

ECOVELAS

Grupo Operativo de la Asociación Europea de Innovación (AEI)

MEMORIA FINAL DE PROYECTO



Unión Europea

FONDO EUROPEO DE
DESARROLLO REGIONAL
Una manera de hacer Europa



Junta de Andalucía

Consejería de Agricultura, Ganadería,
Pesca y Desarrollo Sostenible



Europa

invierte en las zonas rurales

Índice de Contenido

1.	RESUMEN	1
2.	ANTECEDENTES	1
3.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
4.	ACTIVIDADES REALIZADAS	5
5.	RESULTADOS DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	6
5.1.	Organización de los resultados	6
5.2.	Protección por heladas mediante velas	7
5.3.	Aspectos a considerar para la selección de las velas	8
5.4.	Estudio teórico para desarrollo de un modelo de simulación	12
5.5.	Desarrollo de la instalación experimental y metodología de los ensayos	18
5.6.	Ensayos caracterización de la llama	23
5.7.	Ensayos para caracterización del hollín y duración de la vela	25
5.8.	Resultados de caracterización de la llama	29
5.9.	Resultados de caracterización del hollín y velocidad de consumo	35
5.10.	Pruebas de campo.....	42
5.11.	Resultados de las simulaciones	58
6.	RESUMEN Y CONCLUSIONES FINALES DEL PROYECTO.....	66
7.	REFERENCIAS.....	68
8.	ANEXO.....	69
8.1.	Tareas definidas al inicio del proyecto, desviaciones y justificación de las mismas...	69

Índice de Figuras

Figura 2-1. Mecanismos de transferencia radiante de calor del suelo durante el día (izda.) y la noche (dcha.).....	3
Figura 2-2. Variación de la temperatura con la altura en diferentes momentos de una noche de inversión térmica.....	3
Figura 2-3. Nº medio de días de helada anual en España, valores medios de 2002 a 2012 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España).	4
Figura 5-1. Funcionamiento típico de una estufa.	8
Figura 5-2. Efecto de los humos y la presencia de nubes en las heladas por radiación.	9
Figura 5-3. Incrementos de temperatura experimentados en los cultivos tras el uso de las velas diseñadas en la patente US 3.842.536, con y sin capa superior de encendido rápido.....	11
Figura 5-4. Balance de energía simple de una helada nocturna. El volumen de control (cubo) representa.....	13
Figura 5-5. Esbozo del volumen de control y definición del problema.....	17
Figura 5-6. Equipamiento para el estudio de las heladas (Fuller & Grace, 1998).	18
Figura 5-7. Arreglo experimental utilizado para determinar el rendimiento de velas de parafina (Hamins et al., 2005).	19
Figura 5-8. Perfil típico de pérdida de masa en velas de parafina (Hamins et al., 2005).....	20
Figura 5-9. Calor radiante liberado por una vela de parafina en diferentes posiciones (Hamins et al., 2005).	21
Figura 5-10. Flujo de calor total y radiante emitido por una vela de parafina, a una posición radial del centro de esta de 1,1 cm (Hamins et al., 2005).	22
Figura 5-11. Sistema comercial para la medida del hollín producido por velas (S. Technology, 2007).	22
Figura 5-12. Arreglo experimental propuesto para realizar los ensayos de pirometría.....	23
Figura 5-13. Distribución aproximada de los puntos analizados para la llama de una vela.	24
Figura 5-14. Arreglo experimental propuesto para la medición del hollín.....	26
Figura 5-15. Cristales de vidrio convencional rotos como consecuencia del choque térmico. ..	27
Figura 5-16. Procedimiento para medir el hollín mediante el fotómetro con luxómetro.....	27
Figura 5-17. Hollín depositado para velas 100% Parafina con mecha de algodón (izqa.) y encerada (dcha.).....	28
Figura 5-18. Recipientes en los que se estudiara el consumo de material.....	28
Figura 5-19. Llama para una vela 100% Soja (P8) en los ensayos realizados el 19 de Junio de 2020 (izqa.) y el 15 de Junio de 2020 (dcha.).....	30
Figura 5-20. Estado de la vela 100% Soja y mecha de algodón (izqa.) y mecha de bórax (dcha.) durante el ensayo para medir hollín.	37
Figura 5-21. Tamaño y disposición de la mecha en las latas suministradas por S.A.T. Royal.....	38
Figura 5-22. Parcela de la Finca La Jarilla elegida para la realización de pruebas de campo.	43

Figura 5-23. Latas empleadas en las pruebas de campo.....	44
Figura 5-24. Distribución de las latas antiheladas en la parcela.	44
Figura 5-25. Termómetros fijos utilizados en las pruebas de campo.	45
Figura 5-26. Ubicación de los termómetros digitales en la parcelas de ensayo.	46
Figura 5-27. Operario encendiendo uno de los dispositivos antihelada empleados.....	47
Figura 5-28. Evolución de la temperaturas en los termómetros durante la noche del 24/02/2020.	48
Figura 5-29. Evolución de la temperaturas en los termómetros durante la noche del 25/02/2020.	49
Figura 5-30 Evolución de la temperaturas en los termómetros durante la noche del 26/02/2020.	50
Figura 5-31. Evolución de la temperaturas en los termómetros durante la noche del 26/02/2020.	51
Figura 5-32. Evolución de la temperaturas en los termómetros durante la noche del 07/03/2020.	52
Figura 5-33. Velocidad del viento (km/h) en los días en los que se realizaron las pruebas.	53
Figura 5-34. Estado de los filtros tras ser expuestos a los humos generados por las latas de parafina (izqa.) y estearina (dhca.) durante la noche del 24/02/2020.	54
Figura 5-35. Estado de los filtros tras ser expuestos a los humos generados por las latas de parafina (izqa.) y estearina (dhca.) durante la noche del 25/02/2020.	54
Figura 5-36. Estado de los filtros tras ser expuestos a los humos generados por las latas de parafina (izqa.) y estearina (dhca.) durante la noche del 26/02/2020.	55
Figura 5-37. Estado de los filtros tras ser expuestos a los humos generados por las latas de parafina (izqa.) y estearina (dhca.) durante la noche del 06/03/2020.	55
Figura 5-38. Estado de los filtros tras ser expuestos a los humos generados por las latas de parafina (izqa.) y estearina (dhca.) durante la noche del 07/03/2020.	56
Figura 5-39. Boina de humo formada durante la combustión de latas de parafina.....	57
Figura 5-40. a) Recreación de la vista aérea de una superficie de 225 m ² (cuadrícula 2,5 m x 15 m) y b) Volumen de control utilizado para las simulaciones.	58
Figura 5-41. Imagen de las velas utilizadas para combatir las heladas.....	59
Figura 5-42. Planos que se emplearán para analizar el calentamiento de la plantación por medio de la combustión de las velas de parafina mediante simulación 2D (a) y 3D (b).	61
Figura 5-43. Campo de temperatura (a) y velocidad (b) en un plano vertical al terreno creado por la presencia de 3 velas de parafina a unas condiciones de ambientales de 0 °C y 1 atm. Escala de temperatura ajustada entre 0 y 5 °C (temperatura > 5 °C representadas en rojo).....	62
Figura 5-44. Temperatura de la masa de aire contenida en el volumen de control comprendido entre los 0 y 5 °C. Escala de temperatura ajustada entre 0 y 5 °C (273y 298 K, respectivamente). Temperaturas > 5 °C en rojo.	63

Figura 5-45. Campo de temperatura a una altura de 0.4 sobre el terreno con la identificación de las zonas de media de temperatura en campo. Escala de temperatura ajustada entre 0 y 5 °C (273y 298 K, respectivamente). Temperaturas > 5 °C en rojo. 64

Figura 5-46. Evolución de las temperaturas en los termómetros durante la noche del 24/02/2020 para las parcelas testigo (sin velas), con velas de parafina, con velas de estearina de Soja frente a las temperaturas simuladas por CFD. 65

Índice de Tablas

Tabla 5-1. Lista de informe de resultados en cada actividad del proyecto.....	6
Tabla 5-2. Costes de instalación y operación de diferentes métodos de protección activa contra heladas para la protección de plantaciones de frutales de hoja caduca y viñedos en Washington (EEUU), en el año 2000.	7
Tabla 5-3. Composición de las velas fabricadas.	23
Tabla 5-4. Nomenclatura abreviada de las velas estudiadas según su composición.....	25
Tabla 5-5. Resultados obtenidos para velas con mecha de tipo encerada y distintas composiciones.....	31
Tabla 5-6. Resultados obtenidos para velas 100% Parafina (P1) y distintos tipos de mecha	32
Tabla 5-7. Valores de temperaturas medidos en el punto de máxima radiación para velas con mecha encerada.....	33
Tabla 5-8. Composición y tipos de mecha empleados durante los ensayos de consumo de material.	35
Tabla 5-9. Resultados obtenidos durante los ensayos de consumo de material.....	36
Tabla 5-10. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha de algodón y distintas composiciones.	40
Tabla 5-11. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha encerada y distintas composiciones.	41
Tabla 5-12. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha encerada y distintas composiciones.	42
Tabla 5-13. Valores de temperatura registrados durante la noche del 24/02/2020.....	48
Tabla 5-14. Valores de temperatura registrados durante la noche del 25/02/2020.....	49
Tabla 5-15. Valores de temperatura registrados durante la noche del 26/02/2020.....	50
Tabla 5-16. Valores de temperatura registrados durante la noche del 06/03/2020.....	51
Tabla 5-17. Valores de temperatura registrados durante la noche del 07/03/2020.....	52
Tabla 8-1. Cronograma de actividades inicialmente planteado.....	69
Tabla 8-2. Cronograma de actividades seguido a lo largo del proyecto.	71

1. RESUMEN

En el proyecto ECOVELAS se ha llevado a cabo un estudio para la mejora del sistema de calentamiento con velas actualmente usado como media de protección contra las heladas en los cultivos de frutales de hueso en la Vega del Guadalquivir: reduciendo la formación de e “boinas” de humo y aumentando el aprovechamiento térmico de la vela. Para ello se ha estudiado el impacto de la composición del combustible sobre la formación de humos y su eficacia calentadora, así como el efecto de la colocación de las velas en campo sobre el movimiento del fluido en la capa de aire cercana al suelo.

Se ensayaron velas fabricadas mezclando varios aditivos al material base utilizado actualmente en los sistemas de protección antihelada (parafina y estearina). Para cada vela se realizaron ensayos de medidas de caracterización de hollín (índice de hollín) y de potencia radiante durante la combustión utilizando pirometría. Los resultados ayudaron a entender los efectos de las diferentes sustancias y proponer mejoras. Las mejores combinaciones se obtuvieron usando mechas algodón y enceradas con estearina de palma o soja. La estearina animal presentó significativas ventajas con respecto a las de parafina líquida actualmente usadas en mayor eficiencia y reducción de hollín.

Se realizaron varios ensayos de campo utilizando dos tipos de latas, (parafina de petróleo, y la otra con estearina animal). Cada tipo de vela se dispuso en una zona de ensayo donde se colocaron varios termómetros y se realizó una monitorización durante 12 horas varias noches con heladas.

El estudio numérico se centró en estudiar la distribución y la potencia de los focos (velas) para garantizar la uniformidad del calentamiento del aire y minimizar la eficacia del sistema. Se realizó un estudio bibliográfico y se desarrollaron varios modelos numéricos CFD que se utilizaron para predecir el comportamiento en campo. Las simulaciones han revelado ser una herramienta de extrema utilidad para identificar configuraciones más favorables según el tipo de terreno, tipo de helada y condiciones meteorológicas. En particular, las simulaciones permitieron predecir las medidas de temperatura de campo. Así mismo, la optimización de la distribución superficial permitió predecir una reducción del consumo. Además, ensayos en el banco de datos permiten avalar que el uso de aditivos podría mejorar incluso más la durabilidad y la formación de humos.

En general, los resultados muestran que existe un significativo potencial de mejora que se podría aprovechar en futuras campañas, aunque deberían realizarse pruebas de campo adicionales para poder concluir de forma más específica.

2. ANTECEDENTES

El cultivo de la fruta de hueso en la Vega del Guadalquivir es, tradicionalmente, uno de los más importantes para el entorno económico/social de los municipios que la componen y se extiende a lo largo de toda la Vega –Sevilla y Córdoba- además de tener una presencia muy significativa en áreas de la provincia de Huelva. Es probablemente el cultivo que más mano de obra intensiva utiliza, suponiendo un total de 1.649.970 jornales al año, o 6.875 puestos de trabajo (calculado mediante la estimación de 210 jornales al año por cada hectárea de fruta de hueso). Se trata

pues, como las cifras reflejan, de un cultivo cuya actividad tiene una tremenda importancia a nivel económico y social. Su impacto, además, se desarrolla en zonas rurales, que precisamente son las zonas más necesitadas a nivel social de empleo y dinamismo empresarial.

No obstante, actualmente el cultivo está en claro retroceso. Los estudios reflejan que desde 2007 hasta fecha actual se ha arrancado más del 50% de la superficie total, debido, entre otros, a factores como el encarecimiento de la mano de obra con respecto a otras zonas productoras del país, la fuerte competencia de países terceros con costes de producción más bajos, y las nuevas tendencias hacia la liberalización de los mercados internacionales. Existen también factores técnicos que limitan la viabilidad de este tipo de cultivo, entre ellos, la lucha contra las heladas.

Las heladas que suelen acaecer durante los meses de febrero/marzo, cuando la fruta de hueso se encuentra en un momento crítico de su fenología. Sus efectos suelen ser catastróficos, pues una helada de larga duración hace que la fruta o la flor helada caigan y produce una importante pérdida. Desde el punto de vista económico los daños ocasionados por este tipo de sucesos son evidentes, y aunque existen herramientas financieras como los seguros agrarios para cubrir riesgos meteorológicos, éstos sólo alcanzan a cubrir parte de los costes, perdiéndose otros muchos, y lógicamente el beneficio que origina la comercialización. Sin embargo, los costes sociales son aún mayores, pues no hay ningún tipo de compensación a la pérdida de los jornales que implica la pérdida de una cosecha. Las heladas son, por tanto, un componente importante a la hora de explicar la deslocalización de un cultivo de tanto valor para Andalucía Occidental, y más concretamente, para la Vega del Guadalquivir.

En general, se conoce como helada la ocurrencia de una temperatura inferior a 0°C en los cultivos (Sneyder et al., 2010), aunque hay diferentes acepciones. En función de la nubosidad de la noche, se distinguen dos tipos de heladas:

- Heladas por radiación. Estas heladas son las más frecuentes y están marcadas por noches despejadas. Las heladas por radiación ocurren, principalmente, por las pérdidas de calor radiante de los cultivos y suelen caracterizarse por una fuerte inversión térmica.
- Heladas por advección. Las heladas por advección se dan cuando hay vientos de moderados a fuertes, con flujos de aire a temperaturas bajo cero y suelen ocurrir por pérdidas energéticas por convección de los cultivos, que ceden su calor al aire frío circulante. Típicamente, cuando se da este tipo de heladas, no ocurre inversión térmica.

La inversión térmica ocurre cuando la nubosidad es baja: durante el día, el calor radiante que recibe la superficie (y, en consecuencia, los cultivos) por parte del sol produce un descenso gradual de la temperatura con la altura; sin embargo, durante las noches despejadas, ocurre el fenómeno contrario: se produce una pérdida de calor radiante en la superficie, que se traduce en un aumento de la temperatura con la altura, en las capas bajas de la atmósfera. Este mecanismo se ilustra en la Figura 2-1.

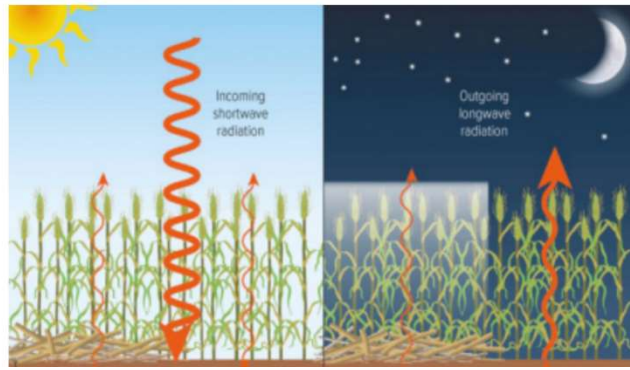


FIGURA 2-1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA RADIANTE DE CALOR DEL SUELO DURANTE EL DÍA (IZDA.) Y LA NOCHE (DCHA.).

Así pues, en la noche, el aire cercano a la superficie es más denso (más frío) que el de capas superiores y, por ende, no se produce circulación de aire en capas bajas de la atmósfera. Este fenómeno se conoce como inversión térmica. En la Figura 2-2, se muestra la evolución de la temperatura con la altura, característica de la inversión térmica.

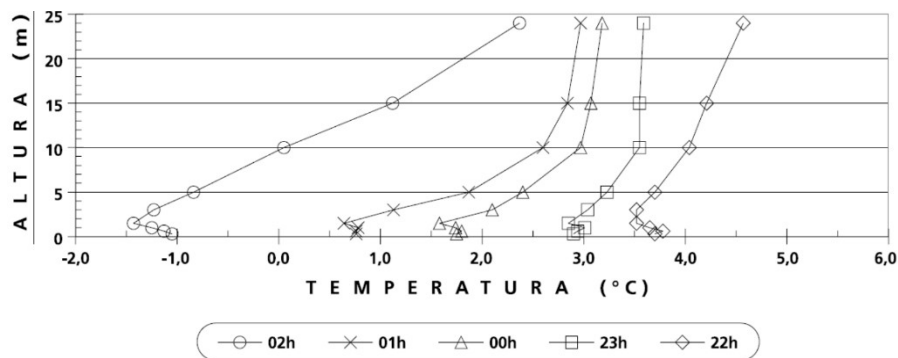


FIGURA 2-2. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA EN DIFERENTES MOMENTOS DE UNA NOCHE DE INVERSIÓN TÉRMICA.

De los diferentes métodos de protección activa contra las heladas por radiación, los más utilizados son las estufas y los sistemas basados en ventiladores y riego por aspersores. Con respecto a los dos últimos, se reconoce que son rentables cuando hay, al menos, varias semanas de heladas al año (Sneyder et al., 2010), dado el elevado coste de inversión que acarrearán, en relación con el uso de estufas. Dado que, en Andalucía occidental, solo se producen de 1 a 10 heladas anuales (Figura 2-3) suelen utilizarse estufas como método de protección activa contra las heladas.

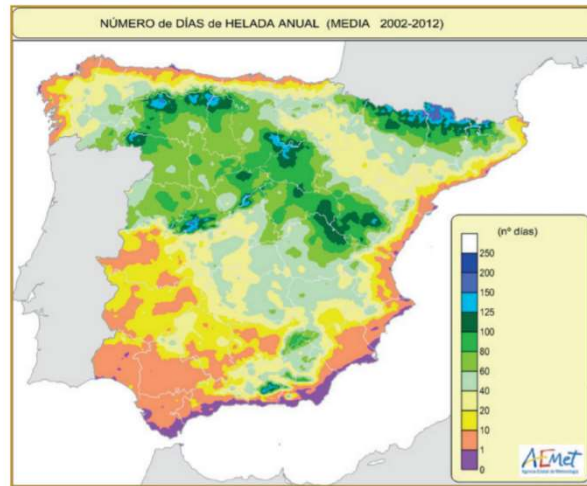


FIGURA 2-3. Nº MEDIO DE DÍAS DE HELADA ANUAL EN ESPAÑA, VALORES MEDIOS DE 2002 A 2012 (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, GOBIERNO DE ESPAÑA).

En la actualidad, existen tres sistemas antiheladas que se aplican con mayor o menor éxito en distintos cultivos, entre ellos la fruta de hueso, para evitar en la medida de lo posible los daños ocasionados por las heladas: Ventiladores o torres de viento, riego por aspersión y uso de calentadores (velas). Las heladas dañinas en frutales de hueso en la Vega del Guadalquivir se producen por “heladas negras” o heladas por convección donde no existe inversión térmica cerca del suelo. Las torres de viento sólo son efectivas en situación de “helada blanca” o helada por radiación, donde sí existe una inversión térmica, donde el aire frío, más denso, se acumula cerca del suelo. En situación de “helada negra”, la que nos ocupa, no hay inversión térmica, y además el aire es muy seco, aumentando los efectos del frío -la temperatura interna del vegetal puede estar entre 3 y 4 °C por debajo a la temperatura del aire-. En esas condiciones, las torres de viento no actúan y no permiten reducir la incidencia del frío. El riego por aspersión se descarta por el bajo número de heladas (inversión mínima demasiado alta) en la zona, así como el riesgo de asfixia radicular. Es por ello que la práctica totalidad de los calentadores utilizados en las fincas de frutales de la Vega del Guadalquivir consisten en unas latas de derivados de parafina, con mechas de cartón, que se distribuyen a lo largo de las plantaciones. Las latas tienen unos 5 litros de combustible, y su duración está entre las 8-10 horas. Al ser latas son muy fáciles de distribuir y de almacenar, lo que implica una gran ventaja comparativa con respecto a otros métodos, además su coste no es elevado. Al ser inputs que se utilizan de manera esporádica es elemental su fácil manejo y la posibilidad de almacenaje. Cuando se prevén riesgos importantes de helada en estados fenológicos sensibles se encienden en la cantidad y por el tiempo que deciden los ingenieros de campo responsables de las plantaciones. Los efectos de este encendido masivo son emisiones de CO₂ y humos que provocan altos índices de contaminación del aire y una nube negra que acaba por cubrir toda el área en un efecto “boina”.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo global del proyecto es encontrar una solución alternativa a la actualmente en uso para poder mitigar el problema de las heladas en los cultivos del valle de Guadalquivir. La solución actualmente aplicada se basa en la combustión de velas compuestas de parafinas, generando alto contenido de humo, con la consiguiente formación de “boinas”. En concreto, en este proyecto se estableció como objetivos la búsqueda de una alternativa de vela (composición, tamaño y forma) así como un estudio para entender el efecto de la configuración (distribución de la de colocación en campo) de las velas, que se adapte a las necesidades climatológicas concretas del valle del Guadalquivir, aunque no se descarta su aplicación en otros escenarios climatológicos. La metodología y secuencia temporal de actividades de actividades inicialmente programadas se describe en el Anexo. Así mismo, se detallan las desviaciones en la ejecución de las actividades y el nuevo cronograma ejecutado finalmente. En el siguiente apartado se resumen las principales actividades realizadas

4. ACTIVIDADES REALIZADAS

Actividad 0. Estudios preliminares

Se trata de realizar diversos estudios de varios temas claves para el desarrollo del proyecto, a saber:

- Estudio de la literatura y de las soluciones adoptadas para diferentes localidades, tipo de cultivo, tipos de velas, etc.
- Estudio de las patentes y sistemas de combustión desarrollados para mitigar este problema, así como las sustancias y aditivos necesarios para mejorar las propiedades de las velas.
- Estudio del efecto de configuraciones de focos de combustión para calentamientos de capa límite terrestre. Búsqueda de modelos numéricos y estudio de modelos desarrollados.

