan ajustes polinómicos de segundo orden.

El valor más alto de heater length se registró en la condición 25+4 (18 % O₂, 6,2 cm/s), alcanzando $L_h = 12,5$ mm. Este valor es significativamente superior al resto de las mediciones y se puede relacionar con la extinción espontánea observada en esta condición. Como se comentó anteriormente, en esta condición la llama se extinguió por sí sola, sin lograr establecer un régimen estacionario. La longitud de precalentamiento excepcionalmente grande podría reflejar un proceso transitorio de calentamiento donde la llama débil transfirió calor al cilindro durante un período extendido antes de apagarse, sin alcanzar la tasa de pirólisis necesaria para mantener una combustión sostenida.

La dependencia de L_h con el contenido de oxígeno sigue una curvatura negativa. Para la velocidad de 6,2 cm/s, el heater length disminuye drásticamente de 12,5 mm a 18 % O₂ hasta alcanzar aproximadamente 4,0 mm a 19 % O₂ (reducción del 68 %), alcanzando un mínimo de 3,0 mm a 20 % O₂ y luego aumentando ligeramente a 4,3 mm a 21 % O₂. Esta reducción refleja el cambio cualitativo en el régimen de combustión: mientras que a 18 % la llama está al borde de la extinción y la transferencia de calor es mínima, a 19 % se puede establecer una combustión sostenible con flujo de calor radiativo suficiente para mantener una zona de precalentamiento compacta.

Las curvas para las velocidades de 18,3 y 30,0 cm/s muestran menor sensibilidad al contenido de oxígeno en el rango estudiado, con variaciones de L_h más moderadas. Sin embargo, es importante notar que estas series no incluyen el punto a 18 % O₂, lo que limita la comparación directa. En el rango 19-21 % O₂, se observa una ligera tendencia a disminuir L_h con el aumento del contenido de oxígeno para las tres velocidades, convergiendo hacia valores de 3,5 – 4,3 mm en aire puro (21 % O₂). Esta convergencia sugiere que el contenido de oxígeno es el factor dominante en la determinación de L_h cuando la combustión es estable, siendo la zona de precalentamiento menos sensible a los detalles del campo de flujo externo.

La excepción notable es la condición 28+1 (20 % O₂, 6,2 cm/s), que presenta el valor más bajo de $L_h = 3,0$ mm, posiblemente indicando una condición óptima de transferencia de calor para esta configuración geométrica y de flujo.

Los ajustes polinómicos de segundo grado proporcionan una descripción razonable de los datos experimentales, reflejando la existencia de un límite inferior de L_h determinado por las propiedades del material y la intensidad máxima de transferencia de calor alcanzable, y un límite superior relacionado con la extinción de la llama cuando la transferencia de calor es insuficiente.

5.8.4. Análisis de Intensidad Radiativa

Para cuantificar la emisión radiativa en cada condición experimental, se extrajeron perfiles de intensidad a lo largo de líneas verticales en posiciones radiales seleccionadas para capturar la zona de máxima emisión de cada llama. La Figura 5.46 muestra los perfiles de intensidad para el Filtro 6 en las nueve condiciones experimentales.

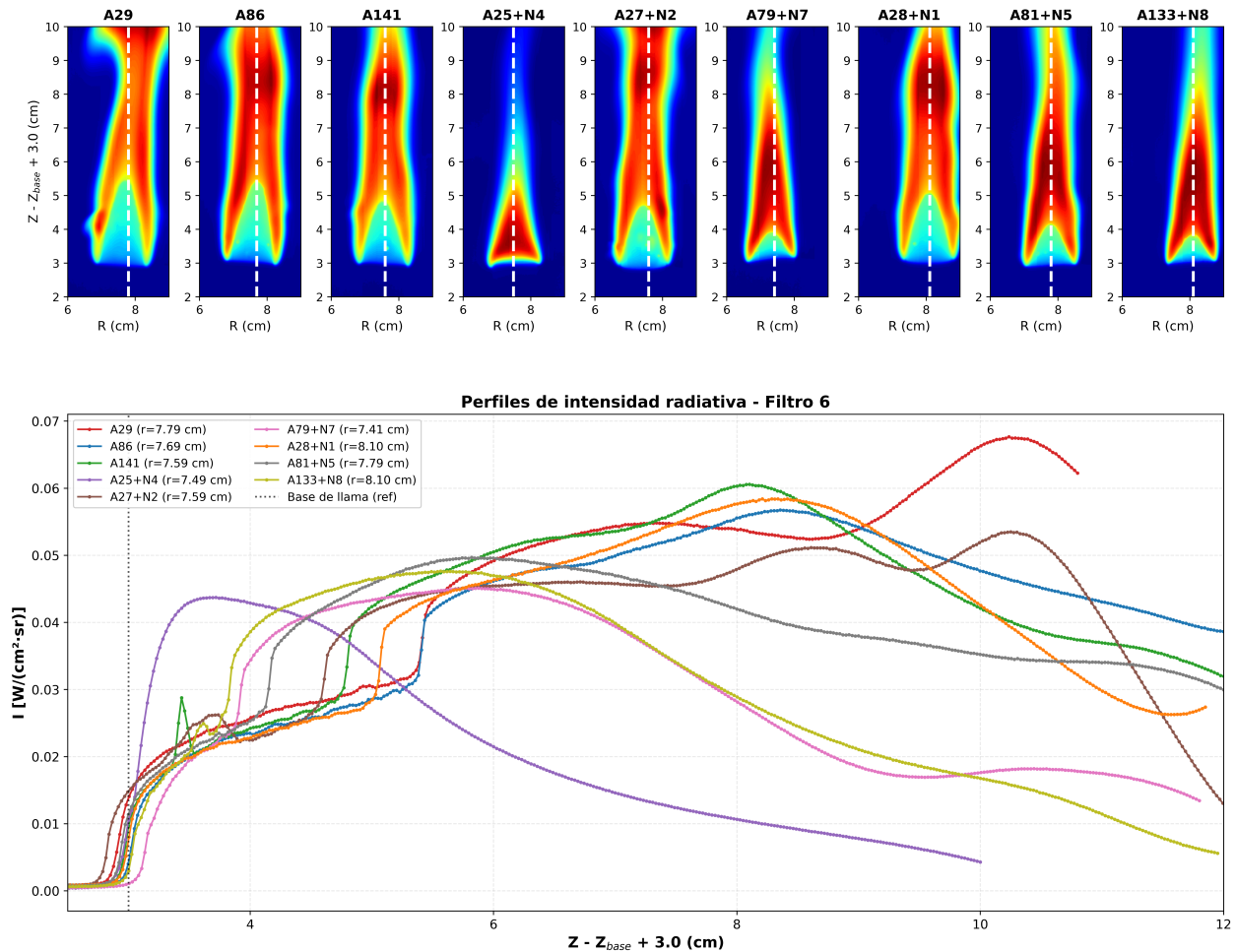


Figura 5.46: Arriba: Campos de intensidad radiativa en Filtro 6 (CO_2) durante la fase estable de combustión alineados en $z = 3$ cm. Abajo: Perfiles de intensidad $I(z)$ para las nueve condiciones de atmósfera.

Los perfiles del Filtro 6 revelan diferencias marcadas en la distribución espacial de la emisión según la composición de la atmósfera y la velocidad del coflow. La condición A29 (21% O_2 , 6,2 cm/s) presenta el máximo global de intensidad, alcanzando aproximadamente $0,067 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en $z \approx 9 - 11$ cm. Este perfil muestra un crecimiento gradual desde la base hasta alcanzar su pico en la zona media-superior de la llama, manteniendo valores elevados ($I > 0,05 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$) entre $z = 6 - 11$ cm. Este resultado sugiere que la combinación de alta disponibilidad de oxígeno con baja velocidad de coflow favorece tiempos de residencia prolongados y temperaturas elevadas, maximizando la producción y emisión de CO_2 .

Se debe notar que el efecto de la velocidad de coflow en atmósfera de 21% O_2 no es monótono. A86 (18,3 cm/s) exhibe un máximo considerablemente menor ($\approx 0,053 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$) ubicado en $z \approx 8 - 9$ cm, con un decaimiento pronunciado en la región superior. A141 (30,0 cm/s) muestra un comportamiento intermedio, con máximo de $\approx 0,060 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en

$z \approx 7 - 8$ cm. La reducción en intensidad al aumentar la velocidad de coflow puede atribuirse a menores tiempos de residencia de los gases reactivos en la zona de combustión, lo que limita la conversión completa del combustible y la temperatura máxima alcanzada.

La condición A25+N4 (18 % O_2 , 6,2 cm/s), con el menor contenido de oxígeno, presenta el perfil más débil y compacto. La intensidad alcanza un máximo de $I \approx 0,042$ W/(cm²·sr) entre $z \approx 3 - 5$ cm, para luego decrecer rápidamente. La ausencia de emisión significativa en alturas superiores ($z > 6$ cm) confirma una combustión severamente limitada por la disponibilidad de oxígeno, resultando en una llama corta donde la emisión de CO_2 se concentra únicamente cerca del cono de fusión.

Las condiciones con 19 % O_2 presentan perfiles contrastantes: A27+N2 (6,2 cm/s) muestra un máximo que se mantiene sin grandes variaciones en $z \approx 5 - 10$ cm, con decaimiento posterior, mientras que A79+N7 (18,3 cm/s) exhibe un pico más pronunciado ($\approx 0,045$ W/(cm²·sr)) en $z \approx 4 - 6$ cm seguido de decaimiento sostenido. Las condiciones con 20 % O_2 (A28+N1, A81+N5, A133+N8) muestran claramente el efecto de la velocidad de coflow: al aumentar de 6,2 a 30,0 cm/s, el máximo de intensidad disminuye de $\approx 0,057$ a $0,047$ W/(cm²·sr), mientras que su posición axial se desplaza de $z \approx 9$ cm a $z \approx 5 - 6$ cm. Los mapas 2D superiores confirman que el cono de fusión se reduce sistemáticamente con la velocidad, indicando que el mayor flujo convectivo acorta la llama y reduce el tiempo de residencia en la zona de combustión activa.

La extensión vertical de las llamas también varía sistemáticamente con el contenido de oxígeno. Las condiciones en aire puro (21 % O_2) mantienen emisión significativa hasta $z \approx 10 - 12$ cm, mientras que las condiciones con 18 - 19 % O_2 muestran generalmente un decaimiento más rápido, con la única excepción siendo la condición A27+N2. Esto es consistente con llamas más compactas en atmósferas diluidas, donde la menor disponibilidad de oxígeno limita la extensión de la zona de combustión activa y la producción total de productos gaseosos de combustión.