Actividad 1. Síntesis y fabricación de velas y ensayos de las mismas en un banco de datos de laboratorio –experiencias piloto-.

Diseño de velas:

Diseñar varias velas encaminados a la reducción de humo, control e intensidad de la velocidad de calentamiento, facilidad de prendido, influencia de la forma, tamaño, densidad y tipo de material carburante.

- Adición de aditivos y materiales para las velas: para velas con mecha y sin mecha -con aditivo para prender- para quemar con poco o nada de humo.
- Estudio de la forma de quemado para distintas composiciones: análisis y optimización de la forma de la vela, forma de contacto –inyección- con el oxidante y temperaturas alcanzadas.

Ensayos en banco de datos:

- Tests de ensayos para caracterización de los diseños: se construirá un banco de datos para la prueba y optimización experimental de las velas diseñadas, con capacidad de medida de velocidad de calentamiento, caudal y opacidad de humo, optimización de adición de comburente, tiempo de ignición, duración de la combustión, etc.

Actividad 2. Estudio de simulación y optimización de la distribución de las velas

Estudiar y optimizar en paralelo a la síntesis de una nueva “vela” -Actividad 1-.

El comportamiento del sistema de combustión se fundamenta en calentar el aire frío de las capas más bajas de aire, que están más cercanas al suelo, generando un movimiento de aire por convección, que aumenta la temperatura alrededor de las plantas. Por ende, es crucial estudiar la distribución y la potencia de los focos para garantizar la uniformidad del calentamiento del aire y minimizar la eficacia del sistema -calentar la capa de aire menor posible-. Esto depende de la vela, su velocidad de combustión, temperatura a la que quema, etc. Esta actividad realizará mediante la herramienta CFD -Computational Fluid Dynamics- por ejemplo, usando ANSYS FLUENT.

Actividad 3. Validación del modelo y demostración del (los) sistema (as) seleccionados en campo

Realizar varias pruebas, que se definirán de acuerdo con los resultados de la Actividad 2, para probar en campo la eficiencia del sistema propuesto. y validar el modelo de simulación desarrollado.

Actividad 4. Diseminación de los resultados

Selección de las mejores opciones y se definirá el procedimiento de fabricación. y Plan de Difusión de acuerdo con las bases de la convocatoria.

5. RESULTADOS DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

5.1. Organización de los resultados

Las secciones siguientes muestran los resultados del proyecto en cada una de las actividades. La Tabla 5-1 relaciona cada uno de los apartados con las actividades.

Tabla 5-1. Lista de informe de resultados en cada actividad del proyecto.

Actividad	Sección/Resultado
0	5.2 Protección por heladas mediante velas 5.3 Propiedades de las velas relevantes para su selección 5.4 Estudio teórico para desarrollo de un modelo de simulación
1	5.5 Desarrollo de la instalación experimental y metodología de ensayos 5.6 Ensayos para caracterización de la llama 5.7 Ensayos para caracterización del hollín y durabilidad de la vela 5.8 Resultados de la caracterización de la llama 5.9 Resultados de la caracterización del hollín

2	5.10 Pruebas de campo
3	5.11 Resultados de las simulaciones
4	5.12 Diseminación de los resultados

5.2. Protección por heladas mediante velas

El método de protección activa más utilizado para la protección contra las heladas en Andalucía Occidental es el basado en las estufas. Para entender las motivaciones económicas que llevan a esto, se muestran los costes de instalación y operación de las estufas y los sistemas de riego (Sneyder et al., 2010).

Tabla 5-2. Costes de instalación y operación de diferentes métodos de protección activa contra heladas para la protección de plantaciones de frutales de hoja caduca y viñedos en Washington (EEUU), en el año 2000.

METODO DE PROTECCION	NUM. POR Ha	INTERVALO DEL COSTE DE INSTALACION	COSTE DE FUNCIONAMIENTO
Estufas usadas de petróleo con chimenea de retorno	99	988 a 1 112 \$ ha ⁻¹	93,08 \$ h ⁻¹
Estufas nuevas de petróleo con chimenea de retorno	99	2 471 a 2 965 \$ ha ⁻¹	93,08 \$ h ⁻¹
Estufas a presión con propano	153	6 178 a 9 884 \$ ha ⁻¹	103,98 \$ h ⁻¹
Aspersores sobre las plantas		2 224 a 2 965 \$ ha ⁻¹	4,10 \$ h ⁻¹
Aspersores bajo las plantas		2 224 a 3 459 \$ ha ⁻¹	4,25 \$ h ⁻¹
Micro-aspersores bajo las plantas		2 471 a 3 706 \$ ha ⁻¹	4,25 \$ h ⁻¹

Como se ve en la tabla, el coste de operación de las estufas es sensiblemente mayor al de los sistemas de riego, mientras que estos últimos presentan mayor coste de instalación que los primeros, especialmente si se compara con las estufas de combustible sólido (coste de instalación menor al de las estufas de petróleo y propano). Esto implica que la elevada inversión que requieren los sistemas de riego solo se justifica cuando el coste de operación es elevado, lo que ocurre si el número anual de heladas es alto, que no es el caso de Andalucía Occidental (Figura 2-3).

Las estufas actúan por dos vías:

- Calentamiento directo de los cultivos. La combustión del material de las estufas produce el calentamiento directo a los cultivos por transferencia de calor radiante, normalmente gracias a la llama de la estufa, si bien algunos tipos de estufa pueden actuar en ausencia de llama.
- Ruptura de la capa de inversión. Los gases calientes de la combustión del material de la estufa, con menor densidad que el aire ambiente, ascienden hasta encontrar una capa de aire de igual temperatura. Asimismo, el aire más frío de capas superiores descenderá en dirección a la superficie, creando un patrón de flujo que podría romper la inversión térmica, mitigando la helada.

En las heladas por radiación, las dos actuaciones de la estufa son efectivas, especialmente si la inversión térmica es severa, dado que el límite de la capa de inversión (conocido como techo) estará a una altura cercana a la superficie y el volumen de aire que ha de moverse para romper la inversión es menor que en el caso de inversiones térmicas débiles (con techo alto), en cuyo caso se busca minimizar la transferencia de calor sensible de los gases de combustión, con respecto al calentamiento directo por vía radiante. Por otro lado, con respecto a las heladas de advección, al no producirse, típicamente, inversión térmica, el calor sensible de los gases de combustión no es útil. En la Figura 5-1, se muestra un esbozo con el funcionamiento típico de una estufa.

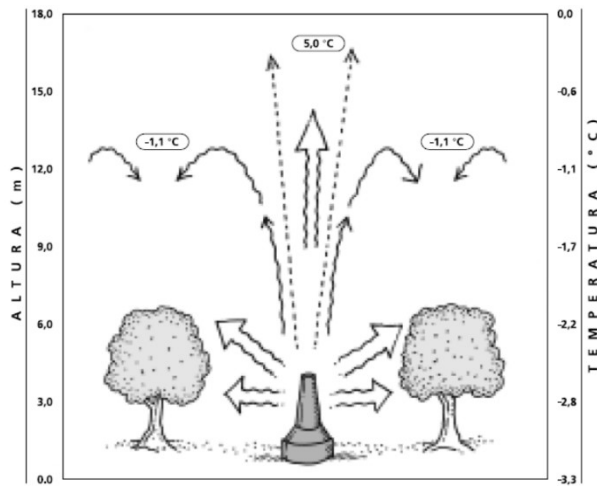


FIGURA 5-1. FUNCIONAMIENTO TÍPICO DE UNA ESTUFA.

5.3. Aspectos a considerar para la selección de las velas

La **eficiencia de una estufa**¹ típica es de un 5-35 % (Sneyder et al., 2010), siendo necesario un aporte energético específico (potencia por unidad de área) de 140-180 W/m² aproximadamente. Las estufas de combustible sólido transfieren entorno a un 40 % de su energía en forma radiante, frente a las de combustible líquido donde este valor es apenas un 25 %. Esto implica que las estufas de combustible sólido son más versátiles que las de combustible líquido.

La **producción de humos** y deposiciones de hollín en las plantas representan una de las principales dificultades asociadas al uso de las estufas. Tradicionalmente, se pensaba que el humo podía tener un cierto beneficio en la protección contra las heladas por radiación. Sin embargo, se ha demostrado que, no solo no es beneficioso, si no que podría aumentar la severidad de una helada (Gulik & Williams, 1988). Esto se debe a que durante la noche (Figura 5-2, gráfico de la izquierda) la fracción de la radiación procedente de la tierra que es devuelta a la tierra es muy pequeña, ya que la radiación procedente de los cultivos es de longitud de onda larga (~1 mm), mientras que las partículas que forman los humos son finas (~0,1 mm), y por tanto la mayor parte de las ondas de radiación atravesarán la capa de humo y la cantidad de calor reflejada a los cultivos será despreciable. Por el contrario, durante el alba (Figura 5-2, gráfico de la derecha), momento más crítico de una helada por radiación, el humo dispersa una

¹ Definiendo eficiencia como la relación entre la energía recibida por las plantaciones, con relación a la energía total almacenada en las estufas.

parte significativa de la radiación solar (de longitud de onda corta) que de otra forma paliaría la helada.

La producción de inquemados resultados de la combustión del material de la vela es otro de los factores a tener en cuenta. Esto hace que la velocidad de combustión de la estufa disminuya con el tiempo y, a la par, genera un residuo que ha de ser gestionado. Además, la adhesión de este residuo con el recipiente contenedor intensifica el problema de la gestión de residuos.

El encendido de las estufas, especialmente las de combustible sólido, no es inmediato y, por tanto, esta operación ha de efectuarse con un cierto tiempo de antelación. Típicamente, la mayor parte del calor se libera transcurridas 2-4 h tras el encendido de las estufas.

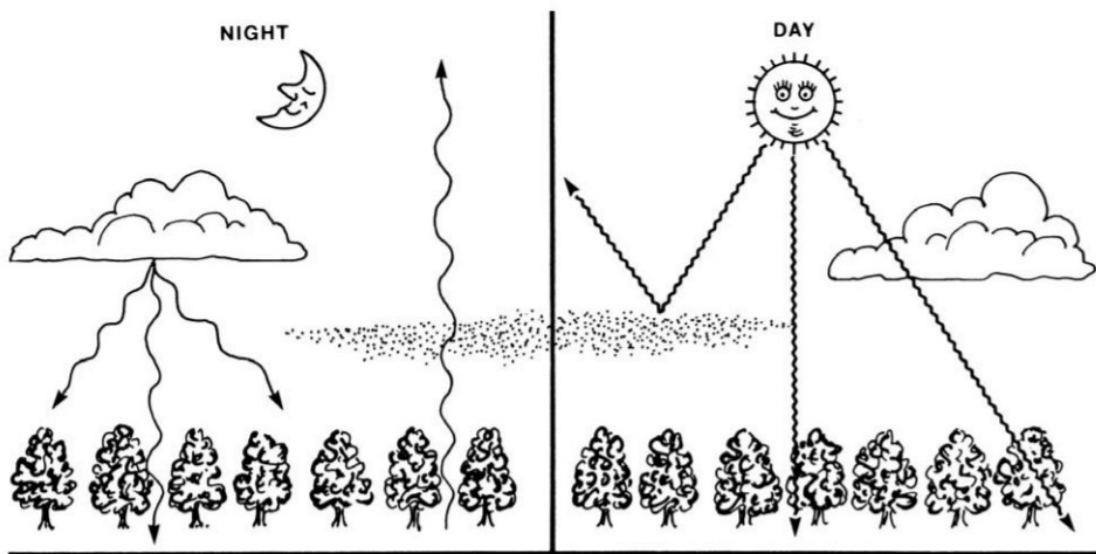


FIGURA 5-2. EFECTO DE LOS HUMOS Y LA PRESENCIA DE NUBES EN LAS HELADAS POR RADIACIÓN.

En la actualidad, se emplean estufas de combustible sólido (velas) de 5,7 L de parafina, con autonomía de 10-12 h, aproximadamente 300/ha. Para el encendido, se agrega a la estufa una cierta cantidad de un combustible líquido, mezcla de gasolina y gasóleo. Se han reportado todos los problemas descritos, especialmente los derivados de la formación de “boinas” de humo como consecuencia de la combustión de la parafina de las velas, habiendo protagonizado algunos titulares en prensa.

Hay diversas patentes publicadas, que dan indicaciones para mejorar la calidad y eficiencia de las velas. A continuación, se exponen las soluciones publicadas para mitigar algunos defectos expuestos anteriormente.

Eficiencia de las estufas

El punto más crítico para la mejora de la eficiencia de las estufas, especialmente, cuando hay débil inversión térmica o cuando se dan heladas por advección, es la fracción de la energía que da la estufa en forma de radiación. En la patente US 3.842.536, se propone el uso de velas de coque de petróleo, cuyo contenido en volátiles es inferior al 12 %. Con este material, se reduce la cantidad de calor sensible que se pierde con los gases de combustión, dado que no se produce

llama en la combustión del coque² (en la patente se asegura que “prácticamente la totalidad” del calor liberado durante la combustión del material propuesto es radiante). En esta misma patente, se propone incorporar una cierta cantidad de un agente oxidante inorgánico, NaNO₃ (5-12 % p/p), lo que permite mantener una combustión homogénea y reducir la pérdida de eficiencia que sufren las estufas convencionales con el transcurso de una helada.

Acumulación de inquemados

Hay numerosas soluciones patentadas para reducir la cantidad de inquemados sólidos producidos, así como para prescindir de contenedores para el combustible de las velas, lo que reduce el coste de las estufas sensiblemente.

En la patente US 3.615.284, se tiene una vela compuesta de parafina, a la que se añade una cierta cantidad (0,1-10 %) de palygorskyta, que asegura una distribución uniforme del combustible en la vela y, con ello, no se producen inquemados sólidos; por otro lado, además, estas velas contienen un 1,1-25 % de polietileno (PE) de muy alto peso molecular, que elimina la necesidad de un recipiente contenedor para la vela: con la adición del PE, el punto de fusión del material de la vela es aproximadamente de 135°C (frente a los 50-60°C típicos de la parafina), por lo que la estructura de la vela no se ve afectada por la combustión.

Por otro lado, el diseño de vela descrita en la patente US 3.842.536 asegura una nula producción de inquemados sólidos, debido a la uniformidad en la combustión que proporciona el agente oxidante agregado a la vela.

Producción de humos

Se ha identificado que la producción de humos está asociada con la ausencia de oxígeno e insaturación de las cadenas de carbono del material utilizado (Roeske, 2005). Dado que el índice de yodo (IV) es una medida directa de la saturación de un hidrocarburo, es deseable usar combustibles con bajo IV.

En la patente US 6.852.140, se plantea el uso de velas fabricadas a partir de materiales basados en ácidos grasos libres (FFA) y triglicéridos (TG), a partir de recursos renovables, concretamente, una mezcla de estearina de palma (TG) y ácido esteárico (FFA)³. Para que la combustión sea eficiente, debe haber un 2-35 % de FFA en la vela, consiguiendo que el IV del producto sea inferior a 10 (del orden de 10 veces inferior al IV del aceite de oliva).

En la patente US 3.842.536, se asegura que el coque de petróleo que forma la vela como combustible principal no produce humos, lo que se asocia con la homogénea distribución del NaNO₃ agregado como oxidante. Es probable que esto dependa del IV del coque (no especificado en la patente).

En la patente US 3.615.284, también se asegura que la producción de humos de la vela, en este caso, hecha de cera de parafina, es despreciable, aunque no se dan más detalles al respecto⁴.

² Al no haber llama, las plantaciones no corren riesgo de sufrir daños por un posible sobrecalentamiento causado por la proximidad de las velas a los cultivos, lo que podría contribuir a optimizar la colocación de las estufas.

³ Tanto el ácido esteárico como la estearina de palma son subproductos del procesamiento del aceite de palma

⁴ Téngase en cuenta que, por un lado, las ceras de parafinas son una mezcla de hidrocarburos saturados y, por otro lado, que la vela de la patente US 3.615.284 tiene un cierto contenido en palygorskyta, que homogeneiza la combustión

Encendido de las estufas

Existen diversas soluciones patentadas para asegurar un encendido y apagado “rápido” de las estufas, además de prescindir del uso de combustibles externos que puedan ser una fuente de producción de humos e inquemados, como el gasóleo.

En la patente US 3.637.335, se usa una vela de cera de parafina, que está encapsulada en un bloque hecho de cartulina; cabe destacar que el recipiente de la vela tiene una configuración especial, que hace que no sea necesaria una mecha para el encendido de la estufa: el encendido se hace por medio de la combustión de una parte del contenedor. Además, el recipiente de la vela tiene un cierto contenido en Na_2SiO_3 , que retrasa la ignición de la cartulina y asegura la estabilidad de la vela hasta el agotamiento de esta. Sin embargo, en la patente se reconoce que la efectividad del contenedor para el encendido se ve afectada por condiciones meteorológicas adversas, como viento y lluvias.

En la patente US 3.615.284, el PE de muy alto peso molecular procura un fácil y rápido encendido de la vela, que no requiere más que una mecha para su encendido.

En la patente US 3.842.536, la vela propuesta, además del coque de petróleo y el agente oxidante, está formada en un 2-20 % por un combustible secundario, de material celulósico (típicamente serrín), que permite el encendido del combustible primario (coque), que no es sencillo, dada su elevada temperatura de ignición ($\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$). Además, la vela tiene una capa superior de encendido rápido, que evita la necesidad de usar una mecha. Con la composición de dicha vela, se consiguen unos incrementos de temperatura máximos en la zona de cultivos a los 15 minutos tras el encendido (Figura 5-3), en el caso de aplicar la capa superior de encendido rápido y a las 2 horas, si no se utiliza este elemento.

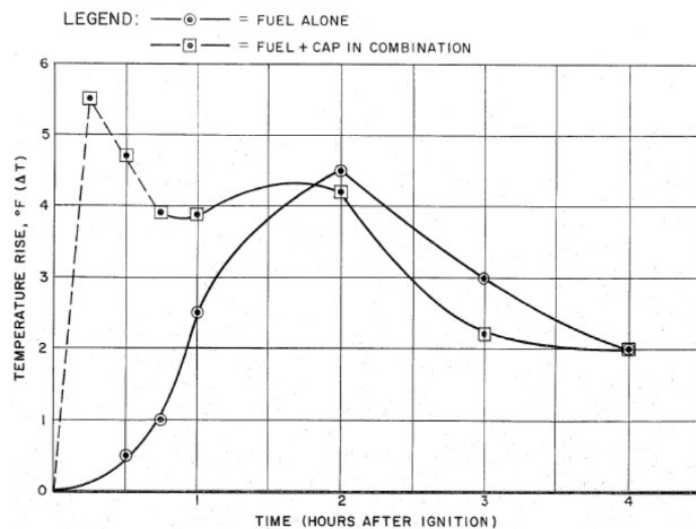


FIGURA 5-3. INCREMENTOS DE TEMPERATURA EXPERIMENTADOS EN LOS CULTIVOS TRAS EL USO DE LAS VELAS DISEÑADAS EN LA PATENTE US 3.842.536, CON Y SIN CAPA SUPERIOR DE ENCENDIDO RÁPIDO.

Conclusiones y recomendaciones para la selección, caracterización y mejora de las velas

Aunque el uso de sistemas antiheladas basados en estufas de combustible sólido está sobradamente justificado para las zonas de cultivo de Andalucía Occidental, dichos sistemas presentan problemas de eficiencia y contaminación que pueden ser mejorados. Tras el estudio de la literatura se concluyen los siguientes aspectos:

- Existen patentes que apuntan a mejorar el comportamiento de la actualmente utilizada.
- Sería interesante probar experimentalmente diferentes combustibles comerciales que maximicen la fracción de calor que producen en forma de radiación (con alto contenido en carbono fijo).
- Además, también parece interesante el uso de agentes oxidantes, que mejoren la eficiencia de la combustión de los sistemas actuales.
- Con respecto al manejo de las velas, hay varias soluciones planteadas para el encendido, que eviten el uso de combustibles líquidos externos.
- Adicionalmente, es posible abaratar el coste de las velas, prescindiendo de recipientes. Para ello, se ha de investigar el uso de aditivos como el PE de muy alto peso molecular, que procure temperaturas de fusión del material lo suficientemente altas como para evitar una debilidad estructural de la estufa durante la combustión.
- Por último, se recomienda buscar composiciones de vela que permitan reducir los humos, especialmente, residuos y subproductos como la estearina de palma.

5.4. Estudio teórico para desarrollo de un modelo de simulación

El número de estufas o velas (en general foco calorífico) y su distribución en un área determinada condiciona la distribución del calor dentro de la zona que se desea proteger. Si se ponen pocos focos, el aire se calienta mucho alrededor de aquéllos y se eleva con demasiada rapidez hasta bastante altura, puesto que ha de subir hasta las capas atmosféricas que tienen su misma temperatura. En cambio, si esa misma potencia calorífica se distribuye en un mayor número de focos caloríficos el aire se calienta más uniformemente y, además, el volumen de aire a calentar será mucho menor, puesto que la corriente ascendente, menos caliente, sube a menor altura, lo que se traduce en una mayor eficacia del sistema.