La Figura 5.47 presenta los perfiles de intensidad para el Filtro 7, sensible a la emisión de hollín incandescente y vapor de agua.

Los perfiles del Filtro 7 exhiben mayor complejidad que los del Filtro 6, reflejando la naturaleza intermitente y fluctuante de la emisión de hollín en llamas de PMMA.

A diferencia del Filtro 6, donde los máximos de emisión se localizan típicamente en la región superior de la llama, el Filtro 7 exhibe una estructura caracterizada por la presencia de múltiples zonas de emisión con una marcada estructura de doble pico en varias condiciones. Esta complejidad refleja la naturaleza dinámica de la formación, transporte y oxidación del hollín en las llamas de difusión del PMMA. A diferencia del CO_2 , cuya concentración aumenta casi monotónicamente a lo largo de la llama conforme progresa la combustión, el hollín presenta un ciclo más complejo: se forma en regiones ricas en combustible (cono de fusión), se oxida parcialmente en la zona posterior al cono, y puede persistir o regenerarse en las zonas altas de la llama.

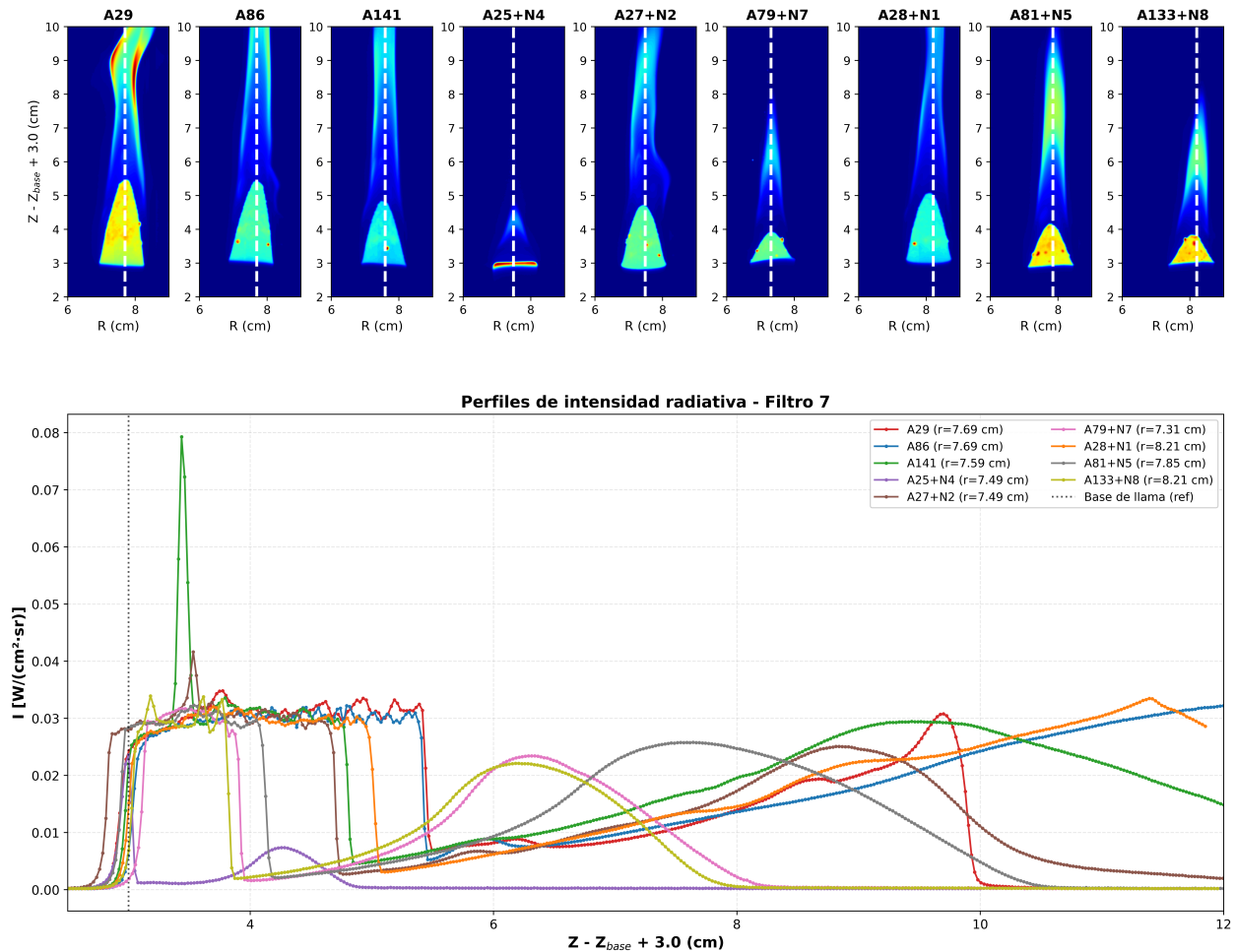


Figura 5.47: Arriba: Campos de intensidad radiativa en Filtro 7 (hollín + H_2O) durante la fase estable de combustión alineados en $z = 3$ cm. Abajo: Perfiles de intensidad $I(z)$ para las nueve condiciones de atmósfera.

La primera zona de emisión intensa se localiza en la región del cono de fusión ($z = 3 - 5$ cm), visible como una meseta o primer pico en la mayoría de los perfiles. Esta zona corresponde a la superficie del PMMA sólido en proceso de descomposición térmica, donde las temperaturas son suficientemente altas para que exista pirólisis vigorosa. El PMMA sólido emite radiación térmica como cuerpo negro debido a su alta emisividad, produciendo una emisión continua en todo el espectro infrarrojo que es captada por el Filtro 7. Esta emisión de cuerpo negro del sólido incandescente domina en la región del cono, donde la atmósfera es localmente rica en vapores de hidrocarburos y comienza la formación inicial de hollín. Condiciones como A29, A86, y A28+N1 presentan mesetas extendidas con intensidades sostenidas de $I \approx 0,030 - 0,035 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, relacionadas con sus conos de fusión más desarrollados y, por ende, mayor área superficial emitiendo como cuerpo negro.

Un caso destacable es A141 (21 % O_2 , 30,0 cm/s), que presenta el pico más agudo e intenso



del Filtro 7, alcanzando $I \approx 0,080 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en $z \approx 3 - 3,5 \text{ cm}$. Este pico estrecho y pronunciado, seguido de una caída a valores más regulares, sugiere que la alta velocidad del coflow comprime severamente el cono de fusión, generando una zona muy localizada de pirólisis intensa donde las tasas de producción de hollín son máximas y la temperatura se eleva.

La presencia de la segunda zona es notable en varios de los perfiles observados. Por ejemplo, A28+N1 (20% O_2 , 6,2 cm/s) exhibe una meseta en $z = 3 - 5 \text{ cm}$, caída en $z \approx 5 - 6 \text{ cm}$, y posteriormente un aumento gradual hasta el segundo máximo en $z \approx 11 \text{ cm}$. De manera similar, A133+N8 (20% O_2 , 30,0 cm/s) muestra un primer pico en $z \approx 3 - 4 \text{ cm}$, seguido de valle y un segundo máximo comparable en $z \approx 6 \text{ cm}$. A141 también exhibe esta estructura: tras su pico extremo inicial y caída pronunciada, la intensidad vuelve a crecer gradualmente hasta alcanzar $I \approx 0,030 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en $z \approx 9 \text{ cm}$.

Esta estructura sugiere dos mecanismos físicos y fuentes de radiación distintas: la primera zona ($z = 3 - 5 \text{ cm}$) está dominada por la emisión de cuerpo negro del PMMA sólido incandescente en el cono de fusión, mientras que el valle en $z = 5 - 7 \text{ cm}$ indica una zona donde el hollín generado inicialmente comienza a oxidarse al mezclarse con el aire del coflow. El segundo máximo en $z = 6 - 11 \text{ cm}$, refleja emisión principalmente de hollín en fase gaseosa que no ha sido completamente oxidado o que se ha formado secundariamente en regiones donde aún prevalecen condiciones localmente ricas. Esta transición de emisión de sólido (cuerpo negro) a emisión de partículas en fase gaseosa (hollín) explica la complejidad morfológica observada en los perfiles del Filtro 7, contrastando con la estructura más simple y monótona del Filtro 6, donde la emisión proviene exclusivamente del CO_2 .

Se debe notar la condición A25+N4 (18% O_2) confirma nuevamente su naturaleza límite: el perfil en F7 muestra emisión baja en $z < 5,5 \text{ cm}$, con un máximo de $I \approx 0,025 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en $z \approx 3 \text{ cm}$, seguido de decaimiento inmediato a valores de fondo y otro máximo menor de $I \approx 0,006 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ en $z \approx 4 - 4,5 \text{ cm}$. Esta emisión extremadamente débil sugiere una combustión tan limitada que apenas se produce hollín, y el poco que se forma es rápidamente oxidado debido a las bajas temperaturas de llama.

Se debe destacar que los perfiles en F7 exhiben mayor ruido y variabilidad que los de F6, reflejando la naturaleza inherentemente intermitente y turbulenta de los procesos de formación y transporte de hollín. Las fluctuaciones de alta frecuencia observadas en prácticamente todas las condiciones indican variaciones temporales rápidas en la concentración local de hollín, asociadas a fenómenos como flickering de la llama, desprendimiento de vórtices y fluctuaciones en la zona de mezcla. Esta variabilidad subraya que las imágenes capturadas representan instantáneas de un campo de flujo altamente dinámico.

A continuación, como medida global de la intensidad de combustión, se determinó el valor máximo de intensidad radiativa en cada imagen para los filtros 2, 6 y 7. Es importante notar que los valores obtenidos corresponden a los máximos observados y no necesariamente representan la emisión característica de la llama. En los Filtros 2 y 7 (ver Figura 5.39 y Figura 5.41) se ve la presencia de puntos de alta emisión muy localizados en varias de las

condiciones experimentales. Estos puntos brillantes elevan significativamente I_{\max} , sin reflejar necesariamente la intensidad global. Por tanto, los valores obtenidos deben interpretarse con cautela, considerando que pueden representar eventos transitorios o zonas muy localizadas de alta temperatura y concentración de emisiones. El Cuadro 5.10 resume los resultados.

Tabla 5.10: Intensidad radiativa máxima medida en fase estable de combustión de PMMA para tres filtros espectrales. Valores en $W/(cm^2 \cdot sr)$.

Condición	O ₂ (%)	I_{\max} F2	I_{\max} F6	I_{\max} F7
29	21	0,5430	0,0696	0,0479
86	21	0,7293	0,0595	0,0704
141	21	0,5868	0,0631	0,0841
25+4	18	0,1543	0,0450	0,0265
27+2	19	0,4250	0,0536	0,0663
79+7	19	0,3465	0,0471	0,0643
28+1	20	0,5876	0,0599	0,0793
81+5	20	0,3293	0,0512	0,0457
133+8	20	0,3036	0,0479	0,0444

Para estudiar una posible correlación, la Figura 5.48 presenta los valores de intensidad máxima en función del contenido de oxígeno para el Filtro 6.

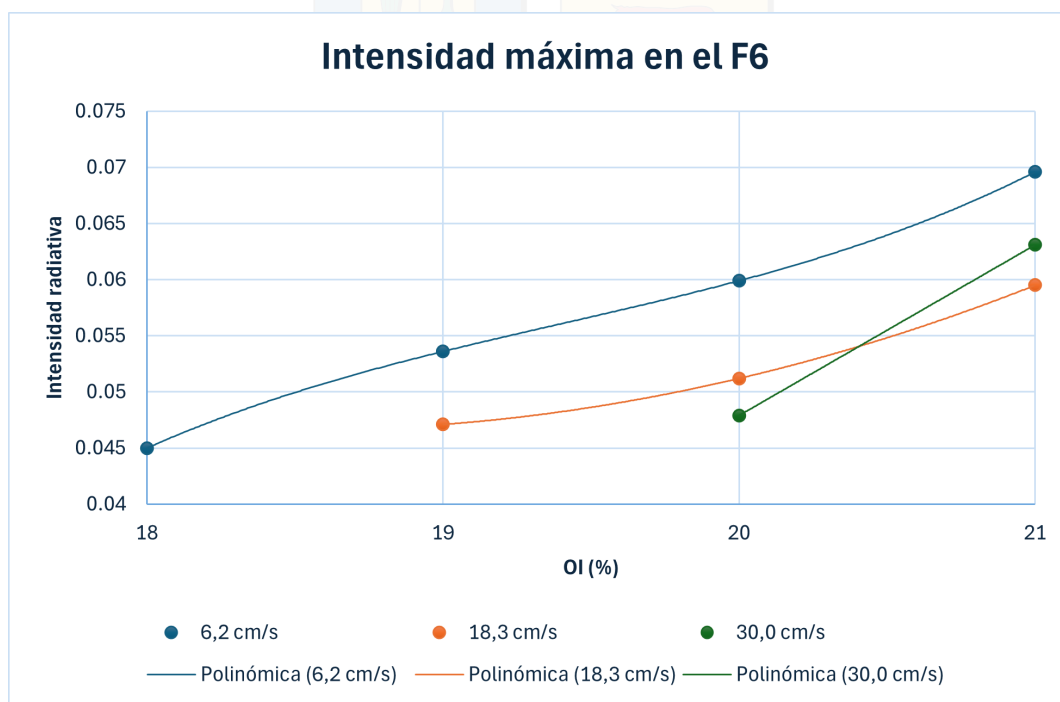


Figura 5.48: Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 6

En el Filtro 6, los valores de I_{\max} varían entre 0,0450 y 0,0696 W/(cm²· sr), representando una variación del 55 % entre el mínimo (A25+N4, 18 % O₂) y el máximo (A29, 21 % O₂). Se observa una tendencia general al aumento de I_{\max} con el contenido de oxígeno para las tres velocidades de coflow, aunque la correlación no es estrictamente lineal. Las condiciones con velocidad baja (6,2 cm/s) tienden a exhibir valores ligeramente superiores, particularmente en aire puro donde A29 alcanza el máximo absoluto. Este filtro, al ser más selectivo espectralmente y sensible principalmente a la emisión de CO₂, muestra distribuciones espaciales más uniformes sin la presencia marcada de hot spots, lo que hace que I_{\max} sea más representativo de la intensidad de emisión característica de la llama.

Luego, la Figura 5.49 presenta los valores de Intensidad máxima según velocidad de coflow para el Filtro 2.

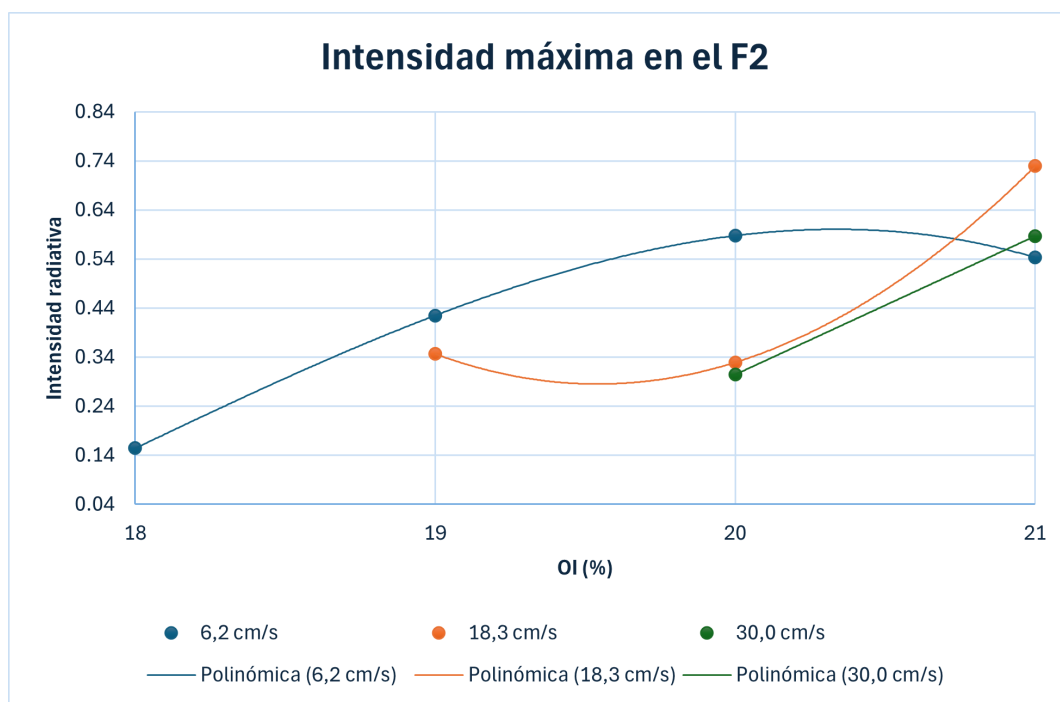


Figura 5.49: Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 2

El Filtro 2 muestra intensidades máximas significativamente mayores que F6 y F7, variando entre 0,1543 y 0,7293 W/(cm²· sr). El valor máximo se registra en A86 (21 % O₂, 18,3 cm/s), seguido por A28+N1 (20 % O₂, 6,2 cm/s) con 0,5876 W/(cm²· sr) y A141 (21 % O₂, 30,0 cm/s) con 0,5868 W/(cm²· sr). Sin embargo, como se observa en la Figura 5.39, estos valores elevados corresponden a hot spots muy localizados que no representan la emisión típica de la llama. La presencia de estos puntos brillantes, posiblemente asociados a eventos transitorios de alta temperatura o acumulación local de hollín incandescente, introduce alta variabilidad en los resultados y dificulta establecer tendencias claras con los parámetros experimentales.

Finalmente, la Figura 5.50 presenta los valores de Intensidad máxima según velocidad de coflow para el Filtro 7.

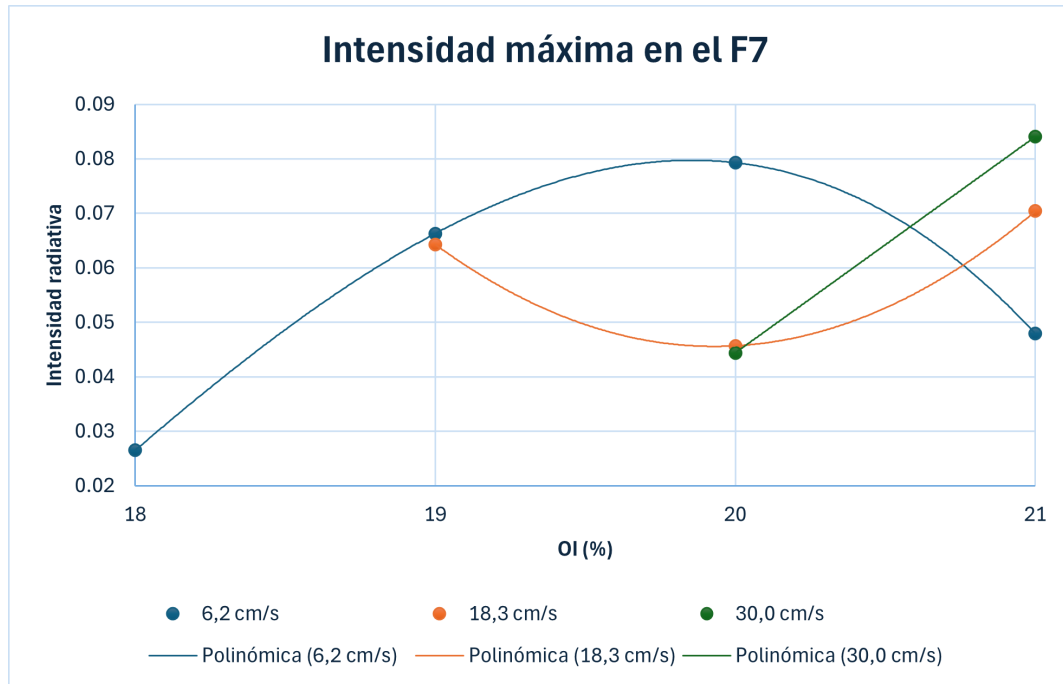


Figura 5.50: Gráfico de intensidades máximas medidas durante la combustión de PMMA en el filtro 7

En el Filtro 7, las intensidades máximas muestran mayor dispersión, variando entre 0,0265 y 0,0841 $W/(cm^2 \cdot sr)$. Las condiciones con mayor velocidad de coflow tienden a exhibir valores más altos: A141 (30,0 cm/s) alcanza el máximo absoluto, seguido por A28+N1 con 0,0793 $W/(cm^2 \cdot sr)$ y A86 con 0,0704 $W/(cm^2 \cdot sr)$. El valor extremadamente alto de A141 corresponde al pico agudo observado en su perfil de intensidad en $z \approx 3 - 3,5$ cm, resultado de la compresión severa del cono de fusión por la alta velocidad de coflow. Al igual que en F2, la presencia de hot spots indica que estos valores máximos capturan eventos transitorios intensos más que la emisión sostenida de la llama.