El estudio que se va a realizar está encaminado por tanto a estudiar la distribución y la potencia de los focos (velas) para garantizar la uniformidad del calentamiento del aire y minimizar la eficacia del sistema (calentar la capa de aire menor posible). Primero se resume lo más relevante de la revisión realizada en la literatura, después se expone la metodología que se ha desarrollado en este proyecto para abordar las simulaciones y finalmente se dan algunos resultados obtenidos. Hay que recalcar que el modelo de simulación está en desarrollo y aún no cuenta con las garantías computacionales para sacar conclusiones concretas, por lo que esta sección se debe entender más como un resumen justificativo de los esfuerzos realizados y el enfoque y dirección que se ha tomado para abordar el problema.

Balance energético durante una helada

La disminución de la temperatura de los cultivos en una noche de heladas se produce por una combinación de mecanismos de transferencia de calor, que se muestran esquemáticamente en la Figura 5-4:

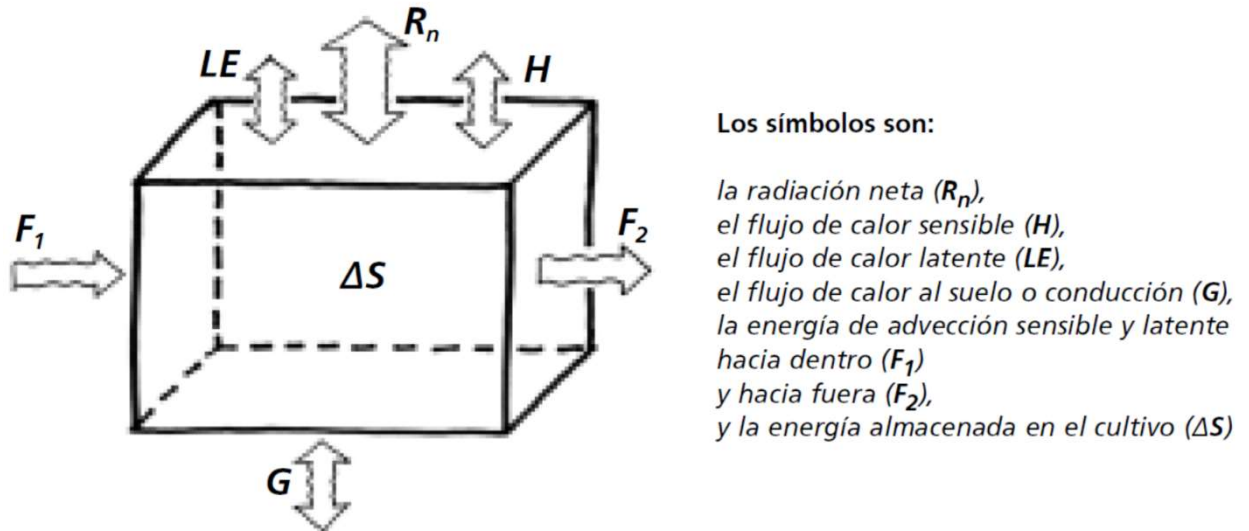


FIGURA 5-4. BALANCE DE ENERGÍA SIMPLE DE UNA HELADA NOCTURNA. EL VOLUMEN DE CONTROL (CUBO) REPRESENTA.

- Radiación neta (R_n). En las noches claras, se producen unas pérdidas energéticas netas del entorno de 50-90 W/m², debidas a un intercambio de calor radiante entre la superficie superior de los cultivos y “el cielo”. La variabilidad de las pérdidas de calor depende, principalmente, de la humedad del aire y de la nubosidad (Luciuk, 2009) (altura de la capa de nubes y cobertura del cielo). Este mecanismo es el principal causante de las heladas por radiación.
- Convección neta del aire (F_2-F_1). Cuando se dan heladas por advección, la masa de aire frío que circula como consecuencia de vientos moderados-fuertes toma parte del calor almacenado en los cultivos (ΔS), produciendo su enfriamiento. Es difícil cuantificar las pérdidas convectivas en este tipo de heladas, pues dependen de numerosos factores (velocidad y flujos de aire, temperatura, humedad, etc.).
- Flujo de calor sensible (H) y flujo de calor del suelo (G). En las heladas por radiación, la menor temperatura se registra en las zonas cercanas a la superficie de las plantas. Por tanto, el aire más caliente que rodea a los cultivos cede calor a estos, por convección natural. De igual modo, el suelo, también a mayor temperatura que la superficie de los cultivos, cede calor por conducción. Estos dos factores contribuyen a amortiguar el descenso de temperatura ocasionado por las pérdidas radiantes, en unos 20-40 W/m².
- Flujo de calor latente (L). Durante una noche de helada, si la humedad del aire es lo suficientemente alta, puede alcanzarse la temperatura de rocío/congelación y, en ese caso,

se formará una capa de agua/hielo (escarcha) sobre la superficie de los cultivos. Dado que tanto la condensación como la congelación son procesos exotérmicos, estos procesos reducen la caída de temperatura, consecuencia de las pérdidas radiantes en heladas por radiación.

Globalmente, para mantener una temperatura constante en una noche de helada por radiación, se requiere un aporte de 10-50 MW/m² por parte de un sistema de protección activa.

Análisis de la literatura

No se han encontrado referencias previas sobre simulación CFD del problema de las heladas de cultivos. Sin embargo, hay publicaciones relacionadas con el cálculo de perfiles de temperatura en espacios abiertos, enfocadas al estudio de microclimas urbanos. En este ámbito, en la *review* publicada por Toparlar et al., en 2017, se recogen las diferentes publicaciones existentes acerca de simulaciones CFD de microclimas urbanos. Los parámetros que, con mayor frecuencia se estudian en este campo son la temperatura del aire, la velocidad del viento, la temperatura de la superficie del suelo y la temperatura media radiante (referencia al efecto de la radiación). Dado que todos los parámetros mencionados son igualmente interesantes para el estudio de las heladas, puede considerarse apropiado el uso de este tipo de modelos para la simulación de heladas. Sobre la fenomenología que se tiene en cuenta en estas simulaciones, los elementos que se tienen en cuenta para hacer los balances de energía son similares a los que se consideran “de importancia” en el caso de las heladas.

Los factores que se incluyen en los balances de energía tienen que ver con la radiación (tanto de onda corta como de onda larga), transporte turbulento de energía (viento), vaporización/condensación de agua, almacenamiento de energía y recursos antropogénicos, especialmente enfocados al estudio de la Isla de Calor Urbana (UHI) (Toparlar et al., 2015). Aunque no se aportan detalles explícitos sobre este tipo de simulaciones, se dan algunas pautas destacables. Se engloba el área de interés en un dominio circular, de mallado más fino, en el que se incluyen los elementos reales de la zona (edificios, árboles, etc.). La sección circular (de diámetro R) está encuadrada en el centro de una sección hexagonal (con arista igual a 2R); en esta sección exterior, no se incluye explícitamente la geometría específica de los elementos que forman el espacio. La estrategia de mallado seguida consiste en celdas hexaédricas, con el tamaño más fino en la zona de interés y aplicando un factor de extensión de 1,3. En cuanto a las condiciones de contorno, en lugar de seleccionar una velocidad típica, se modelan los perfiles de velocidad axiales (ecuación de usuario) en la mitad de las caras de la sección hexagonal; la otra mitad del dominio queda libre (resultado de la simulación). En cuanto a las ecuaciones como en la mayoría de los estudios similares, se utilizan las ecuaciones de conservación de Navier-Stokes (URANS), con un modelo k-ε para la turbulencia. Con respecto a la radiación, se aplica el modelo P-1, y la aproximación de Boussinesq para la fuerza de flotación (convección natural). En lo referente a la transferencia conductiva de calor (desde el suelo), se toma como simplificación un modelo unidireccional.

Pese a lo anterior, aunque las experiencias previas a las que se ha tenido acceso están enfocadas en un problema distinto, se ha encontrado una referencia en la que se estudia, mediante simulación CFD, un campo más similar al del proyecto ECOVELAS: el efecto de la Isla de Enfriamiento en Parques (PCI o UHI), que consiste básicamente en una reducción en el impacto de las UHI por la absorción de calor de la vegetación (Vidrih & Medved, 2013). Los autores del trabajo exponen, de manera detallada, los balances de energía, tanto en las copas de los árboles

del parque como en la superficie (considerada como hierba). Adicionalmente, cabe destacar que se analiza el efecto de la edad y densidad de la vegetación sobre la reducción del impacto de la UHI.

Además de las referencias mencionadas, hay otras en las que se estudia el seguimiento del movimiento de humos en espacios cerrados (Sneyder et al., 2010 y Ktote, 1997) lo que puede ser útil para predecir el comportamiento de los gases producidos en la combustión de las velas.

Estrategia adoptada para la simulación del problema

El problema que se desea simular tiene escalas muy diferentes y regiones espacio temporales no bien definidas por lo que tiene una doble dificultad. Por un lado, la dificultad numérica, es decir la selección del mallado, condiciones de contorno, método computacional y tipo y selección de modelos fluidodinámicos y radiantes. Además, y quizás mucho más difícil de abordar, una dificultad conceptual ya que es necesario definir el dominio y desacoplar las escalas. Además, como se ha indicado no existe ningún precedente de simulaciones de este tipo (para este fin) en la literatura, por lo que el problema reviste una dificultad extraordinariamente alta.

Por un lado, la región a analizar sería de unas decenas de metros (capa encima de la tierra sometida a la atmosfera, pero no hay un claro límite superior). Por otro lado, las fuentes puntuales están compuestas por llamas cuyo análisis CFD es de por sí un problema de una enorme dificultad (la simulación de una vela aislada en CFD es un problema muy complejo y que exige mucho tiempo de computación). Obviamente incluso abordando el problema con un programa CFD es necesario realizar importantes simplificaciones. Es preciso establecer y desarrollar por tanto una metodología apropiada para tener mínimas garantías de los resultados.

El enfoque adoptado fue realizar simulaciones de forma iterativa de la siguiente forma. En un primer paso sin considerar los detalles de la combustión de las velas, sino asumir que son fuentes puntuales generadores de energía y gases en unas determinadas condiciones, simular un dominio de unas decenas de metros un dominio 2D sin arboles ni otros objetos. El objetivo es conocer qué condiciones de contorno son más razonables para los bordes (velocidad del aire), la orografía y sobre todo la capa superior que interacciona con el cielo. En un segundo paso, estudiar la región cercana a la vela, que depende de su velocidad de combustión, temperatura a la que quema, además de su distribución y tamaño, y con ello desarrollar unas condiciones de contorno para el problema anterior. Volver al problema primero con esas nuevas condiciones de contorno y resolver el dominio. En un cuarto paso, modelar la influencia de interferencias (cultivos) para calcular la temperatura que habría en la capa límite que rodea a estos objetos y finalmente a los objetos mismos. Estos, se modelan con geometría simple primero. Aún está por terminar el enfoque que se expone por lo que se ignora si se podrá dar un paso más y simular con más detalles los propios cultivos, ya que el coste computacional es enorme.

Una vez establecido el proceso anterior se procedió a pasar el problema a 3D lo cual aumentará el tiempo computacional enormemente y se valorará si una simulación 2D puede dar información de cómo realizar la distribución de las configuraciones de las velas (objetivo final).

Modelado CFD

El programa CFD resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido: conservación de masa, momento y energía. Las ecuaciones de conservación tridimensional que describen el fenómeno de transporte son:

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (u_j \phi) = - \frac{\delta}{\delta x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\delta \phi}{\delta x_j} \right) + S_\phi \quad (\text{EC1})$$

Cuatro términos componen esta ecuación: transitoriedad, convección, difusión y término fuente; Φ es una forma de variable dependiente que puede ser masa, velocidad, factor químico o temperatura, y describe las características del flujo en una localización puntual y en un tiempo específico; en un espacio tridimensional sería $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$. Γ y S_Φ representan el coeficiente de difusión y el término fuente de Φ .

Las ecuaciones usadas fueron las del modelo k- ϵ estándar, ya que presentaron un tiempo adecuado de costo computacional. Este modelo de turbulencia está caracterizado por la energía cinética k, representada por:

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho k u_j) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\Gamma}{\sigma_\Gamma} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{EC2})$$

y por la tasa de disipación de energía cinética e, expresada como:

$$\frac{\delta(\rho \epsilon)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\delta \epsilon}{\delta x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (\text{EC3})$$

donde G_k es la generación de energía cinética turbulenta debida al gradiente de velocidad media; G_b es la generación de energía cinética turbulenta debida a las fuerzas de flotación; Y_M es la contribución de la fluctuación debidas a la dilatación; $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes; σ_k y σ_ϵ son los números de Prandtl para k y ϵ , respectivamente; S_k y S_ϵ son términos fuente definidos por el usuario. Las constantes del modelo tienen valores por defecto definidos en ANSYS pero que se pueden modificar. El sistema de ecuaciones construido con estas variables se resuelve numéricamente en CFD con el método del volumen finito.

En la Figura 5-5, se muestra un el volumen de control del problema es un plano de sección cuadrada, en el que la cara inferior representa el suelo y la cara superior representa el cielo, que produce unas pérdidas de calor por radiación con respecto al suelo. Además, se considera la acción del viento a través de una de las caras laterales (cara izquierda), pudiendo analizar así la influencia de la convección en el problema.

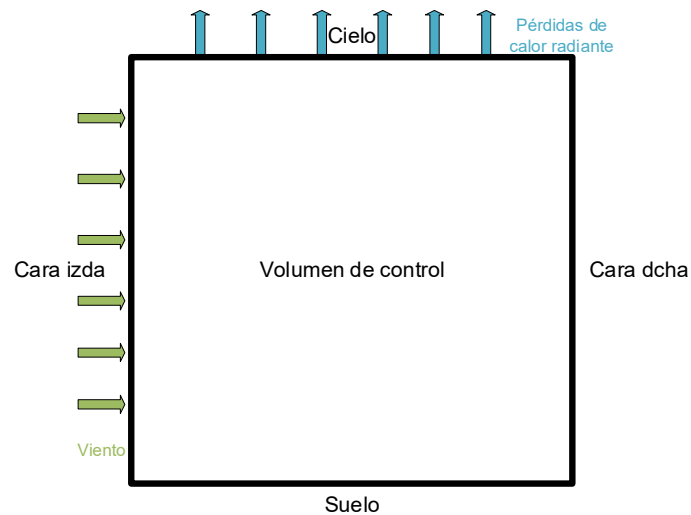


FIGURA 5-5. ESBOZO DEL VOLUMEN DE CONTROL Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Además de las ecuaciones de conservación y el modelo de cierre anterior, se han usado los siguientes submodelos:

Modelo de radiación. Se ha utilizado el modelo S2S (Surface to Surface), que asume que los efectos de dispersión, emisión y absorción de radiación pueden despreciarse, por lo que solo se han de considerar efectos de radiación de superficie a superficie. Esto se ha utilizado en varias referencias de estudios térmicos ambientales (Toparlar et al., 2015, Toparlar et al., 2017 y Vidrih & Medved, 2013).

Las constantes turbulentas del Modelo k- ϵ se han tomado de las recomendaciones de los trabajos: Toparlar et al., 2015, Toparlar et al., 2017 y Vidrih & Medved, 2013.

Se ha tenido en cuenta un modelo transitorio, con las siguientes condiciones de contorno:

- Suelo. La condición de contorno para el suelo es la de una pared (velocidad del aire nula, con una emisividad igual a 0,8), con una temperatura inicial de 5°C.
- Cielo. De igual modo, el cielo se toma como una pared (velocidad del aire nula, con una emisividad igual a 0,8) y se consideran unas pérdidas de calor por radiación de 80 W/m², que es el valor medio publicado por la FAO (Chang et al.,2003).
- Cara izquierda. Se asume un perfil plano de velocidad de 0,5 m/s, a una temperatura inicial igual a 5 °C.
- Cara derecha. La condición de contorno en esta cara es un gradiente de presión nulo y una temperatura inicial también igual a 5 °C.
- Para resolver el problema, se ha tomado un diferencial de tiempo de 1 segundo, con 300 iteraciones (5 minutos de tiempo total).

5.5. Desarrollo de la instalación experimental y metodología de los ensayos

Análisis previo de la literatura

En esta sección se resumen los estudios que se realizaron en el primer año de proyecto en aras de seleccionar un método a aplicar y una instalación a diseñar a escala de laboratorio para la caracterización de los aspectos más relevantes discutidos arriba. Se provee información de las propiedades de interés y de las herramientas necesarias para medirlas. Aunque apenas hay información de apoyo para el estudio de las propiedades de las velas con aplicación a sistemas de protección contra las heladas, hay algunos estudios sobre velas enfocados a prevenir los incendios domésticos causados por las velas.

Fuller and Grice, en 1998, estudiaron el impacto de las heladas de plantas de tomate, para lo cual usaron el arreglo experimental que se muestra en Figura 5-6.

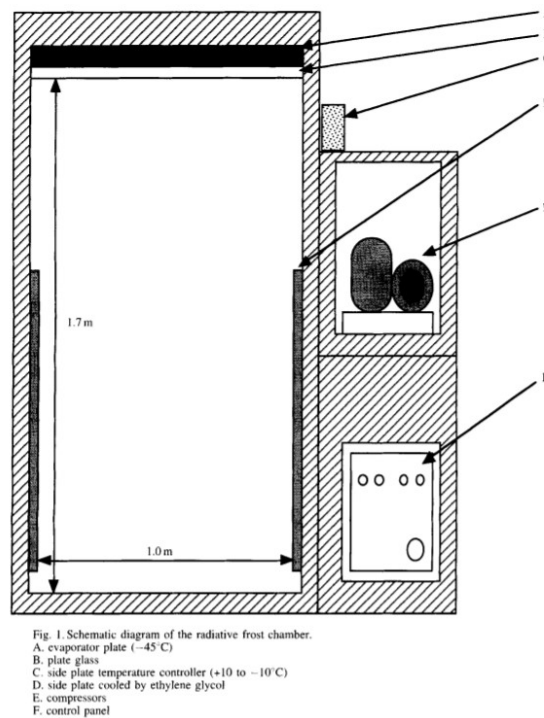


FIGURA 5-6. EQUIPAMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LAS HELADAS (FULLER & GRACE, 1998).

Básicamente, se trata de una cámara rectangular de dimensiones 1x1x2 m. En la parte superior de la cámara se instala un plato refrigerado con un HFC específico, que mantiene la temperatura de este entre -40 y -45 °C; este plato actúa como un cuerpo negro, de manera que también se incluye el impacto de las pérdidas radiantes, típicas de una helada por radiación. Para analizar el impacto de las heladas, se midió la temperatura de los tallos y las hojas de las plantas (usando termopares), así como la temperatura del aire a la misma altura. Así, se obtuvieron de las plantas de la cámara, para diferentes temperaturas de inicio de cada ensayo. Estos perfiles se compararon con datos reales de plantaciones de patata en UK, probando que el arreglo experimental utilizado el estudio es válido para hacer pruebas a escala de laboratorio.

Tal y como expuso en la sección anterior hay una serie de propiedades interesantes en las velas. En un estudio experimental sobre la tendencia a producir incendios de las velas, el NIST (Hamins

et al., 2005) analizó la generación de calor de unas velas de parafina y la fracción de calor radiante emitido por las mismas. Para ello, se utilizó el arreglo experimental que se muestra en la Figura 5-7 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que consiste en una cámara aislada (0,61x0,61x0,76 m) con paredes de zafiro, en cuyo interior se coloca la vela. El funcionamiento de cada parte de este se explicará a continuación.

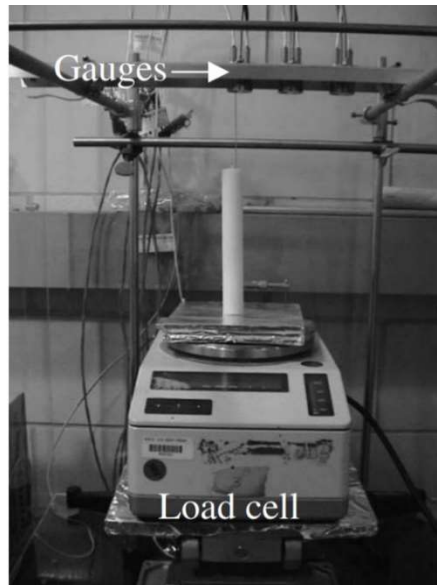


FIGURA 5-7. ARREGLO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DE VELAS DE PARAFINA (HAMINS ET AL., 2005).

Una de las propiedades más importantes de la vela como sistema de protección contra las heladas es la velocidad de combustión y su evolución con el tiempo (pues de ello depende la acumulación de inquemados sólidos y su rendimiento en general). Para determinar esto experimentalmente, el NIST (Hamins et al., 2005) propone cuantificar la pérdida de masa de la vela, teniendo en cuenta que el flujo de calor emitido por la vela (\dot{Q}) se puede calcular según la ecuación [EC4]:

$$\dot{Q}(W/m^2) = \frac{\dot{m} \cdot 4 \cdot MLR (kg/s)}{\pi \cdot D^2 (m^2) \cdot PCI (kJ/kg)} \quad [EC4]$$

Donde “MLR” es la pérdida de masa de vela, “D” es el diámetro de la vela y “PCI” es el poder calorífico del material, que suele ser un dato del fabricante.