En resumen, mientras que los valores de I_{max} en el Filtro 6 proporcionan una medida razonablemente representativa de la intensidad de emisión de la llama, los valores en Filtros 2 y 7 están fuertemente influenciados por hot spots localizados que no reflejan la emisión global. Esto subraya la importancia de analizar no solo los valores máximos puntuales sino también los perfiles de intensidad y la distribución espacial completa para caracterizar adecuadamente el comportamiento radiativo de las llamas de PMMA.

5.9. Limitaciones y desafíos identificados en el Experimento con PMMA

5.9.1. Principales conclusiones del experimento de PMMA

Los experimentos de combustión de PMMA en configuración vertical con coflow controlado han permitido validar las capacidades de la cámara infrarroja multiespectral Telops MS-M1K para caracterizar fenómenos de combustión de sólidos con alto contenido de hollín. Se identificaron cuatro fases claramente diferenciables en el proceso de combustión (ignición, establecimiento, fase estable y apagado), cada una con características espectrales y morfológicas distintivas capturadas por los diferentes filtros de la cámara.

El análisis cualitativo reveló una fuerte dependencia de la morfología de llama y la intensidad de emisión con la composición de la atmósfera. Las condiciones en aire puro (21 % O₂) produjeron las llamas más intensas y alargadas, mientras que atmósferas diluidas con nitrógeno resultaron en combustión significativamente más débil. La condición 25+4 representó un caso donde la combustión no logró sostenerse, estableciendo el límite inferior de inflamabilidad para la configuración experimental empleada y proporcionando información valiosa sobre las condiciones mínimas necesarias para mantener la pirólisis autosostenible del PMMA.

El heater length, medido mediante análisis de imágenes post-extinción, mostró una dependencia compleja con el contenido de oxígeno y la velocidad del coflow. Los valores obtenidos para condiciones estables variaron entre 3,0 y 5,5 mm, con la condición 25+4 exhibiendo un valor bastante alto ($L_h = 12,5$ mm), reflejando su carácter transitorio. Las tendencias observadas sugieren que el balance térmico en la zona de precalentamiento está controlado por la transferencia radiativa desde la llama, modulada por efectos convectivos del coflow.

Los diferentes filtros espectrales de la cámara proporcionaron información complementaria sobre la estructura de la llama y el campo térmico. El Filtro 6, sensible a la emisión de CO₂, permitió visualizar la zona de combustión activa y su extensión vertical, revelando diferencias entre condiciones ricas y pobres en oxígeno. El Filtro 7, capturando emisión de hollín y vapor de agua, mostró concentración de partículas en lo alto de la llama y en el cono de fusión. El Filtro 1, sensible a temperaturas más bajas, resultó fundamental para identificar la zona de precalentamiento del PMMA sólido en las imágenes post-extinción donde la emisión de la llama no interfiere con la detección del calor residual.

5.9.2. Limitaciones del trabajo actual

El trabajo experimental presenta varias limitaciones importantes que deben ser reconocidas al interpretar las conclusiones:

1. **Ausencia de repeticiones experimentales:** Cada condición de atmósfera se ensayó una única vez, lo que impide cuantificar la variabilidad experimental y calcular incer-

tidumbres estadísticas robustas. Los comportamientos anómalos observados en algunas condiciones podrían ser manifestaciones de variabilidad experimental en lugar de tendencias físicas reales. Sin repeticiones, es imposible distinguir entre estos dos escenarios.

2. **Procedimiento de medición del heater length:** Aunque sistemático, el procedimiento introduce elementos subjetivos que pueden afectar la reproducibilidad. La definición del umbral de intensidad (10 % del máximo) para identificar el límite inferior de la zona de precalentamiento es razonable pero arbitraria, y cambios moderados en este umbral (por ejemplo, usar 5 % o 15 %) resultarían en valores diferentes de L_h . Además, la detección de la base del cono de fusión en imágenes con geometrías irregulares (particularmente en la condición 25+4) introduce incertidumbre adicional.
3. **Caracterización limitada del campo térmico:** Restricción importante. Aunque las imágenes infrarrojas proporcionan información espacialmente resuelta de la intensidad radiativa, la conversión de esta intensidad a temperatura requiere conocimiento de la emisividad de cada especie (PMMA sólido, líquido, gases de combustión, hollín), que varía espacialmente y espectralmente. Sin mediciones independientes de temperatura mediante termopares o pirometría, no es posible validar los perfiles térmicos inferidos de las imágenes infrarrojas. Esta limitación afecta particularmente la interpretación física del heater length, ya que la relación entre intensidad radiativa y temperatura de precalentamiento no se estableció cuantitativamente.
4. **Control limitado de condiciones de contorno:** Durante el experimento se introduce variabilidad adicional. El procedimiento de ignición manual con soplete de propano también introduce variabilidad en las condiciones iniciales, potencialmente afectando la fase de establecimiento y, por transitividad, la morfología del cono que finalmente se estabiliza. La extinción forzada mediante soplado, aunque necesaria para detener el experimento en un tiempo razonable, no reproduce el proceso natural de extinción y puede afectar la distribución de temperatura residual medida para determinar L_h .
5. **Resolución temporal limitada:** El ciclo de 8 filtros se completa cada 0,8 segundos, con solo un snapshot por filtro cada 0,1 segundo. Esto, si se considera secuencialmente, impide resolver eventos rápidos durante la combustión. Aunque esta resolución es adecuada para caracterizar la fase estable, donde los cambios son lentos, resulta insuficiente para analizar en detalle las fases de ignición y establecimiento, o para capturar fluctuaciones de la llama que ocurren en escalas de tiempo de décimas de segundo.
6. **Detección de la zona de precalentamiento durante combustión activa:** Como se mencionó anteriormente, debido a que la emisión intensa de la llama domina la imagen y enmascara la emisión más débil del PMMA sólido precalentado, no se puede detectar la L_h durante la combustión. Este desafío motivó la estrategia de capturar imágenes inmediatamente post-extinción, donde el calor residual en el sólido puede detectarse sin interferencia de la llama. Sin embargo, esta aproximación asume que la distribución de temperatura en el sólido cambia lentamente después de la extinción,

lo cual es razonable pero no perfectamente válido debido a la conducción térmica que redistribuye el calor en escalas de tiempo de segundos.

5.9.3. Trabajo futuro

Los resultados de este trabajo y las limitaciones identificadas sugieren varias direcciones para investigación futura que permitirían profundizar la comprensión de la combustión de PMMA y mejorar la capacidad predictiva de modelos numéricos.

1. Mejoras en el diseño experimental:

- **Repeticiones múltiples:** Realizar al menos 3 repeticiones de cada condición experimental para cuantificar variabilidad y calcular incertidumbres estadísticas.
- **Sincronización con imágenes visibles:** Añadir una cámara de alta velocidad en el rango visible sincronizada con la cámara infrarroja para capturar simultáneamente la morfología visible de la llama (estructura, color, fluctuaciones) y su emisión infrarroja. Esto permitirá correlacionar eventos en ambos dominios espectrales.
- **Control ambiental mejorado:** Realizar experimentos en cámara de combustión cerrada con control de temperatura, humedad y ausencia de corrientes de aire, minimizando variabilidad por condiciones de contorno.

2. Extensión del rango de condiciones:

- **Variación de geometría:** Ensayar cilindros de diferentes diámetros (5 – 20 mm) para evaluar efectos de escala y validar si las tendencias observadas son robustas a cambios geométricos.
- **Otros polímeros:** Aplicar la misma metodología a otros polímeros termoplásticos como el PMMA transparente para evaluar la generalidad de las observaciones.

3. Desarrollo metodológico:

- **Automatización del análisis:** Desarrollar algoritmos de visión por computadora basados en aprendizaje automático para automatizar completamente la detección del cono de fusión, la base de la llama y los límites de la zona de precalentamiento, eliminando subjetividad y mejorando reproducibilidad.
- **Integración con modelo físico:** Desarrollar un modelo físico semi-empírico que relacione heater length con parámetros operacionales (contenido de O₂, velocidad de coflow, diámetro del cilindro) y propiedades del material (conductividad térmica, calor específico, entalpía de pirólisis), calibrado con los datos experimentales. Esto facilitaría predicciones para condiciones no ensayadas.



En resumen, aunque el trabajo actual ha demostrado el potencial de la cámara infrarroja multiespectral para caracterizar combustión de PMMA y ha proporcionado datos cualitativos y cuantitativos valiosos sobre el efecto de la composición de la atmósfera, queda claro que se requiere trabajo adicional significativo para alcanzar una comprensión cuantitativa completa del fenómeno. Las direcciones de investigación futura propuestas abordan sistemáticamente las limitaciones identificadas y establecen una hoja de ruta para estudios subsecuentes.





6. Conclusiones

Para finalizar, se sintetizan los principales hallazgos del trabajo, evaluando el cumplimiento de los objetivos planteados y proponiendo líneas de investigación futura que permitan extender y profundizar los resultados obtenidos.

6.1. Síntesis de Resultados

Este trabajo desarrolló y validó experimentalmente un modelo de transferencia radiativa multiespectral para llamas laminares axisimétricas con contenido variable de hollín. El modelo combina cálculos line-by-line de alta resolución para especies gaseosas (CO_2 , H_2O , CO) usando bases de datos HITRAN/HITEMP, con un modelo continuo de hollín, resolviendo numéricamente la ecuación de transferencia radiativa (RTE) en geometría axisimétrica. Los campos termodinámicos de entrada (T , f_v , X_{CO_2} , $X_{\text{H}_2\text{O}}$, X_{CO}) fueron obtenidos de simulaciones CFD con CoFlame, previamente validadas contra datos experimentales de Smooke et al. (2005) [5].

La validación experimental se realizó mediante comparación con mediciones infrarrojas realizadas con la cámara multiespectral Telops MS-M1K en llamas Yale 60 y Yale 80. Las imágenes sintéticas generadas reproducen cuantitativamente las mediciones experimentales con errores de entre 16-67 % según filtro y llama. El mejor acuerdo se observó en el filtro F6, mientras que las mayores discrepancias aparecieron en F5. Se identificó un sesgo sistemático de subestimación en la magnitud absoluta, atribuible principalmente a posible subestimación de los datos de entrada en las simulaciones CFD y a la incertidumbre inherente del modelo óptico de hollín.

El análisis de descomposición espectral reveló que la separabilidad entre contribuciones de gases y hollín depende críticamente del filtro utilizado y del contenido de hollín de la llama. En Yale 60 (bajo hollín), el filtro F6 mostró ser una banda casi pura para CO_2 , mientras que F7 resultó ser la primera banda donde el hollín compite efectivamente con los gases. En Yale 80 (alto hollín), aunque el hollín aumentó su contribución en todos los filtros, F6 mantuvo su pureza relativa para CO_2 , mientras que F7 y F8 mantuvieron una sensibilidad significativa tanto a H_2O como hollín dependiendo de la región de la llama observada, lo que sugiere que para el modelo de inversión se requiere una corrección cuidadosa por hollín en llamas ricas.

Los espectros de alta resolución extraídos en puntos representativos confirmaron las estructuras espectrales características de cada especie: la banda fundamental de CO_2 con estructura rotacional P-Q-R es claramente visible, las bandas de H_2O tienen estructura extremadamente densa debido a su geometría no-lineal, la banda de CO es la que tiene menor intensidad, y el continuo suave del hollín aumenta hacia frecuencias altas. Estos espectros permitieron entender por qué F6 captura casi únicamente CO_2 , con mínima interferencia de otras especies, y por qué F7 cae en una ventana espectral donde la absorción gaseosa es mínima, haciéndola ideal para detección de hollín.

El análisis de sensibilidad mediante elasticidades cuantificó como perturbaciones del 10 % en cada variable de entrada afectan la radiancia observada. La temperatura emergió como la variable dominante universal. El hollín mostró elasticidades crecientes con el contenido de f_v y en bandas de alta frecuencia. Las especies gaseosas presentaron elasticidades moderadas, suficientes para estimación robusta una vez conocidas temperatura y hollín. Basándose en estas elasticidades, se propuso una estrategia secuencial de inversión que maximiza la separabilidad espectral: estimar primero temperatura y CO_2 usando F6 en regiones de bajo hollín, luego f_v usando F7 en las alas de la llama, estimar H_2O con F8 corrigiendo por hollín conocido, y finalmente refinar CO con F5 manteniendo temperatura fija.

El experimento de pirólisis de PMMA demostró la aplicabilidad del método a configuraciones más complejas sin modelo CFD de referencia. Se caracterizaron cualitativamente nueve condiciones de atmósfera, observándose diferencias claras en morfología de llama, intensidad radiativa y balance gas/hollín. Se cuantificó el parámetro fenomenológico heater length (L_h), definido como la distancia entre la base visible de la llama y la zona calentada, encontrándose relaciones observables con la velocidad del coflow y el OI de la condición. Sin embargo, también se identificaron limitaciones importantes incluyendo la falta de más experimentos para validar las observaciones, la volatilidad de la llama que dificulta el promediado temporal, y la dificultad para detectar la zona de precalentamiento durante combustión activa.

6.2. Cumplimiento de Objetivos

El objetivo general de desarrollar y validar experimentalmente un modelo de transferencia radiativa directa para llamas laminares axisimétricas, que permita la separación de contribuciones espectrales de gases y hollín mediante mediciones multiespectrales infrarrojas, ha sido alcanzado completamente. El modelo implementado combina exitosamente cálculos LBL para gases con modelo continuo de hollín, resuelve numéricamente la RTE en geometría axisimétrica, y fue validado cuantitativamente contra mediciones experimentales en llamas con diferente contenido de hollín. La separación de contribuciones espectrales se demostró efectiva mediante el análisis de radiancias parciales y espectros de alta resolución, identificándose bandas óptimas para cada especie (F6 para CO_2 , F7 para hollín, F8 para H_2O).

Los cinco objetivos específicos también fueron cumplidos satisfactoriamente. Primero, se implementó el modelo de transferencia radiativa integrando cálculo LBL mediante la librería HAPI, modelo óptico de hollín, y solución numérica de RTE con integración sobre caminos ópticos en geometría 2D axisimétrica. Segundo, se validó el modelo mediante comparación con mediciones multiespectrales en Yale 60 y Yale 80. Tercero, se cuantificaron las contribuciones relativas de CO_2 , H_2O , CO y hollín mediante cálculo de radiancias parciales. Cuarto, se realizó análisis de sensibilidad calculando elasticidades para cinco variables, identificando la jerarquía en cada filtro de la cámara, y proponiendo una estrategia secuencial de inversión. Quinto, se demostró aplicabilidad en PMMA caracterizando nueve experimentos, cuantificando ratios espectrales y el parámetro L_h , aunque identificando desafíos metodológicos para el análisis cuantitativo completo.



6.3. Limitaciones del Trabajo

A pesar de los logros alcanzados, este trabajo presenta limitaciones que deben reconocerse. En el modelo, la omisión de gases menores (CH_4 , C_2H_2 , NO) puede resultar en contribuciones no cuantificadas. Los supuestos de LTE, no-dispersión y axisimetría perfecta, aunque razonables para llamas laminares, pueden fallar en bordes fríos o introducir errores en bandas de longitud de onda corta.

Experimentalmente, la incertidumbre de calibración combinada con la variabilidad natural de las llamas limita la precisión de las comparaciones, y el número restringido de bandas espectrales (4 filtros) resulta en un problema sub-determinado para separar cinco especies más temperatura. Las configuraciones estudiadas se limitaron a llamas laminares axisimétricas, mientras que aplicaciones prácticas frecuentemente involucran turbulencia y geometrías complejas.

El experimento de PMMA presentó limitaciones adicionales significativas. La transitoriedad con fluctuaciones durante la fase nominalmente estable limitó el promediado temporal, el control limitado de condiciones de contorno y uso de un soplete para la ignición podrían haber introducido variabilidad, y la ausencia de repeticiones experimentales impidió cuantificar robustamente la incertidumbre estadística.

6.4. Trabajo Futuro

Los resultados obtenidos abren múltiples líneas de investigación para profundizar y entender este trabajo. La prioridad principal es el desarrollo del problema inverso, implementando la estrategia secuencial propuesta y comparándola con inversión simultánea mediante optimización multi-objetivo. Esto requiere investigar métodos de regularización apropiados (Tikhonov, variación total), desarrollar funciones de costo que pesen bandas según sensibilidades, e incorporar información a priori como rangos físicos y correlaciones termodinámicas. La validación del problema inverso debe realizarse primero con experimentos sintéticos con ruido controlado, seguido de comparación con campos "ground truth" de CoFlame para Yale 60 y Yale 80, y finalmente validación contra mediciones experimentales directas de temperatura y f_v , cuando estén disponibles. Un análisis riguroso de propagación de incertidumbre permitiría cuantificar la calidad de las reconstrucciones.

El modelo directo también puede mejorarse significativamente. Evaluar modelos ópticos de hollín alternativos permitiría cuantificar el impacto de esta elección en los resultados. Añadir gases menores (CH_4 , C_2H_2 , NO) y evaluar su contribución podría mejorar el acuerdo en regiones actualmente discrepantes.

La extensión a configuraciones más complejas también es esencial para aplicabilidad práctica. Para llamas turbulentas, la axisimetría estadística (promediado en tiempo y/o ángulo azimutal) podría extender el método a pool fires y chorros turbulentos, requiriendo investigar estrategias de promediado temporal y estudiar correlaciones turbulencia-radiación que intro-



ducen efectos no-lineales. Para PMMA y otros materiales, es prioritario desarrollar calibración in-situ con fuentes de referencia a alta temperatura (> 1000 K), implementar algoritmos de inversión tomográfica 3D que no requieran simetría, y modelar la cámara completa incluyendo reflexiones en paredes y absorción por ventanas para corrección cuantitativa.

Las aplicaciones tecnológicas del método son prometedoras. En diagnóstico industrial, implementar un algoritmo de inversión optimizado para ejecución en tiempo real (< 1 s) con interfaz para procesamiento en línea permitiría monitorear temperatura y emisión de hollín en hornos (vidrio, cemento), calderas de biomasa para optimización de combustión, e incineradores de residuos para control de completitud. En seguridad contra incendios, el método podría aplicarse a detección temprana y caracterización mediante estimación de tasa de liberación de calor radiativo, identificación de material combustible por firma espectral, y seguimiento de evolución temporal.

7. Reflexión Final

Esta tesis establece las bases para una metodología robusta de caracterización no-invasiva de llamas mediante espectroscopía infrarroja multiespectral. Los resultados demuestran que la combinación de modelado de transferencia radiativa de alta fidelidad con mediciones experimentales calibradas permite cuantificar contribuciones de gases y hollín, validar simulaciones CFD, y orientar el diseño de algoritmos de inversión mediante análisis de sensibilidad.

La identificación de bandas espectrales óptimas y la caracterización de sus elasticidades proporcionan guías concretas para una estimación secuencial que minimice la propagación de errores.

El trabajo genera múltiples productos de valor: un modelo validado de transferencia radiativa, un dataset experimental de llamas Yale con mediciones multiespectrales, una caracterización completa de separabilidad espectral y sensibilidades, y una metodología aplicable a otras configuraciones. Estos productos establecen una plataforma sólida para trabajo futuro en problema inverso, extensión a turbulencia, aplicaciones industriales y desarrollo de nueva instrumentación.

Referencias

- [1] Telops Inc., High-performance infrared cameras, man-00052 rev 12. telops infrared cameras user's guide, Telops Inc. (2020).
- [2] P. Lagueux, E. Puckrin, C. S. Turcotte, M.-A. Gagnon, J. Bastedo, V. Farley, M. Chamberland, Airborne infrared hyperspectral imager for intelligence, surveillance and reconnaissance applications, in: *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI*, volume 8542, SPIE, 2012, pp. 583–592.
- [3] A. Huot, M. A. Gagnon, P. Lagueux, V. Farley, M. Chamberland, M. Kastek, Analysis of combustion reaction based on infrared multispectral imaging, *Measurement Automation Monitoring* 61 (2015) 165–168.
- [4] P. Tremblay, L. Belhumeur, M. Chamberland, A. Villemaire, P. Dubois, F. Marcotte, C. Belzile, V. Farley, P. Lagueux, Pixel-wise real-time advanced calibration method for thermal infrared cameras, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXI* 7662 (2010) 325–335.
- [5] M. Smooke, M. Long, B. Connelly, M. Colket, R. Hall, Soot formation in laminar diffusion flames, *Combustion and Flame* 143 (2005) 613–628. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218005002488>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.08.028>, special Issue to Honor Professor Robert W. Bilger on the Occasion of His Seventieth Birthday.
- [6] P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. Acosta, O. Adeyi, R. Arnold, A. B. Baldé, R. Bertollini, S. Bose-O'Reilly, J. I. Boufford, P. N. Breyse, et al., The lancet commission on pollution and health, *The lancet* 391 (2018) 462–512.
- [7] C. G. D. HERNANDEZ, Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos, Ph.D. thesis, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., 2016. URL: <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2244>.
- [8] D. Hoffmann, El impacto de hollín en los glaciares bolivianos, BMI–Instituto Boliviano de la Montaña (2014). URL: https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20140707-El_impacto_...pdf.
- [9] N. Huneus, A. Urquiza, E. Gayó, M. Osses, R. Arriagada, M. Valdés, N. Álamos, C. Amigo, D. Arrieta, K. Basoa, M. Billi, G. Blanco, J. Boisier, R. Calvo, I. Caselles, M. Castro, J. Chahuán, D. Christie, L. Cordero, V. Correa, J. Cortés, Z. Fleming, N. Gajardo, L. Gallardo, L. Gómez, X. Insunza, P. Iriarte, J. Labraña, F. Lambert, A. Muñoz, M. Opazo, R. O'Ryan, A. Osses, M. Plass, M. Rivas, S. Salinas, S. Santander, R. Seguel, P. Smith, S. Tolvett, El aire que respiramos: pasado, presente y futuro - Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile, Centro de Ciencia