El resultado de un ensayo típico para determinar el flujo de calor emitido por una vela de parafina convencional se muestra en la Figura 5-8:

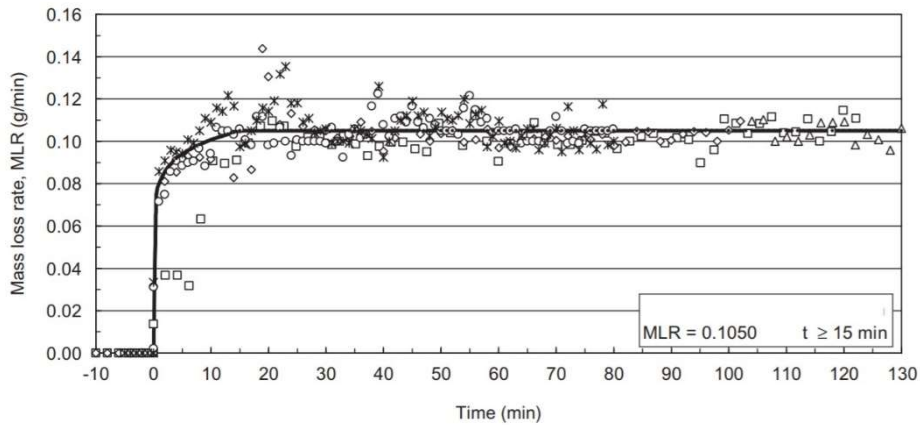


FIGURA 5-8. PERFIL TÍPICO DE PÉRDIDA DE MASA EN VELAS DE PARAFINA (HAMINS ET AL., 2005).

Como se observa en la Figura 5-8, hay dos etapas en la combustión de la vela: una etapa inicial en la que la temperatura de la superficie superior de la vela se va calentando y fundiendo (lo que requiere un aporte de energía que proviene de la propia combustión) y una etapa estacionaria, que se alcanza a los 15 minutos, según el caso de la Figura 5-8. El estado estacionario indica que la vela se combustiona uniformemente y que, por tanto, la acumulación de inquemados es poco significativa.

Dado que la pérdida de masa típica de velas del orden de 1 cm de diámetro es del orden de 0,1 g/min, teniendo en cuenta que el tiempo de la fase transitoria es de unos 15 minutos, para estimar el flujo de calor total es suficiente con utilizar una balanza de precisión del tipo de las que ya existen en el laboratorio (precisión de 0,01 g).

Con respecto a la fracción de calor radiante es de máxima importancia (maximizar) ya que cuanto mayor sea su valor, mayor será el aprovechamiento de la vela para proteger los cultivos (dado que el transporte de calor convectivo siempre acarrea mayores pérdidas).

Para medir el calor radiante emitido por la vela experimentalmente, se utilizan unos transductores de Schmidt-Boetler (gauges según el esbozo de la Figura 5-7), que procuran una medida del calor por unidad de volumen de la vela. El flujo de calor radiante depende de la posición de la llama con respecto al objetivo visible. Para determinar dicha influencia, en el estudio que se cita (Hamins et al., 2005) se instalaron transductores a diferentes posiciones radiales de la base de la vela. Además, conforme la parafina se va combustionando (de manera uniforme de acuerdo con la Figura 5-8), la altura de la vela va disminuyendo y, así, aumentando la distancia de la llama con el detector (lo que disminuye el flujo de calor radiante medido con el tiempo). En la Figura 5-9 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el flujo radiante de una vela de parafina medido por transductores a diferentes posiciones radiales del centro de la llama, a dos alturas diferentes.

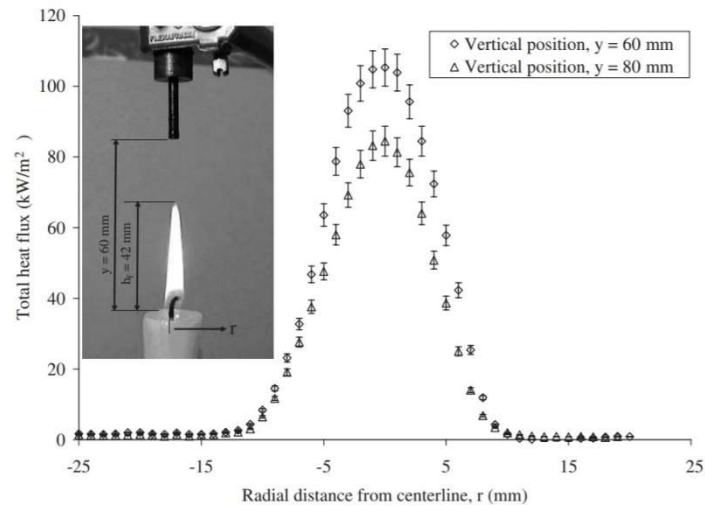


FIGURA 5-9. CALOR RADIANTE LIBERADO POR UNA VELA DE PARAFINA EN DIFERENTES POSICIONES (HAMINS ET AL., 2005).

Para obtener el calor radiante total liberado (Q_R), basta con integrar el calor volumétrico medido por los transductores (q_R) con la altura, tal y como se muestra en la ecuación [EC5]:

$$Q_R (W) = \pi \cdot R_0^2 (m^2) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} q_R \left(\frac{W}{m^3} \right) \cdot dy \quad [EC5]$$

Donde " R_0 " es la distancia radial desde el centro de la vela hasta el transductor y " y " es la altura desde la base de la vela.

La fracción de calor radiante (x_R) se calcula con la ecuación [EC6]:

$$x_R = \frac{4 \cdot Q_R}{\pi \cdot D^2 \cdot Q} \quad [EC6]$$

En la Figura 5-10, se muestran los flujos de calor radiante y total en función de la altura, determinados experimentalmente para una vela de parafina, a una distancia radial de 1,1 cm. Se observa que, en la zona cercana a la llama, prácticamente todo el flujo de calor emitido por la vela es de tipo radiante; sin embargo, conforme mayor es la distancia entre la vela y el transductor, el flujo de calor va disminuyendo, indicando que el calor detectado está asociado a los gases de combustión. Esto es importante para estimar la altura óptima de las velas (en el caso de la Figura 5-10, sería de unos 2 cm).

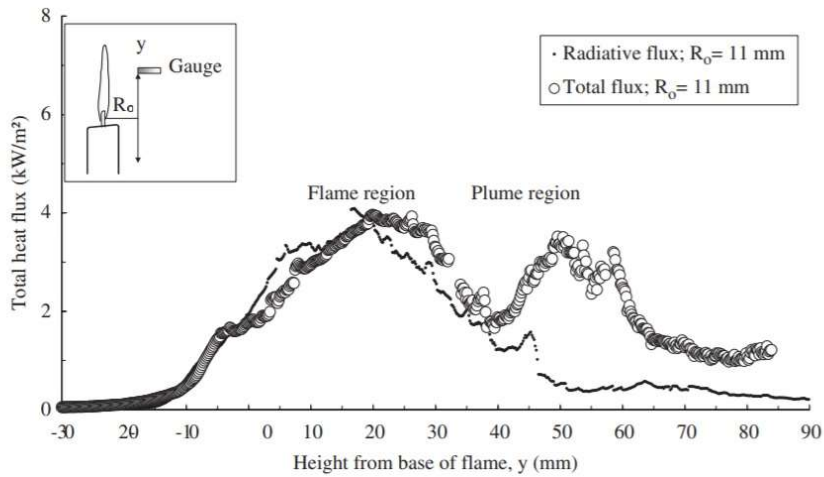


FIGURA 5-10. FLUJO DE CALOR TOTAL Y RADIANTE EMITIDO POR UNA VELA DE PARAFINA, A UNA POSICIÓN RADIAL DEL CENTRO DE ESTA DE 1,1 CM (HAMINS ET AL., 2005).

Por último, con respecto a los humos, no se suele analizar su efecto en este tipo de estudios, pues no tiene efectos apreciables en la probabilidad de incendio asociado a las velas. Sin embargo, hay algunas metodologías específicas comerciales encaminadas a determinar la generación de hollín de velas de reducido tamaño. Un ejemplo es el sistema propuesto por la empresa SATRA Technology (S. Technology, 2007) (FIGURA 5-11):



FIGURA 5-11. SISTEMA COMERCIAL PARA LA MEDIDA DEL HOLLÍN PRODUCIDO POR VELAS (S. TECHNOLOGY, 2007).

El sistema consiste en una malla cilíndrica que encierra la vela, permitiendo el paso de aire, pero impidiendo que los humos abandonen la malla. En su parte superior, hay una placa de vidrio resistente al calor, en la que se depositan los humos. Una vez completado el ensayo, se retira la placa de vidrio y se analiza la cantidad de hollín depositada con ayuda de un opacímetro.

Hay un catálogo normalizado con diferentes diseños en función del tamaño de vela que se desee emplear.

5.6. Ensayos caracterización de la llama

Los ensayos de pirometría se realizaron para la medición de la temperatura y energía radiante emitida por la llama de la vela durante su combustión, uno de los aspectos claves para caracterizar la eficiencia energética y el aprovechamiento de la vela, como se ha discutido arriba en el análisis bibliográfico.



FIGURA 5-12. ARREGLO EXPERIMENTAL PROPUESTO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE PIROMETRÍA

Se analizaron todas las composiciones mostradas en la Tabla 5-3 (P1 a P8) para velas con mecha de tipo encerado. Esta acción permite conocer la influencia de los principales componentes empleados (parafina, estearina y soja) y observar si la adición de arcilla roja provoca cambios significativos en los resultados.

Además de la mecha de tipo encerada, se fabricaron velas con mecha de algodón y mechas bañadas en bórax. Para comprobar si la mecha seleccionada tiene una influencia significativa en los resultados, también se han analizado las velas P1 y estos tipos de mecha.

Tabla 5-3. Composición de las velas fabricadas.

Vela	Parafina (%) m/m	Estearina de palma (%) m/m	Cera de soja (%) m/m	Arcilla Roja (%) m/m
P1	100	--	--	--
P2	90	--	--	10
P3	70	30	--	--
P4	70	--	30	--
P5	30	70	--	--
P6	30	--	70	--
P7	--	100	--	--
P8	--	--	100	--

Para la realización de los ensayos, el entorno debía de estar totalmente a oscuras, siendo el único foco de luz la propia llama a caracterizar. Además, como se aprecia en la Figura 5-12, la distancia entre el objetivo de la cámara y la vela se fijó en 10,5 cm (WD) y el zoom se fijó en el modo X2 (FOV). El resto de los parámetros de la cámara se encuentran desactivados o están en modo "Manual" para que el propio software de la cámara no condicione los fotogramas posteriores a analizar. Además, en la cámara se ha colocado un filtro óptico para evitar la saturación de los pixels y permitir diferenciar las regiones que se forman en la llama.

En pruebas preliminares se comprobó que, al realizar la grabación nada más encender la vela, la caída de la mecha durante la combustión provocaba que, para un mismo punto, la región se viera más o menos oscurecida y por tanto se obtuvieran valores de DN diferentes. Por ese motivo, para estos ensayos se decidió comenzar las grabaciones 2 minutos después del encendido de la vela. De esta manera se asegura que la mecha para todas las grabaciones se encuentre en una posición fija.

En la Figura 5-13 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se enumeran las zonas en las cuales se han obtenidos los valores de los DN. Se ha decidido estudiar la llama en 2 componentes: longitudinal (puntos 10, 6, 4, 2 y 1) y transversal (puntos 14 y 13).

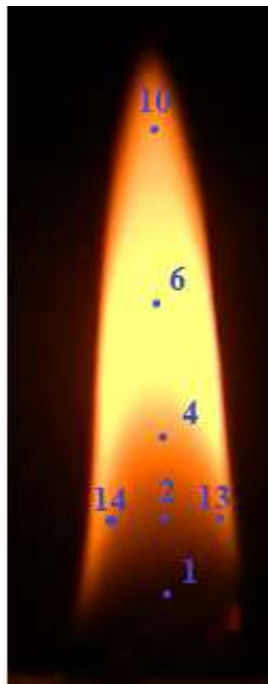


FIGURA 5-13. DISTRIBUCIÓN APROXIMADA DE LOS PUNTOS ANALIZADOS PARA LA LLAMA DE UNA VELA.

Por último, se ha decidió aproximar el área correspondiente a la región visible de la llama. Esto se debe a que, en ensayos anteriores, se evidenció que la altura y el ancho de las velas son variables para cada tipo de composición estudiada.

Para estimar la superficie visible de la llama se empleó un trapecio, cuya base mayor se encuentra en el punto visible más bajo de la llama y la base menor en la punta de esta. La altura se corresponde con la distancia longitudinal entre ambas bases.

Por tanto, los principales objetivos que se desean extraer son los siguientes:

- Chequear si se satura algún pixel para las condiciones de WD y FOV seleccionadas.
- Comprobar la sensibilidad del sensor de la cámara en la medida de la radiación superficial de una llama y entre llamas de diferentes velas.

5.7. Ensayos para caracterización del hollín y duración de la vela

Se detalla a continuación el arreglo experimental desarrollado para medir el hollín producido y el consumo de material durante la combustión de diferentes tipos de velas.

Las velas sobre las que se realizaron los ensayos han sido: (i) las fabricadas mediante las composiciones mostradas en la Tabla 5-4 y diferentes tipos de mecha (algodón, encerada y bañada en Bórax); (ii) las fabricadas con el material principal de los dispositivos antiheladas proporcionados por los partners del proyecto (parafina líquida y estearina animal) y mecha de cartón.

Tabla 5-4. Nomenclatura abreviada de las velas estudiadas según su composición.

Vela	Parafina (%) m/m	Estearina de palma (%) m/m	Cera de soja (%) m/m	Arcilla Roja (%) m/m
P1	100	--	--	--
P2	90	--	--	10
P3	70	30	--	--
P4	70	--	30	--
P5	30	70	--	--
P6	30	--	70	--
P7	--	100	--	--
P8	--	--	100	--

Medición de hollín

Para capturar el hollín generado durante la combustión de una vela y posteriormente cuantificarlo se ha tomado como referencia la norma DIN/EN 1542.

En la Figura 5-14 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el dispositivo empleado para la captura de inquemados.



FIGURA 5-14. ARREGLO EXPERIMENTAL PROPUESTO PARA LA MEDICIÓN DEL HOLLÍN.

Como se observa en la imagen, la vela está contenida en una jaula durante todo el tiempo que dura su combustión. En función del diámetro de las velas la norma distingue 2 tipos de jaulas: (i) en el caso de velas con un diámetro menor de 70 mm se necesitará de una jaula de medición con un diámetro de 230 mm; (ii) para velas con un diámetro superiores y hasta 120 mm, la jaula de medición debe de tener un diámetro de 300 mm.

Las velas elaboradas para el presente proyecto tienen un diámetro de 55 mm, por lo que nos encontramos en la opción (i). Por ese motivo, la jaula de medición propuesta para está elaborada con una papelera de oficina cuyo diámetro de base (parte superior en la Figura 5-14) mide exactamente 230 mm.

Con respecto a la distribución de la jaula, la norma cita una serie de consideraciones que deben cumplirse durante la realización de los ensayos: (a) La distancia entre el borde inferior de la jaula de medición y la superficie de trabajo debe ser al menos 50 mm o (b) Si la distancia real es menor, colocar la vela sobre un zócalo, cuyo diámetro no ser mayor de $1/3$ del diámetro de la jaula de medición.

En nuestro caso, al no disponer de un ningún elemento que garantice una mejor sujeción de los cristales en la parte superior de la jaula, se ha decidido colocar las velas sobre un cilindro de acero que cumple las condiciones anteriormente descritas (opción b).

Según la norma, las velas con un peso mayor de 40 g y un diámetro menor de 70 mm arden durante dos ciclos de 4 horas, con una pausa intermedia de al menos 1 hora entre los ciclos, y una fase de estabilización de la llama de 5 minutos al comienzo del segundo ciclo.

Sin embargo, la situación extraordinaria causada por el Covid-19 y el cierre de los laboratorios en un tiempo aproximado de 3 meses ha obligado a reducir la duración de los ensayos a un único ciclo de 4 horas. Pese a esta ligera modificación, los resultados obtenidos seguirán siendo representativos debido a que, todas las velas fabricadas serán ensayadas bajo las mismas condiciones.

El hollín generado durante la combustión queda retenido en la jaula y asciende hasta depositarse en una placa de cristal.

Para la placa de cristal fue necesario adquirir cristales especiales de Neoceram (cristal vitrocerámico con una resistencia al calor de hasta 800°C). Esto fue debido a que, en las

primeras pruebas realizados con vidrio convencional, se producía la rotura de este por choque térmico a los pocos minutos de comenzar el ensayo (Figura 5-15). **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)



FIGURA 5-15. CRISTALES DE VIDRIO CONVENCIONAL ROTOS COMO CONSECUENCIA DEL CHOQUE TÉRMICO.

Una vez transcurrido el tiempo de ensayo (4 horas), el hollín retenido en el cristal se mide con ayuda de un fotómetro con luxómetro, un panel de iluminación tipo Led y un recipiente que hace de cámara fotométrica. En la Figura 5-16 se muestran todos estos elementos.



FIGURA 5-16. PROCEDIMIENTO PARA MEDIR EL HOLLÍN MEDIANTE EL FOTÓMETRO CON LUXÓMETRO.

El índice de hollín se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H_i = 100 * \left(1 - \left(\frac{\text{Valor de la placa tras el ensayo}}{\text{Valor de la placa antes del ensayo}} \right) \right) \quad (\text{EC7})$$

Por otro lado, estos ensayos permiten conocer el consumo de combustible durante la combustión de la vela. Únicamente basta con conocer su masa antes y después de cada ensayo.

De esta manera, se consigue una mejor caracterización de las composiciones propuestas a fin de seleccionar los mejores resultados.

Por último y una vez realizado el ensayo para cada vela, se ha decidido tomar una fotografía del aspecto que presenta el cristal para poder apreciar también visualmente la deposición de hollín y facilitar la comparación de resultados, tal y como muestra la Figura 5-17.

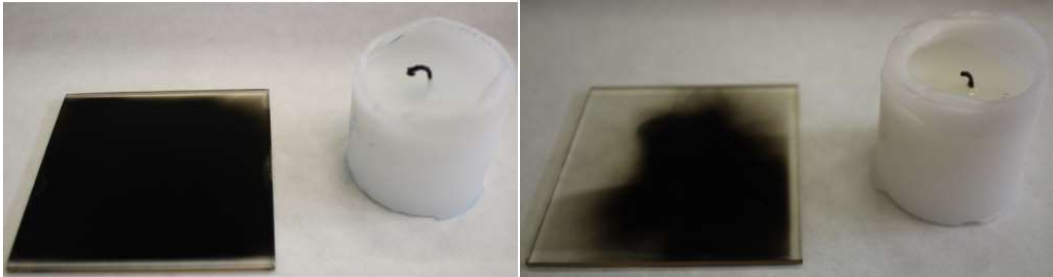


FIGURA 5-17. HOLLÍN DEPOSITADO PARA VELAS 100% PARAFINA CON MECHA DE ALGODÓN (IZQA.) Y ENCERADA (DCHA).

Consumo de las velas

Durante la combustión de las velas, la distancia entre la mecha y la parte superior de la vela se incrementa. Es necesario por tanto comprobar si esta distancia afecta al consumo de material en función del tiempo. Para reproducir esta situación ha sido necesario adquirir 2 recipientes con distintas alturas, tal y como muestra la Figura 5-18.



FIGURA 5-18. RECIPIENTES EN LOS QUE SE ESTUDIARA EL CONSUMO DE MATERIAL.

Se estudian por tanto 3 situaciones de combustión: (i) con la vela al aire libre; (ii) con la vela contenida en el recipiente pequeño (mecha a 30 mm de la superficie); (iii) con la vela contenida en el recipiente grande (mecha a 60 mm de la superficie.)

La metodología seguida para estimar la pérdida de material es la siguiente:

- 1) Se coloca la vela (junto con el recipiente en los casos ii y iii) en una balanza analítica de 4 dígitos, se anota el peso inicial y se enciende la vela.
- 2) Se anota la pérdida de material (g) por unidad de tiempo (min) durante 6 minutos.

- 3) Se deja encendida la vela durante 30 minutos y se repite el paso 2.

Las velas a las que se le realizarán estos ensayos serán las siguientes:

- 4) Vela de estearina animal y parafina líquida (compuestos de las latas) y mecha de cartón (original en la lata).
- 5) Vela de estearina animal y parafina líquida y mecha con la que se hayan obtenido mejores resultados en las pruebas de hollín.
- 6) Vela de parafina (P1) y estearina animal (P7) (por ser compuestos opuestos a los de las latas) y mecha que de mejores resultados en la prueba del hollín.
- 7) 2 composiciones de velas y mecha con la que se hayan obtenido resultados destacables en la prueba de hollín.

Nota: Esta selección de velas se ha hecho únicamente con la idea de lograr una mejor caracterización de los compuestos problemáticos y de las composiciones propuestas que generan poco hollín.

Por último, destacar que, dado que con las pruebas de hollín también se estima la pérdida de material durante la duración de los ensayos (4 h), los resultados de ambos ensayos se compararán y servirán para comprobar si existe alguna diferencia de consumo destacable.

5.8. Resultados de caracterización de la llama

La Tabla 5-5 muestra los resultados obtenidos para las 8 composiciones analizadas en velas con mecha de tipo encerado. Por otro lado, en la Tabla 5-6, se comparan los resultados obtenidos para la composición 100% Parafina (P1) y los 3 tipos de mecha empleados.

Los valores de los DN, así como la superficie de la llama, se han obtenido mediante un promedio de 4 fotogramas distintos para dentro de una misma composición.

Como se observa, únicamente se muestran los resultados para los puntos longitudinales (1, 2, 4, 6 y 10). Los valores de DN para los puntos transversales (14 y 13) no se han reportado debido a las grandes fluctuaciones que presentaban para un mismo punto, es decir, su valor está influenciado por el píxel seleccionado.

*Nota: Cabe destacar que, una vez extraídos los fotogramas para cada una de las grabaciones realizadas, se evidencia la formación de una región blanca (zonas de mayor temperatura) en el centro de la llama (Figura 5-19). **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Tras comprobar cerca de 300 fotogramas, se cuantifica que esta región únicamente aparece en 9, es decir, en menos de un 5% del total. Esta situación, por tanto, se puede interpretar como un fenómeno que ocurre de manera excepcional (por ejemplo, como consecuencia de alguna reacción durante la combustión) y no se tiene en cuenta para establecer las condiciones de grabación óptimas.*



FIGURA 5-19. LLAMA PARA UNA VELA 100% SOJA (P8) EN LOS ENSAYOS REALIZADOS EL 19 DE JUNIO DE 2020 (IZQA.) Y EL 15 DE JUNIO DE 2020 (DCHA).

Tabla 5-5. Resultados obtenidos para velas con mecha de tipo encerada y distintas composiciones.

Composición Vela	PTO 1 (Radiación MIN)			PTO 2			PTO 4			PTO 6 (Radiación MAX)			PTO 10			SUPERFICIE PX ²
	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	
P1	36	8	1	125	39	0	255	178	89	255	255	128	254	117	10	52142
P2	31	8	0	126	41	0	254	184	95	255	255	129	255	114	6	48732
P3	36	9	0	124	43	1	255	187	97	255	255	136	255	128	23	32128
P4	28	6	0	125	40	0	255	179	91	255	255	129	255	116	12	59241
P5	35	7	0	124	40	0	255	183	91	255	255	132	255	141	38	78204
P6	48	11	0	114	33	0	255	187	97	255	255	129	255	117	11	44985
P7	45	11	0	130	45	0	255	185	96	255	255	130	255	127	19	36775
P8	51	12	0	135	47	1	255	194	104	255	255	130	253	120	12	82320

Tabla 5-6. Resultados obtenidos para velas 100% Parafina (P1) y distintos tipos de mecha

Tipo de Mecha	PTO 1 (Radiación MIN)			PTO 2			PTO 4			PTO 6 (Radiación MAX)			PTO 10			SUPERFICIE PX ²
	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	DN rojo	DN verde	DN azul	
Algodón	42	9	0	127	40	1	254	168	75	255	255	132	252	120	14	70566
Encerada	36	8	1	125	39	0	255	178	89	255	255	128	254	117	10	52142
Bañada en Borax	81	20	1	146	52	0	254	176	87	255	255	131	245	109	10	48018

Análisis de resultados

Con los resultados de estos primeros ensayos se ha comprobado que las condiciones de grabación seleccionadas (WD, FOV) permiten a la cámara capturar la radiación sin saturarse y, además, se ha comprobado que la cámara permite identificar temperaturas superficiales distintas para una misma llama y diferencias entre llamas utilizando diferentes velas.

La principal conclusión obtenida de estas primeras pruebas es que no existe diferencia en la radiación capturada/medida por la cámara para las diferentes velas testadas.

Ante esta situación se propuso comprobar si la emisividad de las velas era la razón por la cual se producían llamas con idéntica radiación emitida. Para ello se debería de insertar un termopar de 0,5 mm, de manera transversal a la llama, y medir la temperatura generada. La región de la llama en la que se realizó este estudio ha sido en el punto 6, debido a que es aquel en el que se registraron mayores valores de radiación.

Estas pruebas se realizaron para las 8 composiciones de velas propuestas y mechas de tipo encerada (Tabla 5-7).

Tabla 5-7. Valores de temperaturas medidos en el punto de máxima radiación para velas con mecha encerada.

Composición Vela	Temperatura (°C)
100 % Parafina	915,50
90% Parafina - 10% Arc Roja	914,12
70% Parafina - 30% Estearina	915,63
70% Parafina - 30% Soja	914,03
30% Parafina - 70% Estearina	924,95
30 % Parafina – 70 % Soja	913,77
100% Estearina	921,16
100% Soja	918,14

Con los resultados obtenidos, para los DN de la cámara y la temperatura mediante termopar, se deduce que la emisividad de todas las velas analizadas es muy similar. Para comprender lo anterior, se debe tener en cuenta que la radiosidad de la llama de una vela es la suma de su emitancia más la radiación reflejada de la irradiancia, es decir, la suma de lo que emite debido a su temperatura, más la que refleja de toda la radiación que le llega del intercambio radiante entra las superficies que le rodea y ella misma. Teniendo en cuenta que durante los ensayos la llama es el único objeto que emite radiación (pues los experimentos se llevan a cabo en una habitación totalmente a oscuras), la ecuación que modela la radiación emitida por la llama es:

$$j_v = \epsilon_v \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_v}\right) \tag{EC8}$$

donde:

- j_v es la radiosidad de la vela.
- ε_v es la emisividad de la vela.
- c_1 y c_2 son constante de la ley de Planck.
- λ es la longitud de onda central del intervalo espectral de cada color (rojo, verde o azul).
- T_v es la temperatura de la vela.

La radiación (j_v) se puede estimar mediante los números digitales proporcionados por la cámara, como muestra la relación la siguiente ecuación:

$$j_v(\lambda, T_v) = \beta \cdot DN \quad (EC9)$$

donde β absorbería los parámetros ópticos y electrónicos del sistema, además de la relación entre el brillo y la temperatura. β se obtendría mediante ensayos de calibración y validación y su valor sería una constante.

Sustituyendo (EC9) en (EC8) se obtiene que:

$$\beta \cdot DN = \varepsilon_v \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_v}\right) \quad (EC9)$$

Por tanto, si la radiación máxima capturada para cada una de las velas analizadas es idéntica (DN), la temperatura de la llama en el punto de máxima radiación presenta valores similares (T_v) y el resto de los parámetros de la ecuación (β , c_1 , c_2 y λ) son constantes, se deduce que la emisividad de todas las velas analizadas es prácticamente la misma.

En resumen, de los ensayos de caracterización de llama se puede concluir lo siguiente:

- Las condiciones de grabación establecidas (WD = 10,5 cm, FOV= Zoom x2) permiten que la cámara capte la radiación sin saturarse.
- La sensibilidad de la cámara es suficiente como para identificar distintas temperaturas superficiales para una misma llama y diferencias entre llamas utilizando diferentes velas.
- Las velas, independientemente de su composición, producen llamas con idéntica radiación emitida, es decir, la radiación máxima capturada para cada una de ellas es idéntica. Además, se ha comprobado que no se debe a distintas emisividades: se ha medido por termopar la temperatura de llama (en la región donde mayor radiación emite) y esta es idéntica $920 \pm 5^\circ\text{C}$.
- La composición de las velas, así como el tipo y tamaño de la mecha, afectan a la superficie de llama.

5.9. Resultados de caracterización del hollín y velocidad de consumo

Las velas sobre las que finalmente se realizaron los ensayos de consumo, teniendo en cuenta los criterios descritos en el apartado 5.7, se muestran en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Composición y tipos de mecha empleados durante los ensayos de consumo de material.

Composición Vela	Tipo de mecha
100 % Estearina Animal	Cartón
100 % Parafina Líquida	Cartón
100 % Estearina Animal	Encerada
100 % Parafina Líquida	Encerada
100 % Estearina Vegetal	Encerada
100 % Parafina	Encerada
Parafina (70%) – Estearina (30%)	Encerada
Parafina (30%) – Estearina (70%)	Encerada

Durante la realización de los ensayos se ha observado lo siguiente:

- El tamaño de la llama depende de la cantidad de material alrededor de la llama. Esto es, cuando la llama se encuentra inundada por combustible, su tamaño disminuye y por ello se producirá un consumo de combustible menor. Una vez que se produce el vaciado, la llama vuelve a su altura inicial y por lo tanto a su consumo de combustible normal.
- El tamaño de la llama depende de la cantidad de mecha que se coloque hacia el exterior de la vela, ya sea con cartón o con mecha de algodón encerada.
- Debido al bajo punto de fusión de la parafina líquida la vela se derretía en su totalidad a los pocos minutos de iniciar el ensayo. Además, la mecha (tanto encerada como de cartón), perdía su firmeza y al entrar en contacto con la cera líquida se apagaba. Esta situación no ha permitido recoger datos experimentales del consumo de material (como se ve en la Tabla 5-9).

En la Tabla 5-9 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de consumo de material en función del tiempo. Las columnas 3 a 5 indican, mediante un promedio, las medidas tomadas en los 6 primeros minutos de ensayo. En la columna 6, dado que los resultados obtenidos para cada ubicación de la vela (aire libre o en recipientes) eran similares, se realizó un promedio con todos los valores. Por último, la columna 7 se indican el consumo medido durante los ensayos de hollín (con la vela al aire libre durante 4 horas).

Tabla 5-9. Resultados obtenidos durante los ensayos de consumo de material.

Composición Vela	Mecha	Consumo medio al aire libre (g/min)	Consumo medio a 30 mm (g/min)	Consumo medio a 60 mm (g/min)	Consumo tras 30 min (g/min)	Consumo medio ensayo hollín (g/min)
100 % Estearina animal	Cartón	0,07	0,07	0,15	0,05	0,08
100 % Parafina líquida	Cartón	--	--	--	--	--
100 % Estearina animal	Encerada	0,1	0,09	0,08	0,04	0,06
100 % Parafina líquida	Encerada	--	--	--	--	--
100 % Estearina vegetal	Encerada	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08
100 % Parafina	Encerada	0,08	0,08	0,07	0,05	0,06
70 % Parafina - 30 % Estearina	Encerada	0,08	0,09	0,08	0,05	0,09
30 % Parafina - 70 % Estearina	Encerada	0,09	0,09	0,1	0,06	0,08

Con respecto a los resultados del consumo durante los primeros 6 minutos de ensayo apenas se aprecian cambios significativos. Únicamente destacan los valores obtenidos para la composición 100% estearina animal y mecha de cartón, donde se consume aproximadamente el doble de material cuando la llama se encuentra a 60 mm de la superficie.

Se comprueba además que, para muchas composiciones (por ejemplo, 100% Estearina vegetal, los valores de consumo durante los primeros 6 minutos se mantienen constantes en la segunda medición (30 minutos) y estos son prácticamente iguales a los obtenidos durante los ensayos de hollín (4 horas).

En otras composiciones como 70% parafina - 30% estearina, los valores durante los primeros minutos y en el ensayo de hollín son similares. Sin embargo, se alcanza un valor mínimo en el consumo a los 30 minutos.

Se puede concluir por tanto que, el consumo de combustible depende de la cantidad de material alrededor de la llama. Es decir, al inicio, antes de que se comience a fundir el combustible, el consumo es más elevado. Posteriormente, al quedar la mecha inundada de combustible este consumo es menor. Esto ocurre así hasta que tiene lugar el vaciado del líquido alrededor de la mecha, ya sea manualmente o bien porque se forme una vía de salida para dicho combustible líquido (goteo).

Goteo durante la realización de los ensayos para medir el hollín

Durante la realización de los ensayos para medir el hollín se ha dado lugar que, en determinadas velas en las que la mecha no está posicionada correctamente en el centro de esta, su estructura e integridad se ve afectada.

Este fenómeno en el que la cera líquida se escurre, conocido como goteo, se presentó muy levemente para alguna de las composiciones P5 a P7 y en velas de estearina animal y con una mayor intensidad en la composición P8 (100% Soja), tal y como muestra la Figura 5-20.

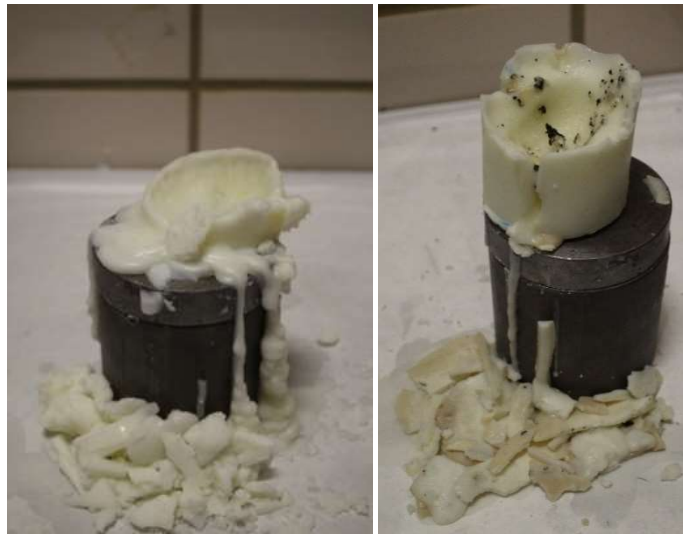


FIGURA 5-20. ESTADO DE LA VELA 100% SOJA Y MECHA DE ALGODÓN (IZQA.) Y MECHA DE BÓRAX (DCHA.) DURANTE EL ENSAYO PARA MEDIR HOLLÍN.

En algunos casos, como en el caso del ensayo con la vela 100% Soja y mecha de algodón (Figura 5-20; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** izqda.) ha sido necesario rehacer la vela tras un primer ciclo de combustión de 2,5 horas y completar el ensayo. Esto ha sido debido a que la vela estaba totalmente derretida y se había consumido toda la mecha.

En otros ensayos, como el mostrado en la Figura 5-20 derecha, se pudo llegar completar el ensayo en su totalidad sin necesidad de reconstruir la vela.

De este hecho se deduce que la presencia de una mecha que abarque un área de mayor tamaño y/o que se extienda hacia los laterales de las velas (como ocurre en las latas de empresa suministradas, Figura 5-21), obliga a que el material debe de estar contenido en un recipiente para evitar su derrame. Asimismo, estos contenedores deben de ser empleados en velas elaboradas con compuestos que presenten bajos puntos de fusión (parafina líquida) o baja dureza (soja).



FIGURA 5-21. TAMAÑO Y DISPOSICIÓN DE LA MECHA EN LAS LATAS SUMINISTRADAS POR S.A.T. ROYAL.

Conclusiones preliminares

A la vista de los resultados, tanto para los ensayos de hollín como para las pruebas de consumo de material, las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Los arreglos experimentales propuestos permiten capturar y cuantificar adecuadamente el hollín generado durante la combustión de las velas y estimar la velocidad de consumo de material.
- Los ensayos de velas con mecha bañadas en bórax (Tabla 5-12) se han descartado debido principalmente a 3 factores: ensuciamiento del cristal que retiene el hollín debido a “chispazos” de cera, autoconsumo de la llama debido al conglomerado de perlas quemadas que se forma en la mecha y dificultades asociadas al encendido.
- Para el resto de mechas propuestas (algodón: Tabla 5-10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y enceradas: Tabla 5-11; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), las velas fabricadas con 100% parafina (P1) presentan los valores más altos de hollín. Sin embargo, al mezclar este compuesto con arcilla roja (P2) se consigue reducir la cantidad de inquemados generados.
- A medida que se añade estearina de palma o soja (P3 - P8) disminuye la formación de hollín. Para una misma composición, la cantidad de hollín y la velocidad de consumo de material es menor cuando se trabaja con mechas de tipo enceradas.
- Las velas fabricadas con estearina animal (lata S.A.T Royal) presentan 2 principales beneficios con respecto a las de parafina líquida (lata Primor): permiten completar todos los ensayos en su totalidad y producen hollín en mucha menor cantidad. Además, la generación de inquemados en las velas preparadas con estearina es muy baja, ya sea empleando una mecha de cartón o una mecha de algodón encerado.

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El tamaño y disposición de la mecha dentro de la lata, ya que podría ser que, si la mecha ocupa todo el contorno del recipiente, el flujo de oxígeno hacia el interior no sea el suficiente y de lugar a una peor combustión.
- El sistema de encendido de la mecha. Actualmente las latas se encienden mediante una mezcla casera hecha de gasolina al 40% y gasóleo al 60%, por lo que se debería comprobar si este método favorece la formación de hollín.
- La velocidad de consumo de combustible y la altura de la llama dependen principalmente de la cantidad de material fundido que hay presente alrededor de la llama. En los primeros minutos, tras el encendido de la vela, la velocidad de consumo es más elevada. Esto se debe a que la cera próxima a la mecha aún no se ha fundido completamente. Posteriormente, cuando la mecha queda inundada de combustible, la altura de la llama disminuye y por ello se reduce la velocidad de consumo. Cuando toda la cera derretida se retira de la vela, ya sea manualmente o bien porque se produce el goteo, la llama vuelve a su altura inicial y por lo tanto a su velocidad de consumo inicial. Se ha comprobado además que otros factores, como la cantidad de mecha que se coloque hacia el exterior de la vela, también afecta a el consumo y tamaño de la llama.
- Por último, se comprobó que la integridad estructural de la vela se ve afectada por la ubicación de la mecha. Cuanto más próxima se situó la mecha de los contornos de la vela mayor será el goteo producido. Por tanto, aquellas velas que estén formadas por materiales con bajo punto de fusión o dureza y, con el fin de evitar sufrir pérdidas de material, necesitan de un recipiente que las contenga. Otra opción es adoptar soluciones que implican la adición de sustancias que evitan el goteo o aumenten la dureza de la vela. Por ejemplo, la patente US3615284 recomienda el uso de arcilla roja frente al goteo y polietileno de peso molecular ultra elevado para aumentar la dureza.

Tabla 5-10. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha de algodón y distintas composiciones.

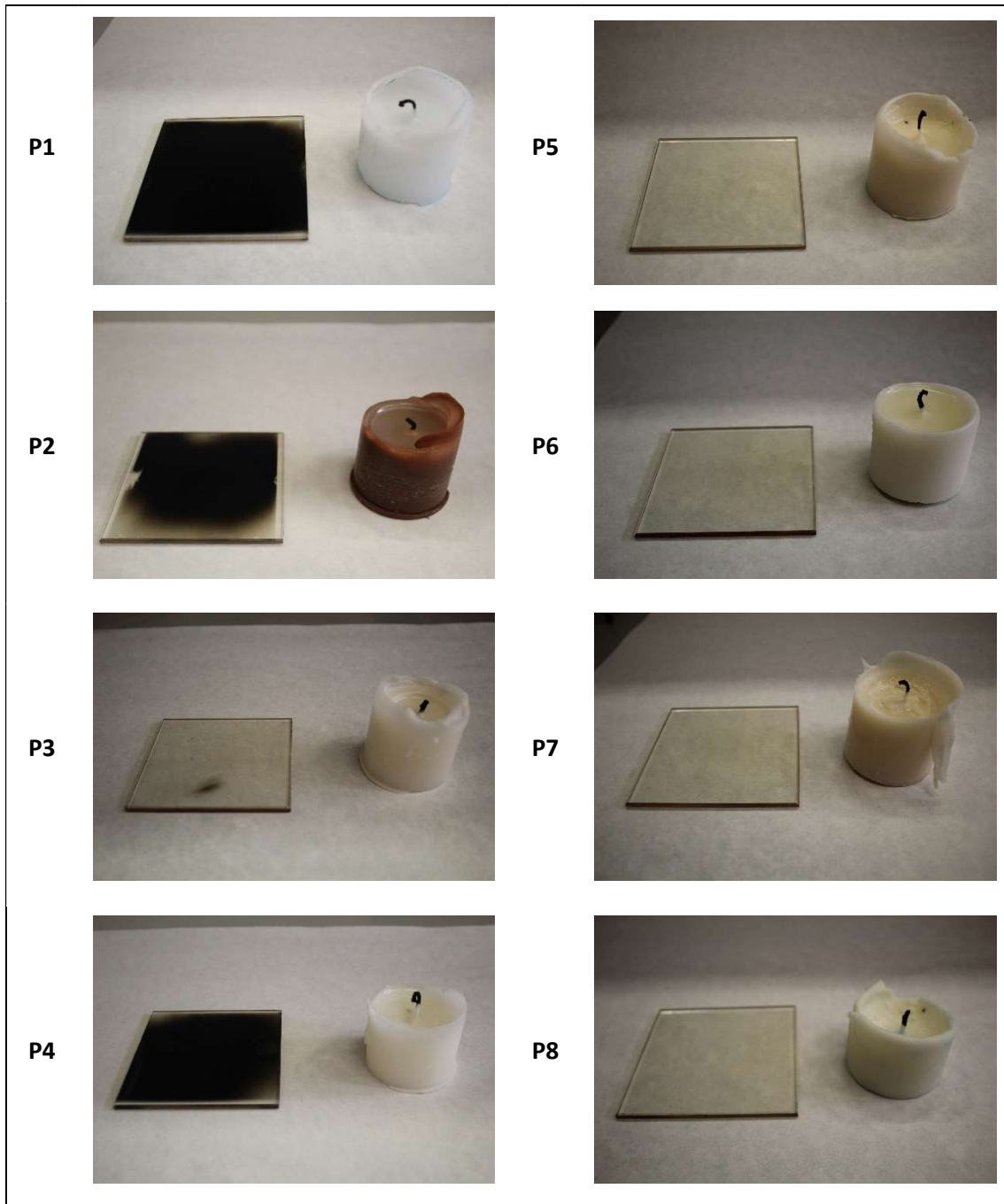


Tabla 5-11. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha encerada y distintas composiciones.