- del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. (2020). URL: www.cr2.cl/contaminacion/.
- [10] J. Labraña, M. Billi, D. Arrieta Ruiz, A. Urquiza Gómez, Contaminación y sociedad: la construcción social de la polución atmosférica entre la prensa chilena y los planes de prevención y descontaminación atmosférica, *Universum* (Talca) 37 (2022) 519–538.
- [11] M. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Elsevier Science, 2013. URL: <https://books.google.cl/books?id=J2KZq0e4lCIC>.
- [12] H. Michelsen, Probing soot formation, chemical and physical evolution, and oxidation: A review of in situ diagnostic techniques and needs, *Proceedings of the Combustion Institute* 36 (2017) 717–735.
- [13] C. Holman, R. Harrison, X. Querol, Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in european cities, *Atmospheric Environment* 111 (2015) 161–169. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015300145>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.009>.
- [14] M. Oyarzún G., F. Lanás Z., M. Wolff R., A. Quezada L., Impacto del cambio climático en la salud, *Revista médica de Chile* 149 (2021) 738–746. URL: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872021000500738&nrm=iso.
- [15] D. R. Tree, K. I. Svensson, Soot processes in compression ignition engines, *Progress in energy and combustion science* 33 (2007) 272–309.
- [16] NIH, Hollín, Instituto nacional del cancer, 2015. URL: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/hollin>.
- [17] H. Omidvarborna, A. Kumar, D.-S. Kim, Recent studies on soot modeling for diesel combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015) 635–647.
- [18] A. J. Padilla Lauriano, E. F. Villegas Silva, Deposición de partículas de hollín en la superficie de las hojas de ficus (*ficus macrophylla*) como indicador de contaminación del aire en el ecosistema urbano de florida baja-chimbote, *Ecología aplicada* 17 (2018) 98–105.
- [19] R. A. Juárez Prera, Impacto de la contaminación atmosférica sobre la inflamación, estrés oxidativo y pronóstico a 1 año en pacientes ingresados por patología isquémica coronaria aguda (2015). doi:[10.1016/j.medcli.2013.05.024](https://doi.org/10.1016/j.medcli.2013.05.024).
- [20] J. C. Mora-Barrantes, J. P. Sibaja-Brenes, H. Borbón-Alpizar, Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla, *Revista Tecnología En Marcha* 34 (2021) 92–103.



- [21] E. Aránguez, J. M. Ordóñez, J. Serrano, N. Aragonés, R. Fernández-Patier, A. Gandarillas, I. Galán, Contaminantes atmosféricos y su vigilancia., *Revista Española de Salud Pública* 73 (1999) 123–132. URL: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200003&nrm=iso.
- [22] C. Arnal Forcada, R. Bilbao Duñabeitia, Á. Millera Peralta, Estudio de la reactividad en diversas atmósferas y caracterización de diferentes tipos de hollines representativos de motor diésel, Ph.D. thesis, Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad, ??? URL: <https://zaguan.unizar.es/record/13396>.
- [23] A. Cortés, I. Ridley, Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario: La ciudad de Temuco como caso de estudio, *Revista INVI* 28 (2013) 257–271. URL: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582013000200008&nrm=iso. doi:10.4067/S0718-83582013000200008.
- [24] World Health Organization, Addressing the Links between Indoor Air Pollution, Household Energy and Human Health, USAID, 2020. URL: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnacs621.pdf.
- [25] A. S. F. Tapia F., Determinación de la Fracción en Volumen de Hollín en una Llama de Difusión Laminar Axisimétrica, Ph.D. thesis, UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, 2011. URL: <https://hdl.handle.net/11673/56053>.
- [26] J. J. Cruz Villanueva, Medición de la distribución de temperaturas en llamas laminares axisimétricas usando pirometría de múltiples colores, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Trujillo, 2023.
- [27] C. A. Mantilla León, J. C. Tapia Romero, Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDI, mediante el uso de termografía infrarroja, B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2015. URL: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7694>.
- [28] J. Meléndez, G. Guarnizo, Cámara multiespectral de infrarrojo medio para mediciones precisas de temperatura y densidad de columna en llamas, *Congreso Español de Meteorología* (2022). URL: https://congresodemetrologia.cem.es/documentos/A4_SP2-R160-P.pdf.
- [29] M. Planck, The theory of heat radiation, *Entropie* 144 (1900) 164.
- [30] P.-M. Robitaille, Kirchhoff's law of thermal emission: 150 years, *Progr. Phys* 4 (2009) 3–13.
- [31] J. R. Howell, M. P. Mengüç, K. Daun, R. Siegel, *Thermal radiation heat transfer*, CRC press, 2020.



- [32] L. S. Rothman, I. Gordon, R. Barber, H. Dothe, R. R. Gamache, A. Goldman, V. Perevalov, S. Tashkun, J. Tennyson, Hitemp, the high-temperature molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 111 (2010) 2139–2150.
- [33] H. Lorentz, The absorption and emission lines of gaseous bodies, in: Knaw, proceedings, volume 8, 1906, pp. 1905–1906.
- [34] I. E. Gordon, L. S. Rothman, C. Hill, R. V. Kochanov, Y. Tan, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, A. Campargue, K. Chance, et al., The hitran2016 molecular spectroscopic database, *Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer* 203 (2017) 3–69.
- [35] R. V. Kochanov, HITRAN Application Programming Interface (HAPI) User Guide, 4.3 ed., Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Atomic and Molecular Physics Division, 60 Garden St, Cambridge MA 02138, USA, 2019. URL: <https://zenodo.org/collection/user-hapi>, manual ver. 4.3.
- [36] R. Raman, J.-L. Consalvi, S. Zaleski, G. Legros, Performances of approximate radiative property models for conditions met in ammonia combustion, *International Journal of Thermal Sciences* 213 (2025) 109777.
- [37] F. Liu, K. A. Thomson, G. J. Smallwood, Soot temperature and volume fraction retrieval from spectrally resolved flame emission measurement in laminar axisymmetric coflow diffusion flames: Effect of self-absorption, *Combustion and Flame* 160 (2013) 1693–1705. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218013000497>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.02.007>.
- [38] A. Huot, M.-A. Gagnon, K.-A. Jahjah, P. Tremblay, S. Savary, V. Farley, P. Lagueux, É. Guyot, M. Chamberland, F. Marcotte, Time-resolved multispectral imaging of combustion reactions, in: *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XII; and Quantum Information Science and Technology*, volume 9648, SPIE, 2015, pp. 13–21.
- [39] G. Goviazin, A. Shirizly, D. Rittel, A comparative study of the performance of ir detectors vs. high-speed cameras under dynamic loading conditions, *Experimental Mechanics* 63 (2023) 115–124.
- [40] S. Adler-Golden, P. Conforti, M. Gagnon, P. Tremblay, M. Chamberland, Long-wave infrared surface reflectance spectra retrieved from telops hyper-cam imagery, in: *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX*, volume 9088, SPIE, 2014, pp. 247–254.
- [41] T. Inc., How to interpret images from infrared cameras. technical note, 2018. URL: <https://www.telops.com/resources/>.



- [42] G. Linteris, M. Zammarano, B. Wilthan, L. Hanssen, Absorption and reflection of infrared radiation by polymers in fire-like environments, *Fire and Materials* 36 (2012) 537–553.
- [43] T. Kashiwagi, Effects of sample orientation on radiative ignition, *Combustion and Flame* 44 (1982) 223–245.
- [44] M. Chaos, M. M. Khan, N. Krishnamoorthy, J. L. De Ris, S. B. Dorofeev, Evaluation of optimization schemes and determination of solid fuel properties for cfd fire models using bench-scale pyrolysis tests, *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2011) 2599–2606.
- [45] M. Thomsen, J. J. Cruz, F. Escudero, C. Fernandez-Pello, A. Fuentes, Sooting behavior on a spreading flame over pmma rods under different oxygen concentrations, *Fire Safety Journal* 141 (2023) 103967.
- [46] N. A. Eaves, Q. Zhang, F. Liu, H. Guo, S. B. Dworkin, M. J. Thomson, Coflame: A refined and validated numerical algorithm for modeling sooting laminar coflow diffusion flames, *Computer Physics Communications* 207 (2016) 464–477.
- [47] H.-c. Chang, T. T. Charalampopoulos, Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences* 430 (1990) 577–591. doi:[10.1098/rspa.1990.0107](https://doi.org/10.1098/rspa.1990.0107).
- [48] C. P. Thurgood, A. Pollard, H. A. Becker, The TN quadrature set for the discrete ordinates method, *Journal of Heat Transfer* 117 (1995) 1068–1070. doi:[10.1115/1.2836292](https://doi.org/10.1115/1.2836292).
- [49] F. Liu, G. J. Smallwood, An efficient approach for the implementation of the snb based correlated-k method and its evaluation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 84 (2004) 465–475.
- [50] N. A. Slavinskaya, P. Frank, A modelling study of aromatic soot precursors formation in laminar methane and ethene flames, *Combustion and Flame* 156 (2009) 1705–1722.