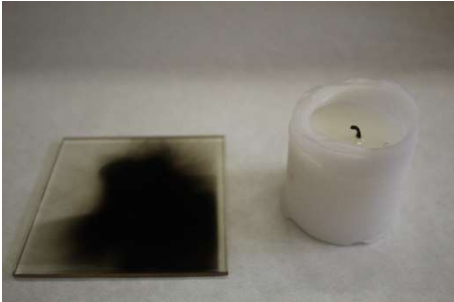
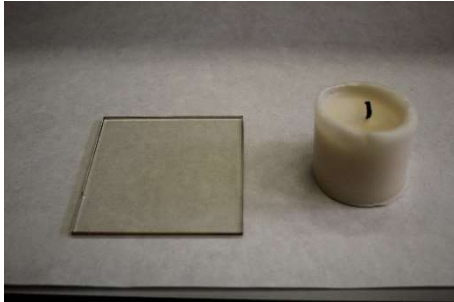
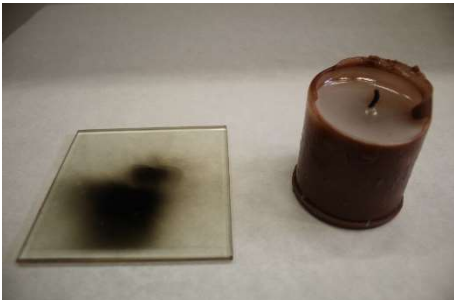

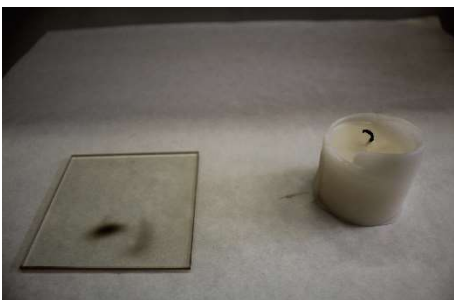
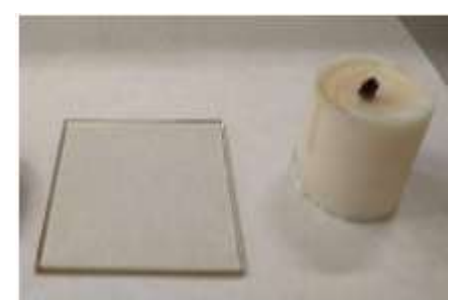
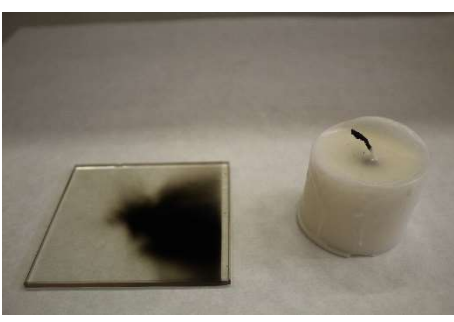

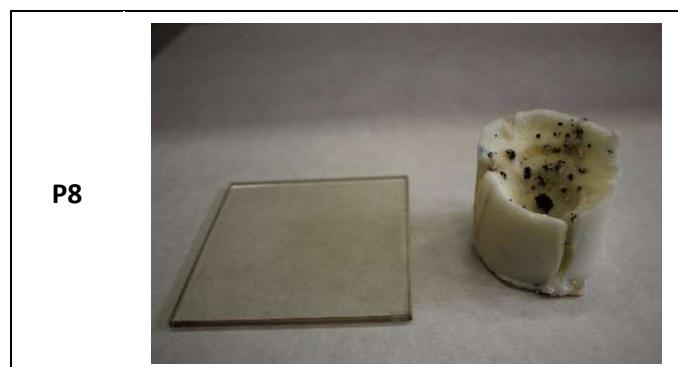
<p>P1</p> 	<p>P5</p> 
<p>P2</p> 	<p>P6</p> 
<p>P3</p> 	<p>P7</p> 
<p>P4</p> 	<p>P8</p> 

Tabla 5-12. Estado del cristal tras la realización de ensayos de hollín para velas con mecha encerada y distintas composiciones.



5.10. Pruebas de campo

Elección de la parcela del ensayo y diseño

A la hora de escoger una parcela para llevar a cabo los ensayos de este proyecto se han tomado en cuenta los siguientes criterios:

- Ha de ser lo más llana posible, para así evitar la variabilidad debida a la orografía (la parcela escogida sólo tiene la pendiente normal de evacuación de aguas pluviales).
- Debe estar situada en una zona de la finca que habitualmente sea sensible a las heladas de primavera.
- Cada bloque del ensayo debe tener una superficie aproximada de una hectárea

Atendiendo a estas premisas se ha elegido una parcela de la Finca La Jarilla de la empresa SAT Nº 8697 ROYAL que permite un diseño adecuado para este tipo de ensayo. La referencia SIGPAC de dicha parcela es 41.81.00.00.15.1.25. Se trata de una plantación de nectarina cuya cosecha se realiza en el mes de mayo.

El marco de plantación es de 5 m entre filas y de 3 m entre árboles, lo que resulta en unos 666 árboles por hectárea.

Los dos bloques de cultivo en ensayo se han aproximado a la superficie de 1 Ha, componiéndose cada uno de 17 filas con 45 árboles, por lo que cada bloque representa una superficie de 1,14 Ha y unos 765 árboles. Por su parte, el bloque que sirve como testigo, se sitúa en medio de los otros dos y se compone de 15 filas de 45 árboles cada una, quedando en 1,01 Ha y 675 árboles.



FIGURA 5-22. PARCELA DE LA FINCA LA JARILLA ELEGIDA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO.

Fechas

Para realizar las pruebas de campo, se escogen días en los que la previsión meteorológica se acerque lo más posible a las condiciones habituales de riesgo de heladas para el cultivo del melocotonero en la provincia de Sevilla. Tras el inicio de la brotación se siguen las previsiones diarias de temperatura esperando el mejor momento para llevar a cabo los ensayos.

Dado que durante este invierno las temperaturas mínimas no han llegado a alcanzar los niveles de riesgo de daño para el cultivo se decidió iniciar los ensayos tomando en cuenta las previsiones de temperatura más bajas entre mitad del mes de febrero y primera quincena de marzo.

Así, llegando al final de febrero sin haber encontrado otro periodo más favorable se realizaron las primeras pruebas los días: lunes 24, martes 25 y miércoles 26 de febrero. Éstas fueron noches despejadas con bajada de las temperaturas mínimas hasta niveles inferiores al resto del mes. Luego se decide esperar a que se vuelvan a dar condiciones favorables.

Las pruebas restantes se realizaron los días 6 y 7 de marzo, que fueron también las más frías de esas fechas.

Material de ensayo

Se realizan los ensayos con el material disponible, es decir con dos tipos de latas fabricadas específicamente para la protección antiheladas, una con parafina de petróleo, y la otra con estearina animal (material renovable que genera menos humo). Las características técnicas o especificaciones de cada una de ellas se detallan en sus correspondientes fichas técnicas.

Los dos modelos de velas son parecidos. Se trata de latas metálicas de tipo pintura, de 5 litros de capacidad, que contienen el material combustible y una mecha de cartón.



FIGURA 5-23. LATAS EMPLEADAS EN LAS PRUEBAS DE CAMPO.

Ambos tipos de fabricaciones son presentadas en sus especificaciones con una durabilidad parecida, en torno a unas 10 horas. Debido a la necesidad de establecer un criterio homogéneo para todas las noches de ensayo se decide fijar una hora de encendido estándar, que permita realizar una cantidad suficiente de mediciones, independientemente del nivel de frío esperado en cada episodio de helada. En concreto, se fija las 12 horas de la medianoche para iniciar el encendido, dejándose funcionar el sistema hasta tener combustión total del material de la lata (es decir apagado natural de la llama por falta de combustible).



FIGURA 5-24. DISTRIBUCIÓN DE LAS LATAS ANTIHELADAS EN LA PARCELA.

Tal y como puede observarse en la Figura 5-24, las latas en las parcelas en ensayo se distribuyen situándose en los huecos entre árboles y fijando una lata cada 2 huecos en todas las filas. Así se consigue una distribución homogénea de 333 latas por hectárea.

Atendiendo a este diseño de ensayo se han empleado 380 latas en cada bloque, lo que supone un gasto total de 3800 latas antiheladas (1900 latas de parafina y otras 1900 latas de estearina) entre todos los ensayos desarrollados.

Mediciones de temperatura

La temperatura se mide gracias a la instalación de termómetros fijos, a una altura de 40 cm del suelo (altura de la zona productiva más baja y sensible del árbol). Son termómetros de tolueno, previamente calibrados en agua con hielo. Cada termómetro lleva una etiqueta con la corrección de lectura resultante de la calibración.

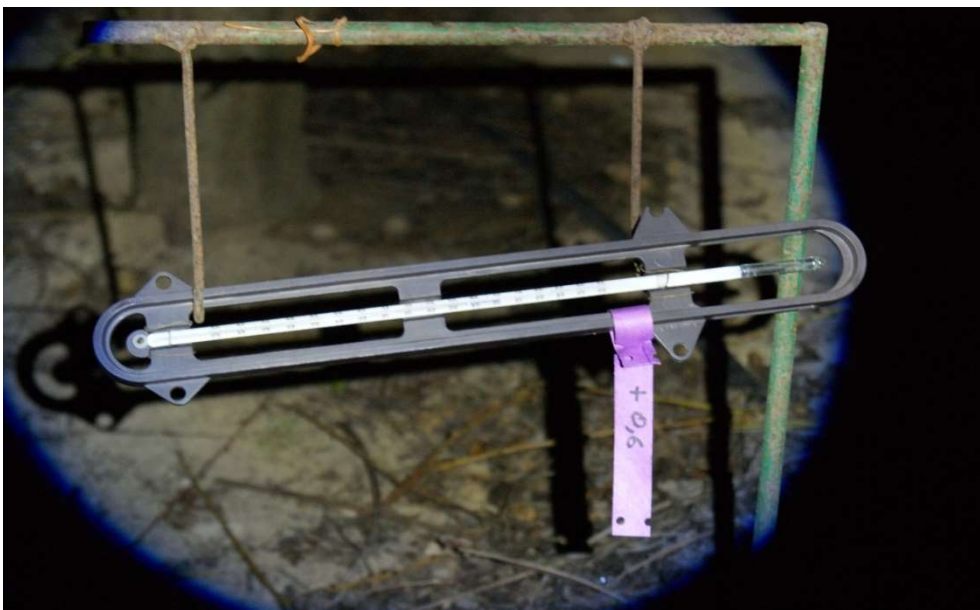


FIGURA 5-25. TERMÓMETROS FIJOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE CAMPO.

Además, se dispone de termómetros digitales de la marca TESTO calibrados y certificados que permiten una mayor flexibilidad, y nos sirven para la verificación constante de la calidad de los termómetros de referencia.

Debido a que las latas de velas se colocan cada dos árboles, los termómetros se instalan en el hueco que no tiene lata, para evitar el sobrecalentamiento debido a la excesiva proximidad de la llama. De esta manera, cada termómetro se encuentra a una distancia mínima de 2,5 metros de la llama más próxima.

En cada bloque de ensayo se han dispuesto 3 termómetros, repartidos en las filas intermedias (fila 9 en los bloques de estearina y parafina y fila 8 en el testigo), entre los árboles 9 y 10, 21 y 22, 33 y 34.

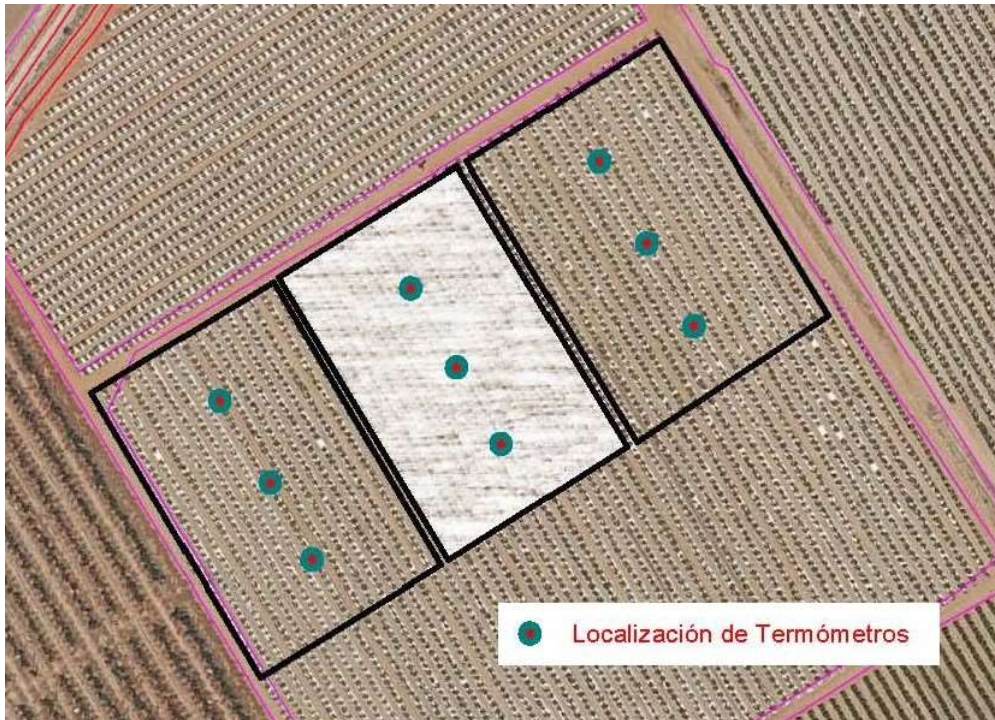


FIGURA 5-26. UBICACIÓN DE LOS TERMÓMETROS DIGITALES EN LA PARCELAS DE ENSAYO.

Encendido

A la hora fijada (00:00 H), se toman las lecturas iniciales de Temperatura previo al inicio del ensayo y se encienden manualmente los mecheros. Los dispositivos antiheladas (velas), se prenden simultáneamente en los dos bloques del ensayo, para evitar disimetría provocada por el encendido. Se necesitan 4 personas por cada bloque. El tiempo empleado para el encendido total de los bloques en ensayo es de unos 15 minutos aproximadamente. Para que toda la parcela empiece a calentar conjuntamente, se realiza un encendido a filas alternas, redoblado enseguida.

Cada persona está equipada con un mechero (tipo de regadera metálica rellena con una mezcla de gasolina y gasoil) y una antorcha.

Para que el proceso de encendido se lleve a cabo con la mayor celeridad, las latas de han destapado previamente, de forma que no se entorpezca la labor y haya las mínimas diferencias debidas a errores de encendido entre los bloques a ensayar.



FIGURA 5-27. OPERARIO ENCENDIENDO UNO DE LOS DISPOSITIVOS ANTIHELADA EMPLEADOS.

Lecturas de temperatura

Las mediciones manuales de la temperatura se realizan cada 30 minutos, iniciando la lectura en el momento del encendido (00:00 H), y finalizando a las 10:00 h de la mañana. Cada noche de encendido da lugar a unas 21 lecturas de temperatura por cada punto de medición.

En la elaboración de los datos se han tomado en cuenta todas las lecturas realizadas, llevando a cabo el cálculo de las temperaturas medias de cada bloque para compensar las posibles diferencias que pudieran deberse a las variables no controladas, como puede ser la presencia de aire durante la noche.

A continuación, las Tabla 5-13 a Tabla 5-17 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** recogen los datos medios obtenidos de la lectura de los tres termómetros colocados en cada bloque y las Figura 5-28 a Figura 5-32 la evolución de dichas temperatura en cada una de las noches.

Tabla 5-13. Valores de temperatura registrados durante la noche del 24/02/2020.

TEMPERATURAS (°C)			
HORA	TESTIGO	ESTEARINA	PARAFINA
0:00	14,0	14,1	14,2
0:30	13,8	14,9	15,5
1:00	12,2	13,9	14,7
1:30	12,0	13,8	13,4
2:00	12,3	13,8	14,2
2:30	11,0	13,1	13,3
3:00	10,6	13,1	12,5
3:30	9,8	11,6	11,7
4:00	9,6	11,2	11,8
4:30	9,5	11,0	11,5
5:00	6,6	8,6	9,5
5:30	6,2	7,8	8,7
6:00	6,0	7,8	7,9
6:30	5,9	7,7	8,2
7:00	5,0	7,0	7,5
7:30	4,3	6,1	6,7
8:00	4,6	6,5	7,2
8:30	5,4	6,5	7,4
9:00	6,2	7,5	8,7
9:30	6,8	7,9	8,4
10:00	7,0	8,0	8,2

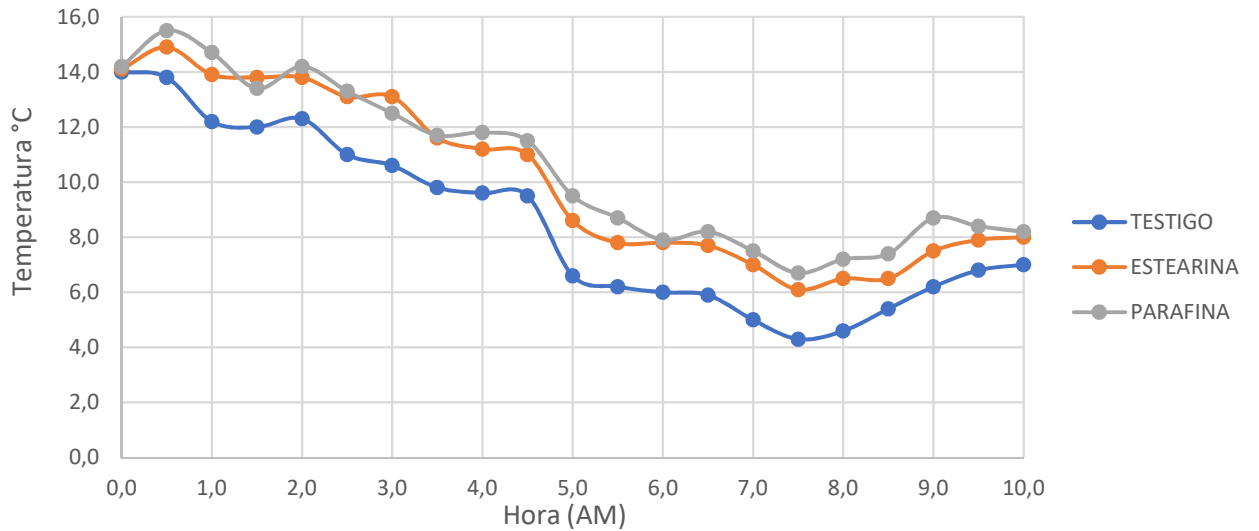


FIGURA 5-28. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 24/02/2020.

Tabla 5-14. Valores de temperatura registrados durante la noche del 25/02/2020.

TEMPERATURAS (°C)			
HORA	TESTIGO	ESTEARINA	PARAFINA
0:00	13,0	13,0	13,0
0:30	13,1	14,2	14,8
1:00	12,6	14,3	15,1
1:30	12,0	13,8	13,4
2:00	11,8	13,3	13,7
2:30	11,0	13,1	13,3
3:00	10,2	12,7	12,1
3:30	8,6	10,4	10,5
4:00	8,5	10,1	10,7
4:30	8,2	9,7	10,2
5:00	8,0	10,0	10,9
5:30	6,5	8,1	9,0
6:00	6,2	8,0	8,1
6:30	6,3	8,1	8,6
7:00	5,1	7,1	7,6
7:30	4,8	6,6	7,2
8:00	5,0	6,9	7,6
8:30	6,0	7,1	8,0
9:00	6,3	7,6	8,8
9:30	7,0	8,1	8,6
10:00	7,5	8,5	8,7

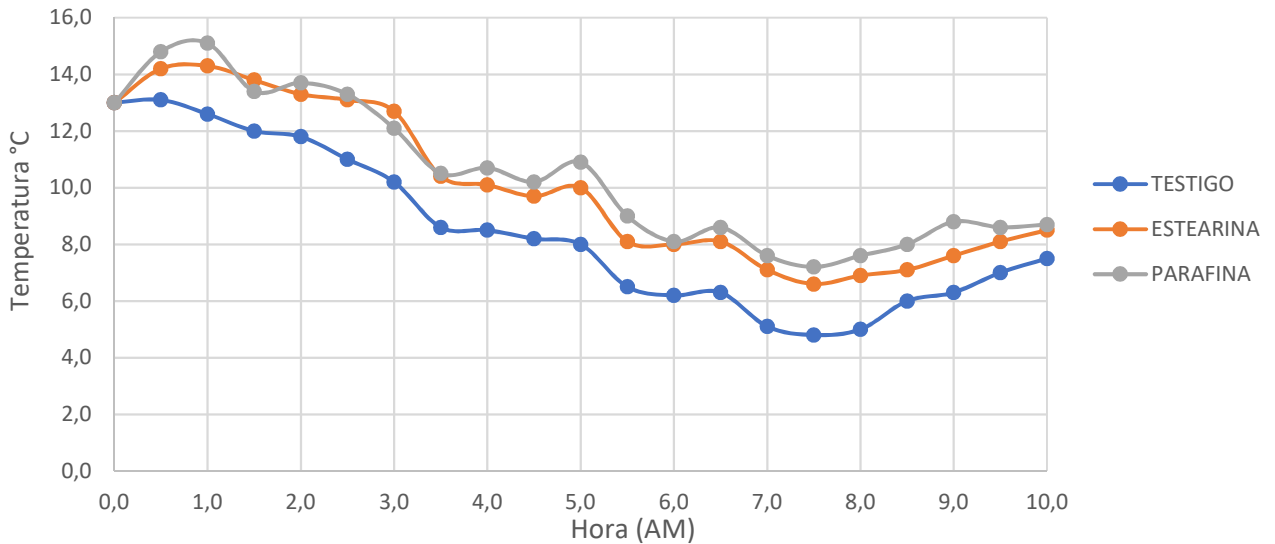


FIGURA 5-29. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 25/02/2020.

Tabla 5-15. Valores de temperatura registrados durante la noche del 26/02/2020.

TEMPERATURAS (°C)			
HORA	TESTIGO	ESTEARINA	PARAFINA
0:00	13,6	13,4	13,6
0:30	13	14,1	14,7
1:00	12,4	14,1	14,9
1:30	11,1	12,9	12,5
2:00	10,7	12,2	12,6
2:30	9,8	11,9	12,1
3:00	10	12,5	11,9
3:30	9,7	11,5	11,6
4:00	9	10,9	11,2
4:30	8,5	10,6	10,5
5:00	8,3	10,3	11,2
5:30	8	9,8	10,5
6:00	6	8,1	8,8
6:30	6,5	8,3	8,8
7:00	5,4	7,7	7,9
7:30	4,6	6,4	7,1
8:00	5	6,9	7,6
8:30	5,9	7	7,9
9:00	6,1	6,9	8,2
9:30	6,8	7,4	8,1
10:00	7,2	7,2	7,7

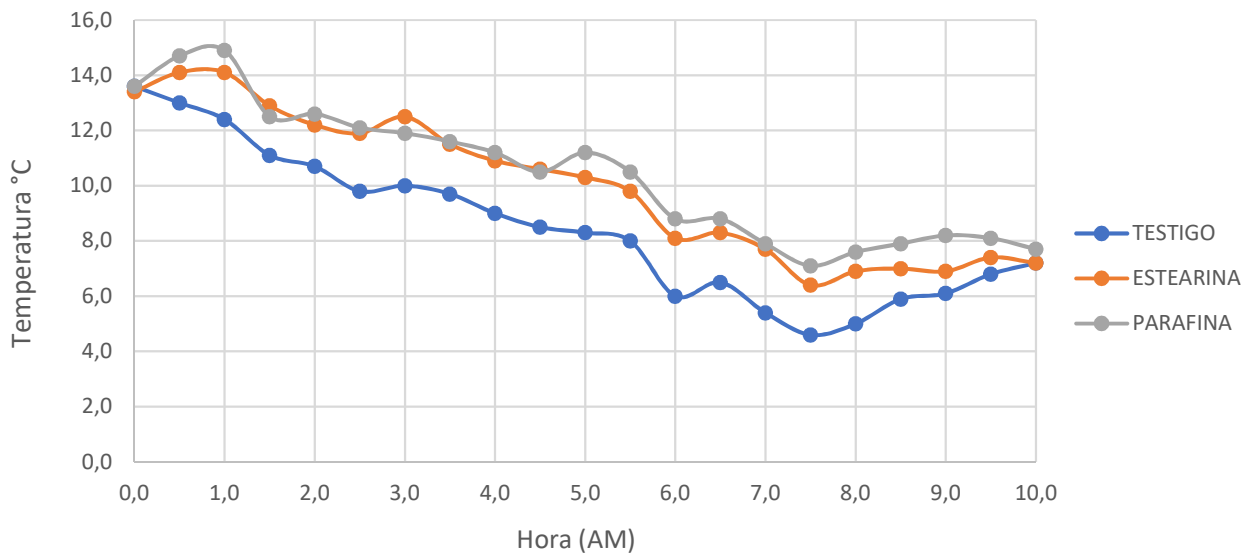


FIGURA 5-30 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 26/02/2020.

Tabla 5-16. Valores de temperatura registrados durante la noche del 06/03/2020.

TEMPERATURAS (°C)			
HORA	TESTIGO	ESTEARINA	PARAFINA
0:00	14,1	14,1	13,9
0:30	11,9	13	13,6
1:00	9,8	11,3	12,3
1:30	9,6	11,6	12
2:00	9,9	11,6	11,8
2:30	8,8	10,9	11,1
3:00	7,2	9,9	9,8
3:30	7,6	9,9	9,8
4:00	7,9	9	9,9
4:30	7,5	9,4	9,5
5:00	7,1	9,1	9,7
5:30	6,1	7,9	8,1
6:00	5,6	7,4	7,5
6:30	5,2	7	7,5
7:00	4,6	6,6	7,1
7:30	4,8	6,6	7,2
8:00	4,9	6,6	7,5
8:30	6,6	7,7	8,4
9:00	6,8	7,7	8,8
9:30	8,1	8,6	9,4
10:00	8,4	8,6	9,6

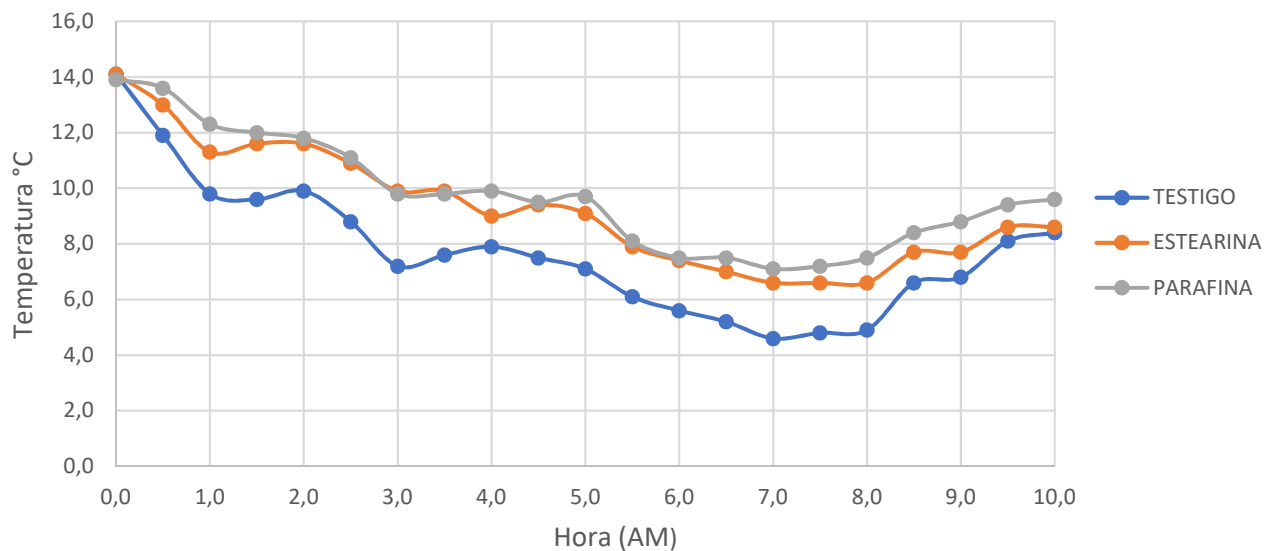


FIGURA 5-31. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 26/02/2020.

Tabla 5-17. Valores de temperatura registrados durante la noche del 07/03/2020.

TEMPERATURAS (°C)			
HORA	TESTIGO	ESTEARINA	PARAFINA
0:00	11	10,9	11
0:30	10,2	11,2	12,1
1:00	8,8	10,1	10,8
1:30	7	9,3	9,6
2:00	6,4	8,7	9,3
2:30	6	8,4	8,5
3:00	6,2	7,8	8,1
3:30	5,6	7,1	7,6
4:00	4,5	6,4	7,3
4:30	4,4	5,9	5,9
5:00	4	6	6,2
5:30	4,1	5,9	6,5
6:00	5	6,5	6,9
6:30	4,7	6,2	6,8
7:00	4,8	6,3	6,5
7:30	4,1	6	6,3
8:00	3,6	5,3	5,5
8:30	4,2	5,7	5,5
9:00	4,9	5,7	6,1
9:30	5	5,4	6,4
10:00	6,1	6,4	6,7

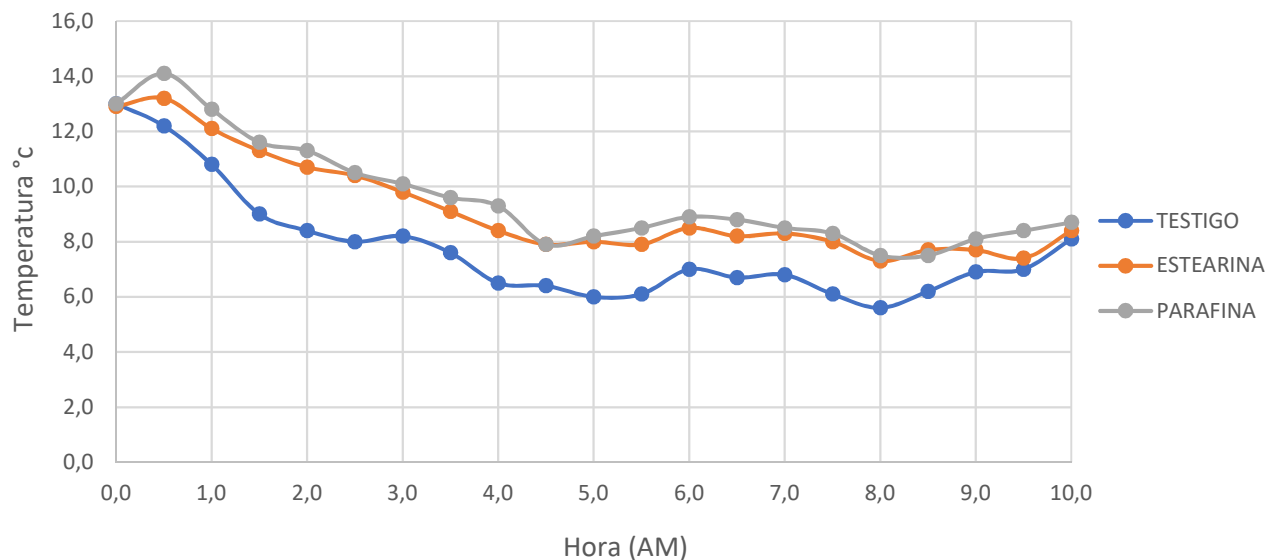


FIGURA 5-32. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 07/03/2020.

Datos de viento

Las heladas más típicas en nuestra zona suelen ser heladas por radiación, con inversión térmica, que suceden por el enfriamiento de las capas más bajas de la atmósfera y son debidas a la pérdida progresiva del calor de la tierra en noches de cielo despejado y ausencia de viento. De ahí la importancia que cobra el viento durante las noches de heladas.

Durante las noches de ensayo no se han podido tomar datos de velocidad de viento en cada una de las parcelas prueba por falta de instrumentos de medida, pero dado que esta zona está muy próxima al aeropuerto de Sevilla podemos ilustrar el comportamiento del aire durante las fechas de los ensayos mediante las gráficas que se muestran a continuación.

Según puede observarse en la Figura 5-33, las noches de ensayo, marcadas con la cuadrícula roja, fueron noches de poca velocidad de viento, ya que estuvieron entre 2 y 15 km/h.

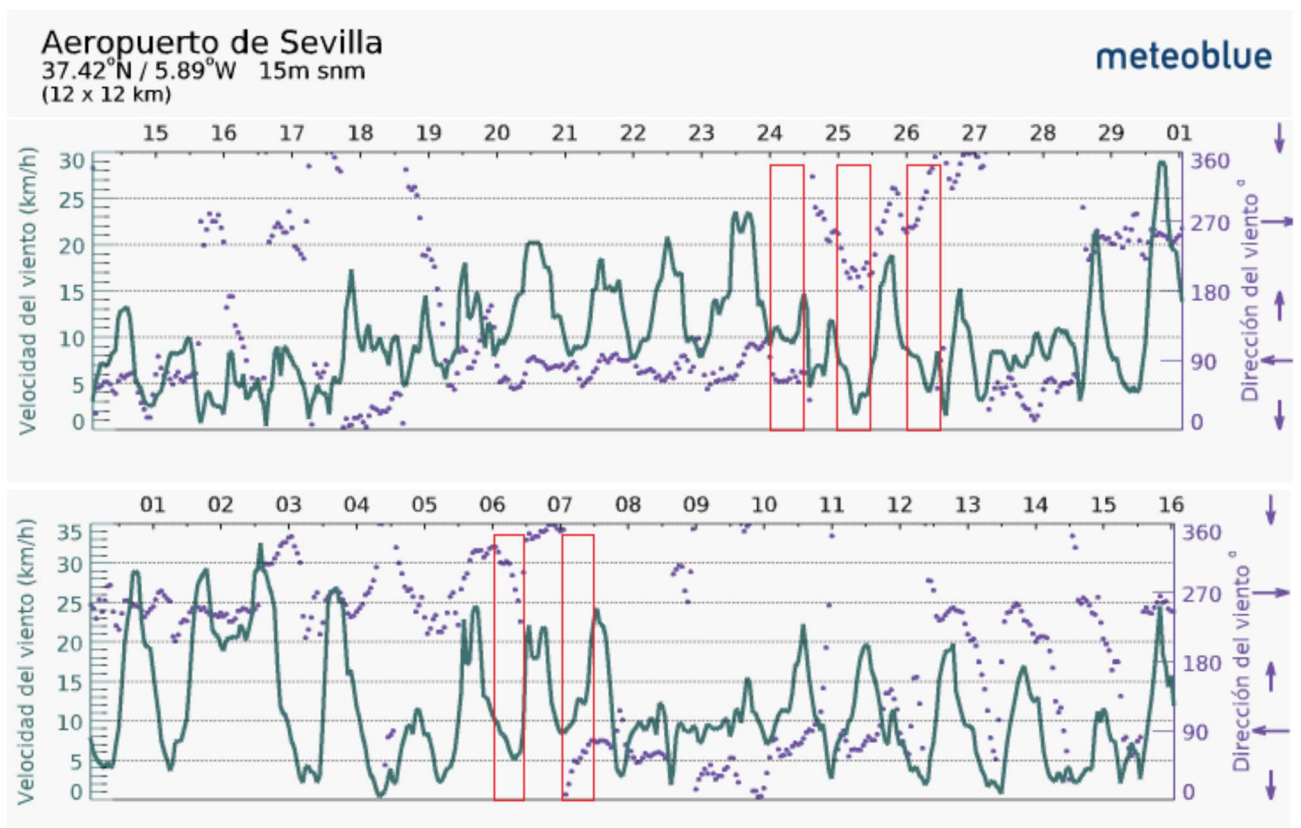


FIGURA 5-33. VELOCIDAD DEL VIENTO (KM/H) EN LOS DÍAS EN LOS QUE SE REALIZARON LAS PRUEBAS.

Observaciones sobre humos

Con objeto de abordar la principal problemática de esta metodología de lucha contra heladas, que no es otro que la producción de humos y hollín, se han dispuesto un papel de filtro de tamaño 420 x 520 mm a una altura de 2 metros entre las dos filas centrales de los árboles de cada uno de los dos bloques con latas antiheladas, en cada una de las noches de ensayo.

Con esto se pretende proporcionar información experimental acerca de la posible contaminación ambiental producida por este método de control de heladas y permitir avanzar en el conocimiento de dicho contaminante.

Tras toda una noche de exposición a los humos de las latas de parafina y estearina respectivamente los papeles de filtro se recogen y se fotografían para completar el ensayo y poder establecer diferencias en las emisiones procedentes de la combustión de los distintos materiales empleados. Se muestran a continuación las fotografías (Figura 5-34 a Figura 5-38) de las láminas de papel de filtro de cada noche en cada uno de los bloques de ensayo.

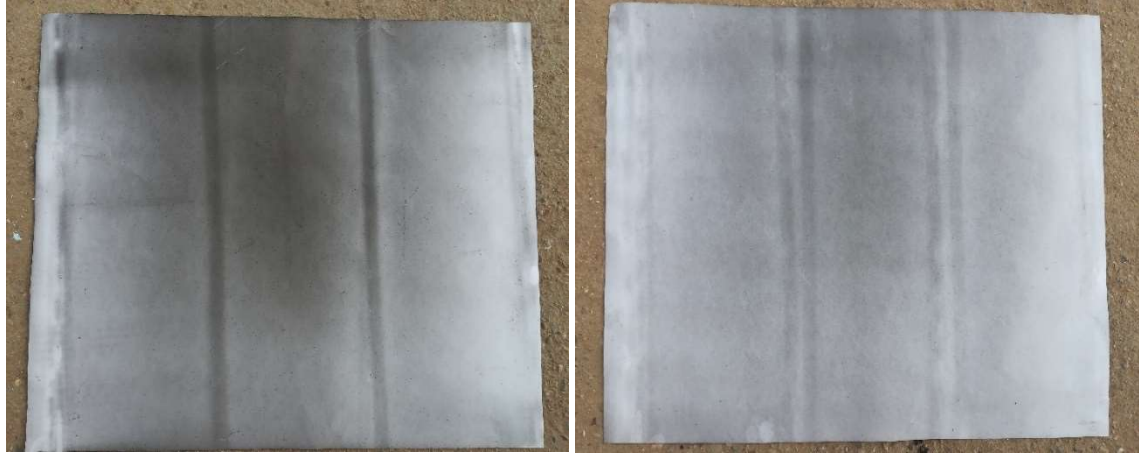


FIGURA 5-34. ESTADO DE LOS FILTROS TRAS SER EXPUESTOS A LOS HUMOS GENERADOS POR LAS LATAS DE PARAFINA (IZQA.) Y ESTEARINA (DHCA.) DURANTE LA NOCHE DEL 24/02/2020.

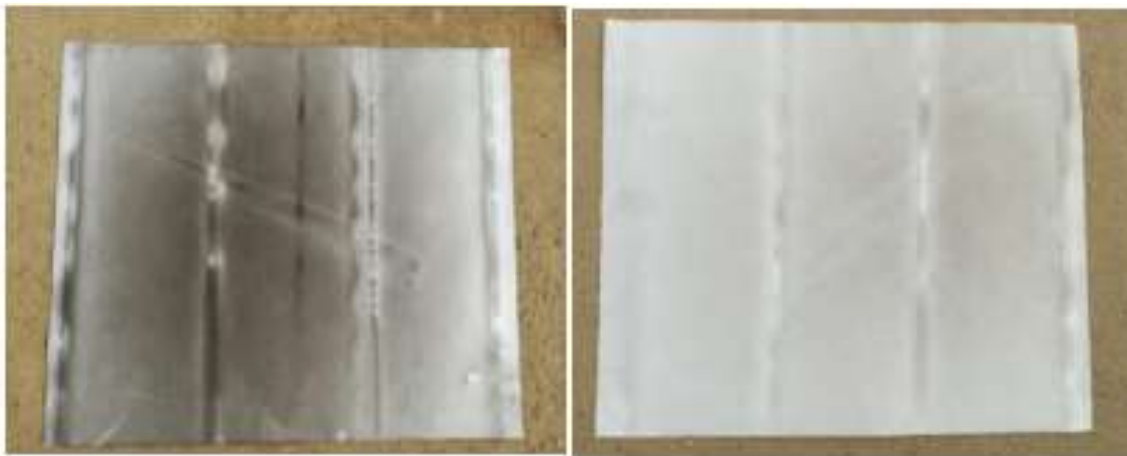


FIGURA 5-35. ESTADO DE LOS FILTROS TRAS SER EXPUESTOS A LOS HUMOS GENERADOS POR LAS LATAS DE PARAFINA (IZQA.) Y ESTEARINA (DHCA.) DURANTE LA NOCHE DEL 25/02/2020.

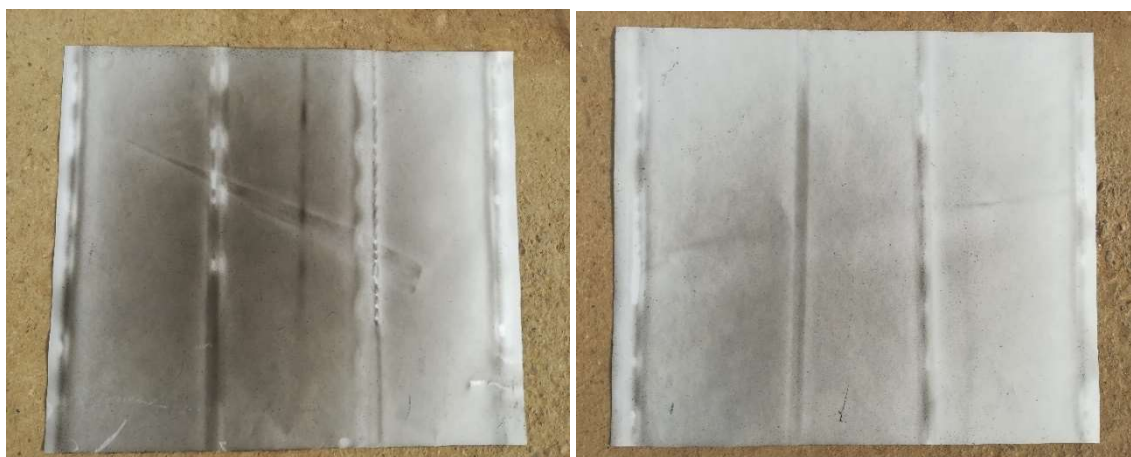


FIGURA 5-36. ESTADO DE LOS FILTROS TRAS SER EXPUESTOS A LOS HUMOS GENERADOS POR LAS LATAS DE PARAFINA (IZQA.) Y ESTEARINA (DHCA.) DURANTE LA NOCHE DEL 26/02/2020.

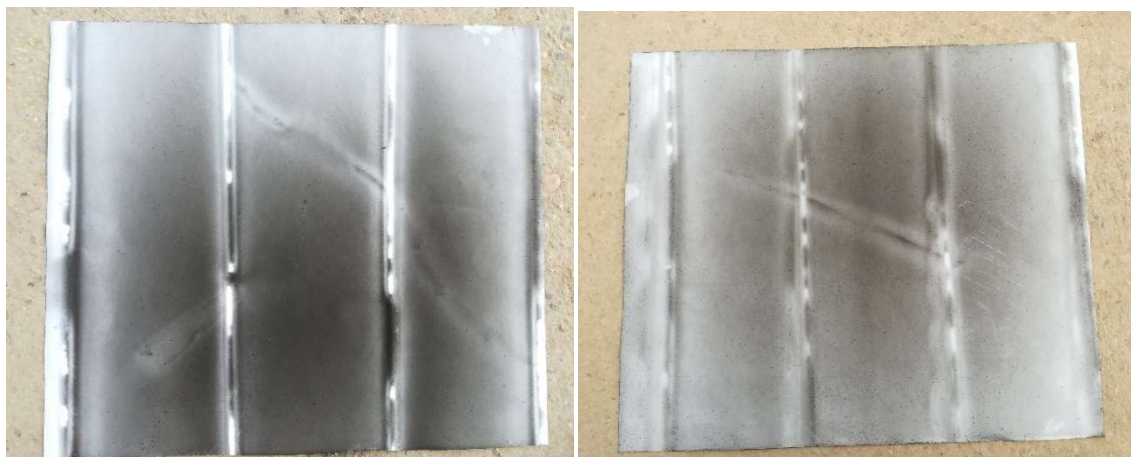


FIGURA 5-37. ESTADO DE LOS FILTROS TRAS SER EXPUESTOS A LOS HUMOS GENERADOS POR LAS LATAS DE PARAFINA (IZQA.) Y ESTEARINA (DHCA.) DURANTE LA NOCHE DEL 06/03/2020.