Anexo

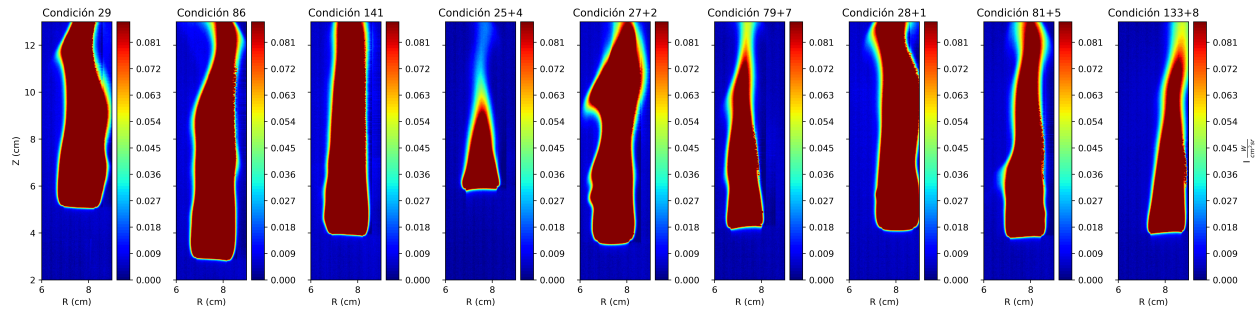


Figura 1: Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 con escalas de color independientes para cada condición experimental.

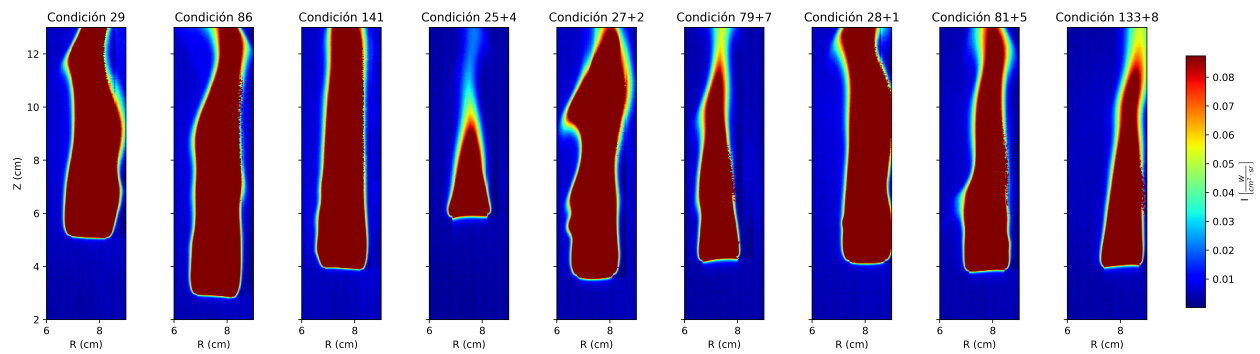


Figura 2: Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 con escala de color común.

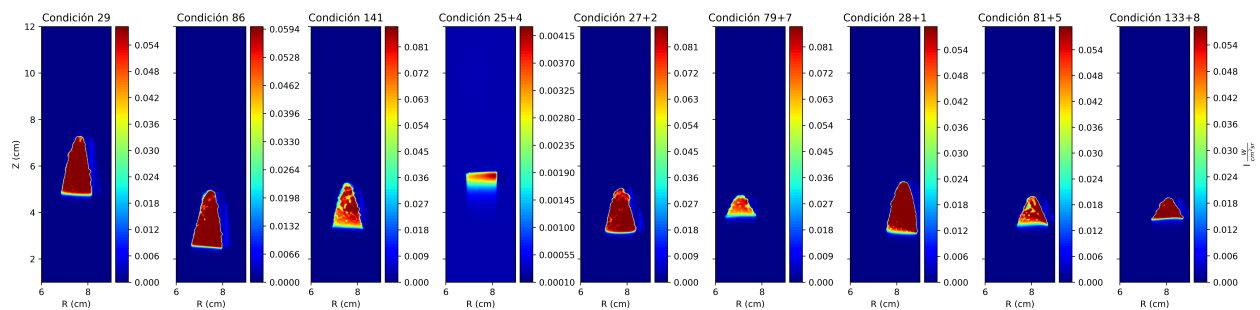


Figura 3: Campos de intensidad radiativa en Filtro 1 en el momento posterior al apagado.

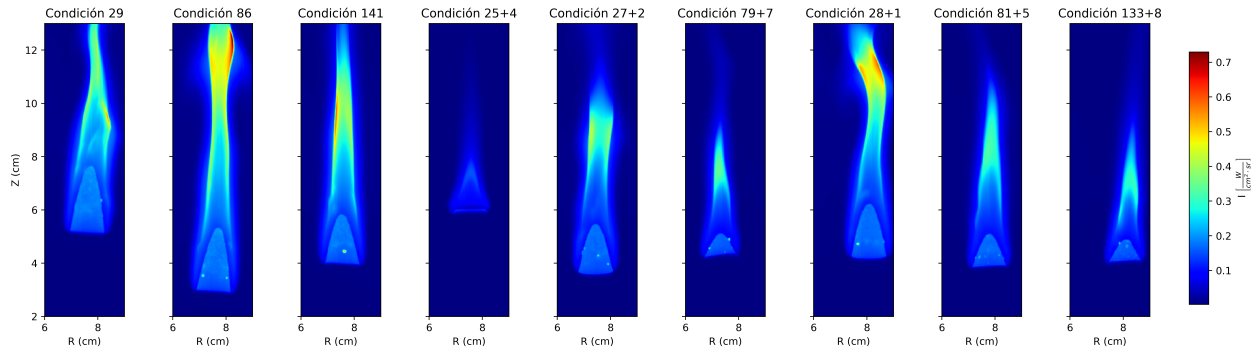


Figura 4: Campos de intensidad radiativa en Filtro 2 con escala de color común.

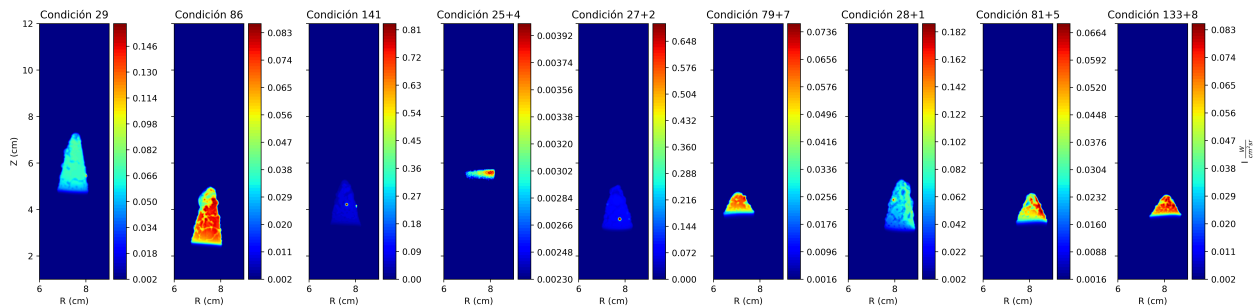


Figura 5: Campos de intensidad radiativa en Filtro 2 en el momento posterior al apagado.

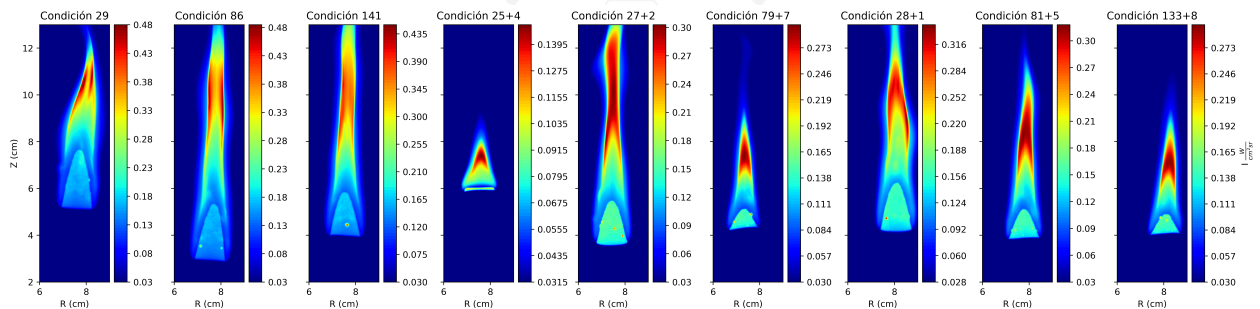


Figura 6: Campos de intensidad radiativa en Filtro 3 con escalas de color independientes para cada condición experimental.

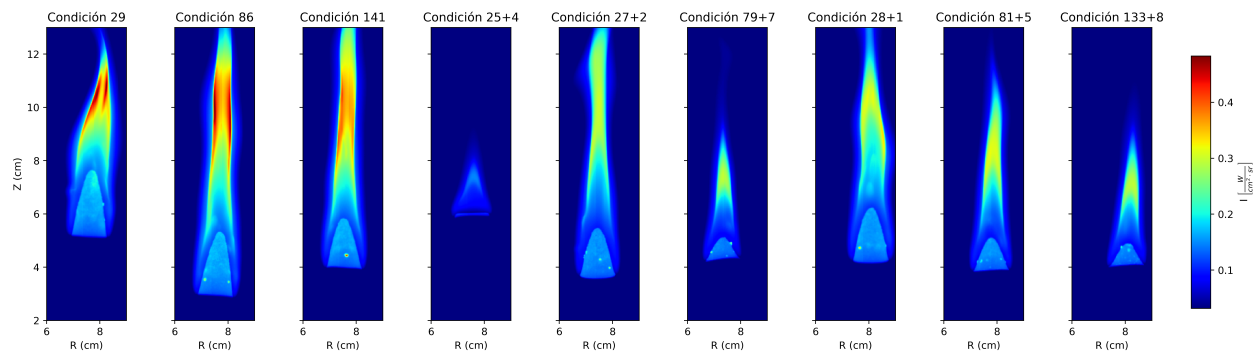


Figura 7: Campos de intensidad radiativa en Filtro 3 con escala de color común.

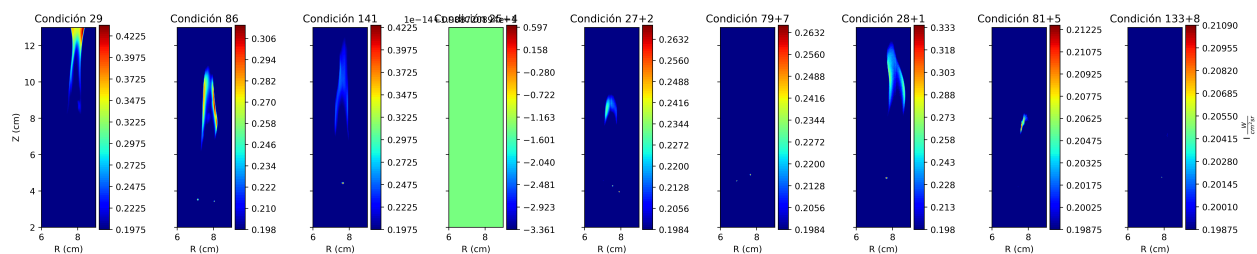


Figura 8: Campos de intensidad radiativa en Filtro 4 con escalas de color independientes para cada condición experimental.

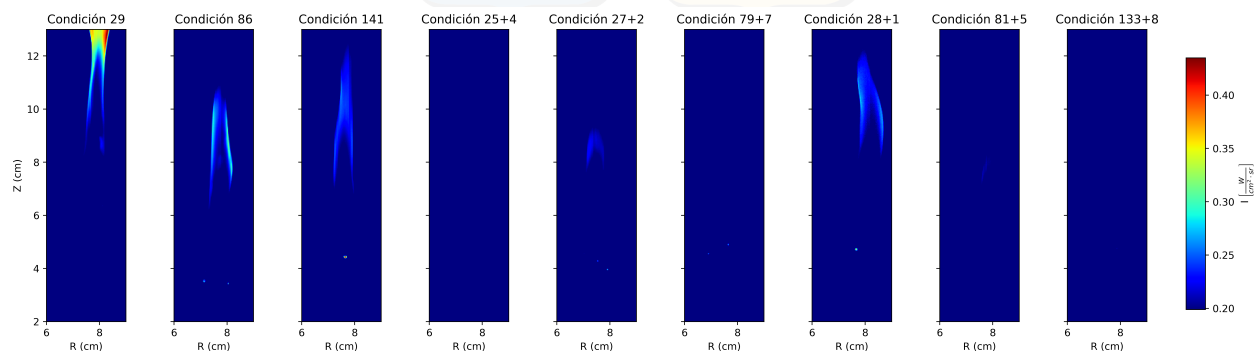


Figura 9: Campos de intensidad radiativa en Filtro 4 con escala de color común.

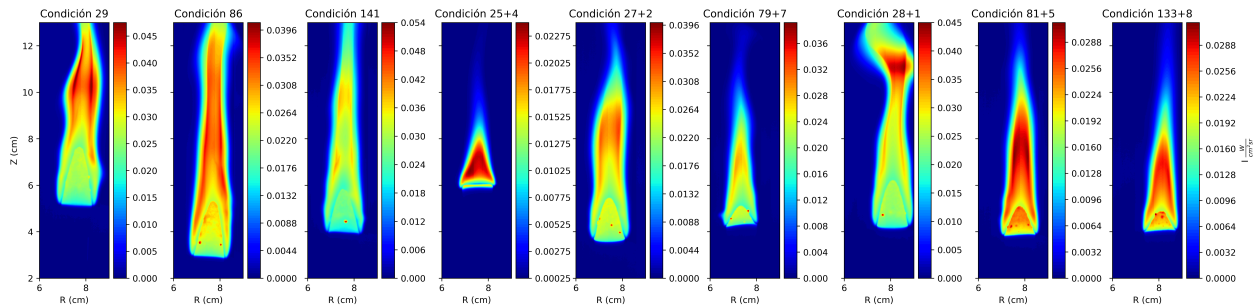


Figura 10: Campos de intensidad radiativa en Filtro 5 con escalas de color independientes para cada condición experimental.

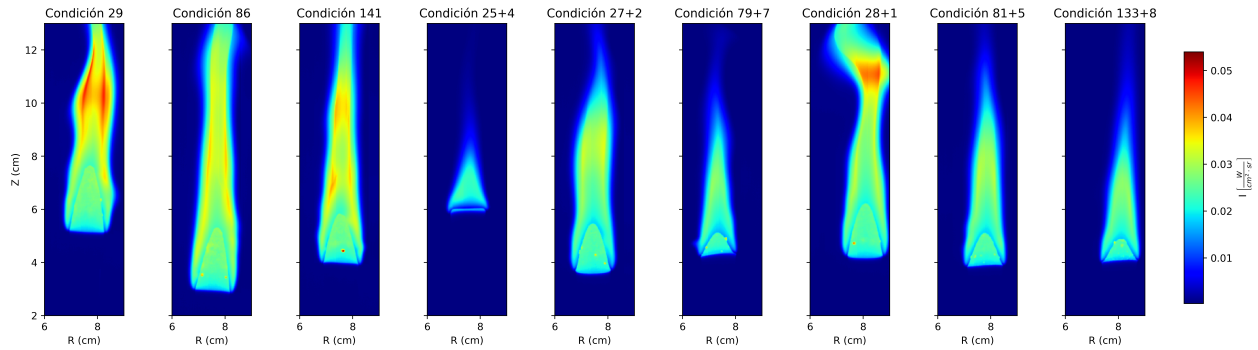


Figura 11: Campos de intensidad radiativa en Filtro 5 con escala de color común.

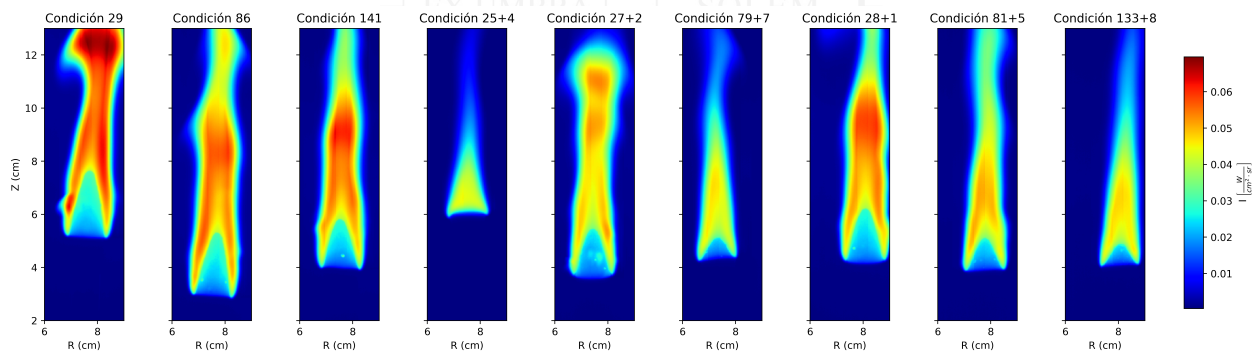


Figura 12: Campos de intensidad radiativa en Filtro 6 con escala de color común.

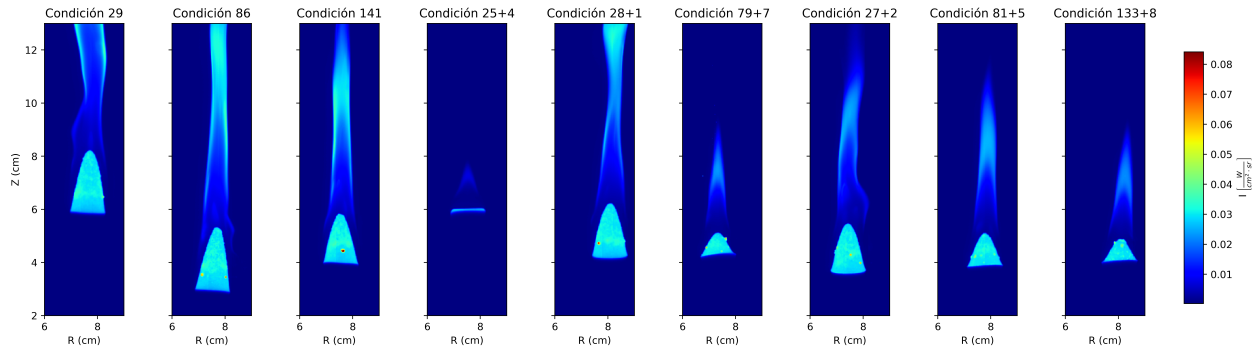


Figura 13: Campos de intensidad radiativa en Filtro 7 con escala de color común.

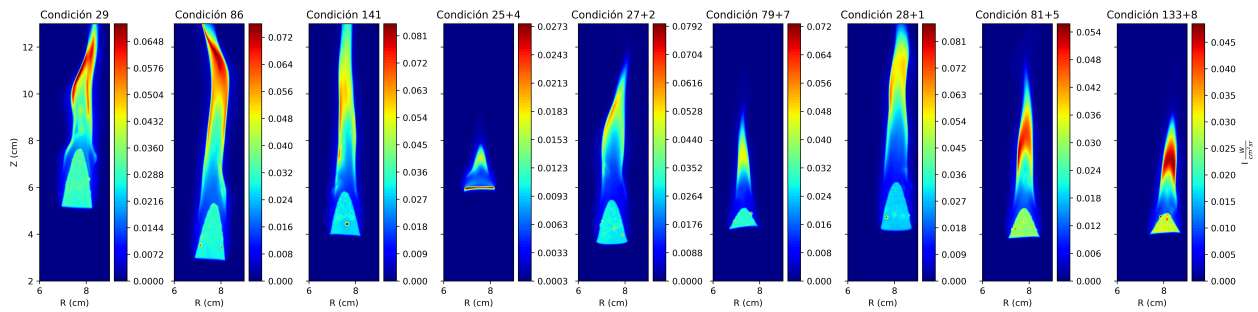


Figura 14: Campos de intensidad radiativa en Filtro 8 con escalas de color independientes para cada condición experimental.

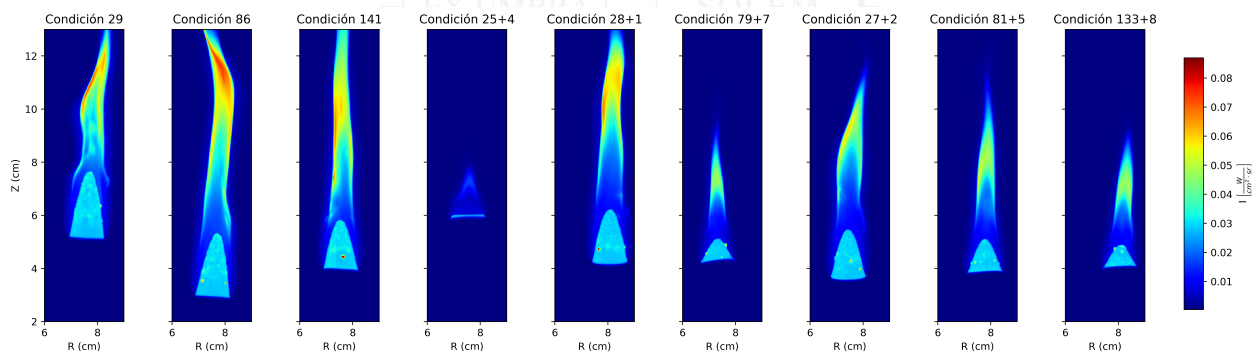


Figura 15: Campos de intensidad radiativa en Filtro 8 con escala de color común.