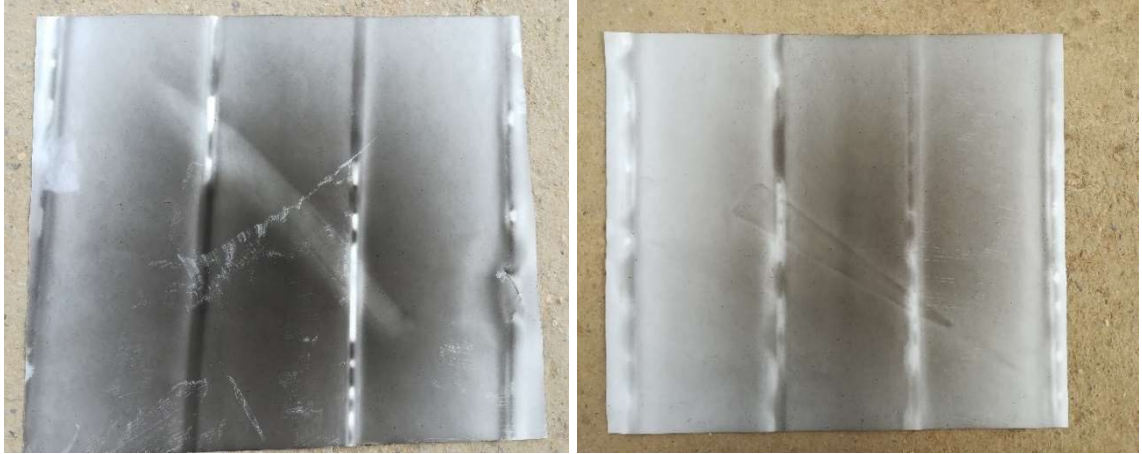


FIGURA 5-38. ESTADO DE LOS FILTROS TRAS SER EXPUESTOS A LOS HUMOS GENERADOS POR LAS LATAS DE PARAFINA (IZQA.) Y ESTEARINA (DHCA.) DURANTE LA NOCHE DEL 07/03/2020.

Interpretación y observaciones

Los datos obtenidos de estos ensayos permiten sacar varias conclusiones:

- Los dos modelos de latas tienen un efecto muy similar en cuanto a corrección de la temperatura, tanto en el tiempo que tardan en alcanzar la temperatura de protección, como en la temperatura estabilizada. Aunque hay una ligera diferencia a favor de la parafina, porque esta es capaz de elevar la temperatura algo más, este dato no es estadísticamente significativo, por lo que una simple lectura de los termómetros no permite diferenciar los dos tipos de latas.
- La lata de parafina produce un humo negro bien visible que puede ocasionar molestias en el entorno de la zona protegida, debido tanto a su opacidad (puede nublar la visibilidad de la conducción en carreteras cercanas), como a su densidad (puede afectar a la respiración de personas sensibles o con problemas respiratorios).
- La lata de estearina, sin embargo, produce un humo blanco-grisáceo que se puede confundir con una niebla espesa. Las molestias al respirar son menores que con la parafina, aunque presenta un olor a carne quemada.
- En ambos casos, la producción de humo es mayor conforme el nivel de combustible baja dentro de la lata, por reducción de la cantidad de oxígeno que llega en la superficie del combustible, donde se forma la llama.
- Del ensayo experimental con las láminas de papel de filtro no se han podido obtener datos cuantitativos, aunque sí cualitativos. De esta forma, según puede observarse en las fotografías, se confirma que se deposita menos hollín en la zona de las latas de estearina, ya que en todas las noches de ensayo se impregna menos la lámina de esta zona.

- De forma cualitativa, también se ha observado, al amanecer de todas las fechas de ensayo, que la boina de humo procedente del bloque de las latas con parafina fue más densa y persistente (Figura 5-39). La permanencia de esta boina sobre el terreno es directamente dependiente del viento presente en cada amanecer.
- Según los datos obtenidos, la parafina es capaz de alcanzar la temperatura estabilizada algo más rápido que la estearina.
- La duración de las latas varía también ligeramente. Esto puede observarse en las gráficas, ya que al final de la curva se ve cómo se atenúa el efecto sobre la temperatura. La lata de estearina termina a las 10 horas casi agotada, mientras la lata de parafina continua todavía ardiendo de forma más evidente. Al menos 1 hora de duración separa ambas latas, lo que se traduce también en una diferencia económica.



FIGURA 5-39. BOINA DE HUMO FORMADA DURANTE LA COMBUSTIÓN DE LATAS DE PARAFINA

Conclusión

La lata de parafina, la primera en llegar al agricultor como mejora notable respecto de los bloques de mezcla serrín/parafina, resulta muy efectiva en cuanto a su efecto de protección del cultivo, ya que recupera y mantiene la temperatura mínima en un nivel que permite evitar o minimizar los daños debido a las heladas.

Sin embargo, su producción de humo negro la convierte en un problema medioambiental y de salud pública.

La lata de estearina por su parte supone una mejora en este sentido, aunque su menor duración y, por tanto, su mayor coste económico, la convierten en una solución que ha de mejorar.

5.11. Resultados de las simulaciones

Mediante las simulaciones se pretende entender la forma de calentamiento del aire alrededor de los árboles de la plantación con el objetivo de dilucidar si una distribución de las velas en el campo, diferente a la comúnmente utilizada, y/o tamaños distintos de velas, reduciría o eliminaría los inconvenientes señalados.

Simulación

Teniendo en cuenta las características de las pruebas de campo, se consideran las siguientes características en las simulaciones: la distancia entre los troncos de los árboles es de 2,5 m; las velas, con una distribución al tres bolillo, se emplazan a mitad de camino entre árboles; y que se emplazan velas cada dos árboles. La Figura 5-40a muestra una recreación de la vista aérea de una superficie de 225 m² (15 m x 15 m) con 25 árboles frutales y 15 velas entre ellos. Partiendo de esta distribución, se establece el volumen de control mostrado en la Figura 5-40b (15 m x 15 m x 10 m) donde se observa que las velas serán tratadas con paralelepípedos cuadrados y que se excluye de la simulación los árboles frutales. Estas simplificaciones, como se comentará a continuación, reducen sustancialmente la carga computacional y mantienen los principales fenómenos de transferencia de calor entre las velas y el ambiente: convección natural y radiación, así como, el movimiento del aire derivado de los gradientes de temperaturas originados. La altura del volumen de control de estudio: 10 m, se selecciona de forma que el flujo de aire ascendente, consecuencia de su mayor temperatura, tuviese suficiente recorrido vertical para interactuar con el flujo de aire descendente a menor temperatura. Para su selección se simuló 5 y 10 m de altura.

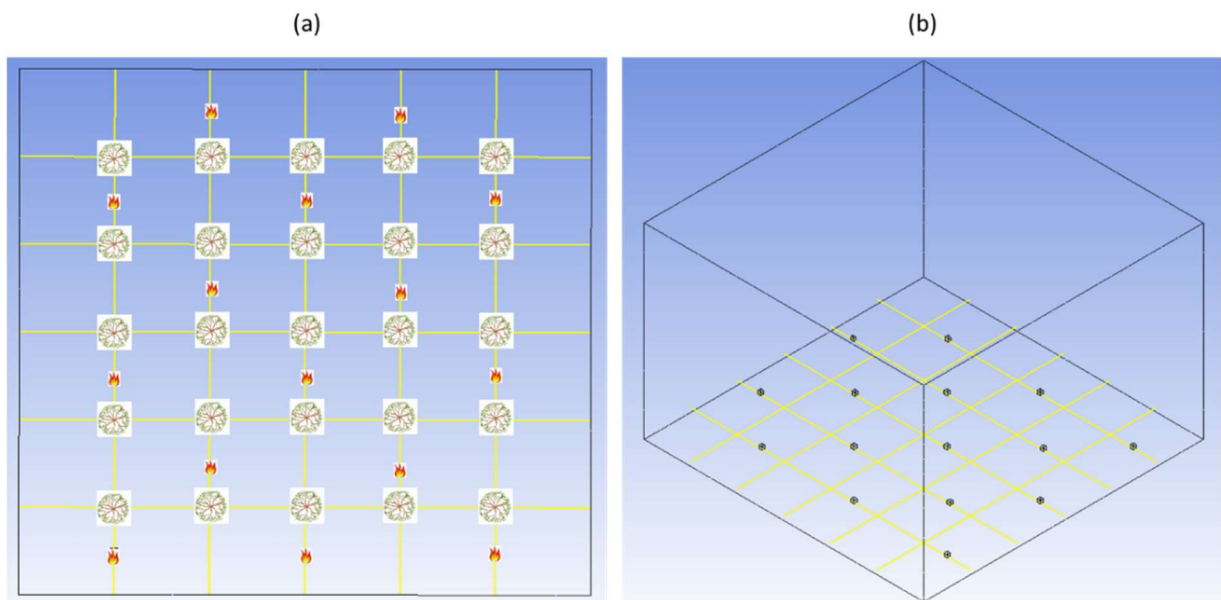


FIGURA 5-40. A) RECREACIÓN DE LA VISTA AÉREA DE UNA SUPERFICIE DE 225 M² (CUADRÍCULA 2,5 M X 15 M) Y B) VOLUMEN DE CONTROL UTILIZADO PARA LAS SIMULACIONES.

Siendo el fruto el principal afectado por las heladas, puede sorprender la eliminación de los árboles de la simulación. Sin embargo, la baja frondosidad de los mismos en el momento de estudio que implica una pequeña resistencia al paso de aire por convección a través de sus ramas, así como, que el efecto del intercambio radiante de su superficie con el ambiente y la

energía absorbida por la corteza, flores y frutos, no tiene gran impacto en la temperatura de la zona de la que se dispone medidas de temperaturas experimentales, esta es, el espacio libre de velas entre árboles a 40 cm de altura, soportan la simplificación realizada.

Como se describe en este informe (sección 5.4), se necesita de condiciones de contorno que cierren el problema y permitan su integración. A continuación, se describen las utilizadas para cada uno de los elementos del problema:

- (i). Las velas se tratan como paralelepípedos de 16,5 cm de lado a una altura del terreno de 22,5 cm. La selección de esas dimensiones se debe a que el tamaño de la lata que contiene la cera es 22,5 cm de altura x 16.5 cm de diámetro y, como se aprecia en la Figura 5-41, el tamaño de la llama es similar a la apertura. Tras las medidas experimentales de laboratorio de las temperaturas de llamas para las diferentes composiciones de velas (Tabla 5-7), se fija en 925 °C la temperatura superficial del paralelepípedo. Este tratamiento permite simplificar la simulación al evitar, por ejemplo, incluir la combustión del compuesto de la vela.



FIGURA 5-41. IMAGEN DE LAS VELAS UTILIZADAS PARA COMBATIR LAS HELADAS.

- (ii). La superficie que delimita el volumen de control, a excepción del plano inferior que corresponde al terreno de la plantación, es la frontera correspondiente al cielo abierto. La temperatura que se fija en esta frontera es la temperatura ambiental sin presencia de velas y se impone que la presión sea de 1 atmósfera. Esta condición de presión permite que sea la solución, en función de la densidad del aire en cada región, y no la definición arbitraria del programador, la que identifique que zonas de la superficie de control es de salida y cual de entrada de aire.
- (iii). La presión y temperatura del aire contenido en el volumen de control, tratado como gas incompresible, será la determinada por la integración del problema. No obstante, es necesario asignarle unos valores iniciales. Estos fueron 0°C y 1 atm. Señalar que la

incompresibilidad es ampliamente utilizada cuando la densidad permanece aproximadamente constante en todo el flujo y/o volumen de control.

- (iv). El terreno de la plantación está representado por el plano inferior del volumen de control. Se fija su temperatura a la temperatura ambiental sin presencia de velas y, además, se impone un comportamiento adiabático.
- (v). Para las superficies que modelan el terreno y las velas, se ha establecido la condición de no deslizamiento. Ésta está referida a la región de contacto del fluido, en este caso aire, con la superficie sólida e impone que la velocidad del fluido sea la de la superficie, la cual, en este problema, es de 0 m/s (las velas están paradas). Además, se asume que las velas (llamas) tienen un comportamiento de cuerpo negro (ampliamente utilizado en la literatura) y se fija una emisividad de 0,8 para la superficie del terreno y la del cielo abierto.
- (vi). No se han incluido ningún término de generación (W/m^2) en ninguno de los elementos simulados, es decir, el campo de temperatura, presiones y velocidades es consecuencia de la transferencia de calor por radiación y convección natural.

La resolución del problema se realiza mediante la integración de las ecuaciones de conservación de Navier-Stokes (URANS), con un modelo k- ϵ para la turbulencia. Con respecto a la radiación, se aplica el modelo *surface to surface* (S2S). se utiliza *ANSYS FLUENT 2019 R3* para la simulación.

Por un lado, el análisis del campo de temperaturas y velocidad en los planos mostrados en la Figura 5-42, obtenido mediante simulación 3D, permitirá analizar el calentamiento de la plantación por medio de las velas de parafina. Además, se chequeará la homogeneidad de los campos mencionados para distintas alturas del plano paralelo al terreno. Por otro lado, se compararán las estimaciones teóricas de temperaturas a 0,4 m de altura, en el plano perpendicular al terreno, con las medidas de temperatura experimentales en campo (Figura 5-28, Sección 5.10).

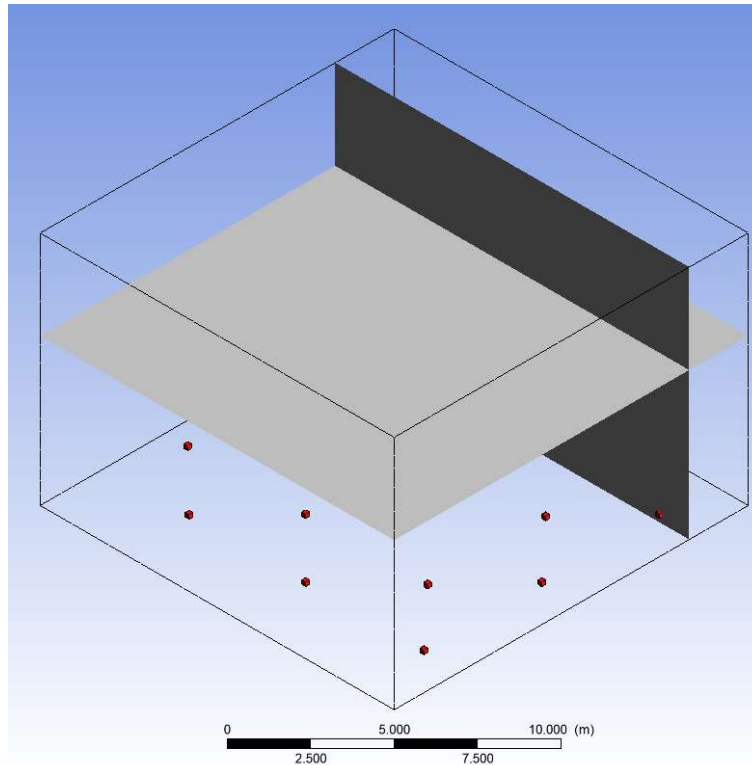


FIGURA 5-42. PLANOS QUE SE EMPLEARÁN PARA ANALIZAR EL CALENTAMIENTO DE LA PLANTACIÓN POR MEDIO DE LA COMBUSTIÓN DE LAS VELAS DE PARAFINA MEDIANTE SIMULACIÓN 2D (A) Y 3D (B).

Resultados

La Figura 5-43 muestra el campo de temperaturas y velocidades que, el intercambio radiante y la convección natural en el plano perpendicular al terreno, crea la presencia de 3 velas de parafina a 925°C (temperatura de la vela típicamente medida en las simulaciones). El comportamiento mostrado corresponde a una simulación 3D donde el ambiente está a 0°C y 1 atm. Se observa un gradiente de temperatura entre 0 y 5°C (273 y 298 K, respectivamente) en el volumen de estudio. El lector debe notar que se redujo la escala de temperaturas para una mejor visualización del problema y, por tanto, superficies o masas de aire a temperaturas superiores a 5°C (278 K) aparecen en rojo.

La Figura 5-43a muestra dos zonas con predominios de temperaturas diferentes; la mitad izquierda de la imagen presenta menor temperatura media que la mitad derecha. Para entender lo que sucede, la Figura 5-43b muestra el perfil de velocidades del aire y revela que la región de menor temperatura es la zona de descenso del aire a temperatura ambiente y que éste, tras ser calentado, asciende por la zona con predominio de temperaturas mayores que la ambiental. Además, se aprecia cómo se generan zonas de recirculación del aire. Es importante señalar que las zonas de descenso y ascenso de la Figura 5-43b, son consecuencia de la distribución de las velas en ese plano. Si se mostrase el campo de velocidades un plano con un emplazamiento de las velas distinto, aparecerían distintas zonas de ascenso y descenso.

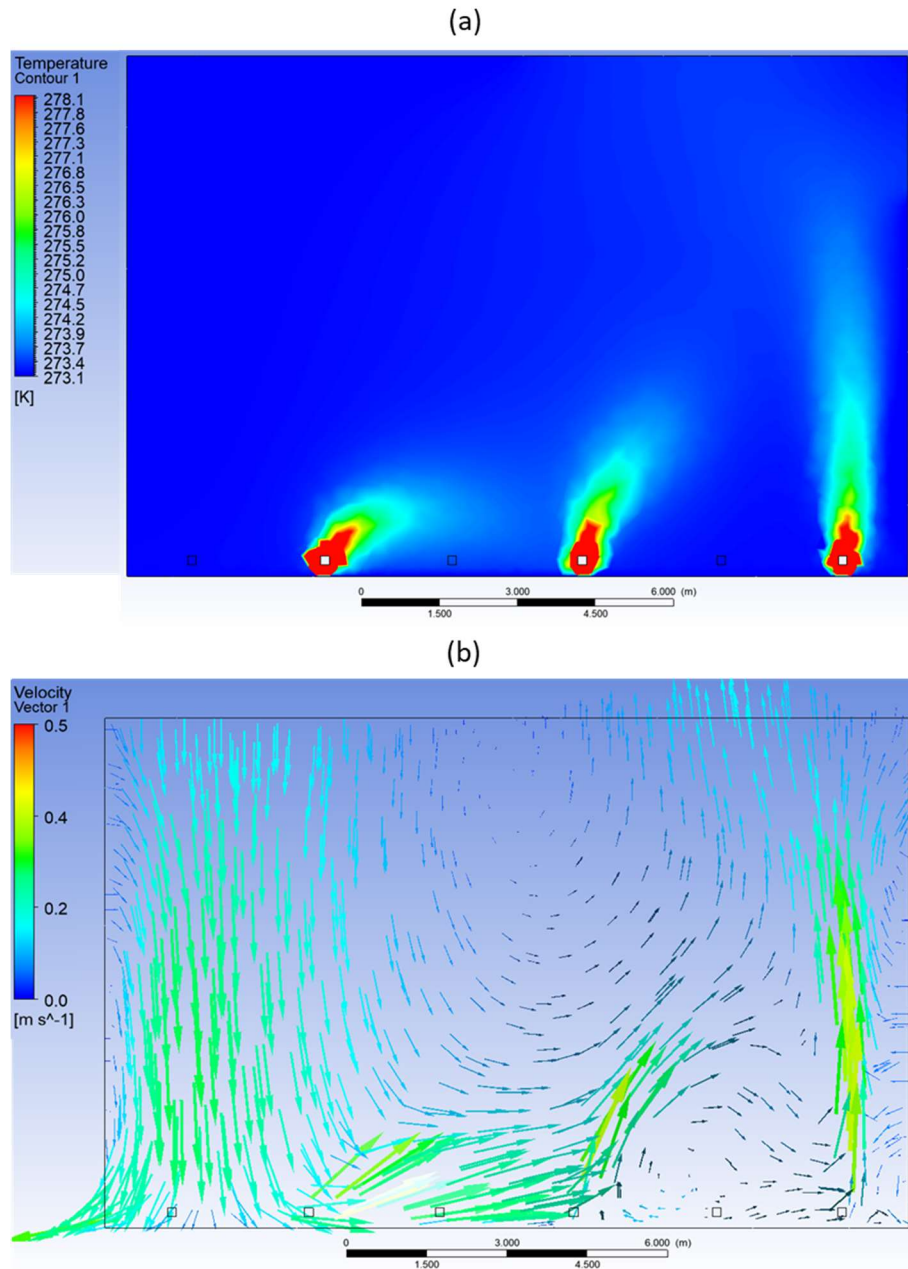


FIGURA 5-43. CAMPO DE TEMPERATURA (A) Y VELOCIDAD (B) EN UN PLANO VERTICAL AL TERRENO CREADO POR LA PRESENCIA DE 3 VELAS DE PARAFINA A UNAS CONDICIONES DE AMBIENTALES DE 0 °C Y 1 ATM. ESCALA DE TEMPERATURA AJUSTADA ENTRE 0 Y 5 °C (TEMPERATURA > 5 °C REPRESENTADAS EN ROJO).

De lo anterior, se deduce que, en función de la distribución de las velas, aparecerán zonas de la plantación que, a pesar de estar a la misma altura y distancia de las velas, pueden presentar temperaturas diferentes. La Figura 5-44 muestra la temperatura de la masa de aire contenida en el volumen de control, entre 0 y 5 °C (273 – 298 K), de forma que se visualizar el calentamiento del aire de la plantación para la distribución aquí adoptada (Figura 5-40a). Se aprecia que, efectivamente, se da un calentamiento no homogéneo por capas. Este calentamiento irregular, además de estar provocado por la mayor velocidad de ascensión del aire caliente respecto a la velocidad de calentamiento transversal (comentada con anterioridad en este informe), parece

acentuarse por un agrupamiento de los flujos ascendentes de aire caliente generando una única pluma que asciende a través del volumen de control. Una posible causa de la convergencia del aire caliente ascendente podría encontrarse en las menores presiones de los flujos a mayor velocidad. Se puede comprobar en la Figura 5-43b que el aire, una vez calentado por el efecto de las velas, tiene mayor velocidad y, por tanto, menor presión. De esta forma, el resto del aire de volumen de control a menor temperatura podría embotellar el aire caliente en ascenso.

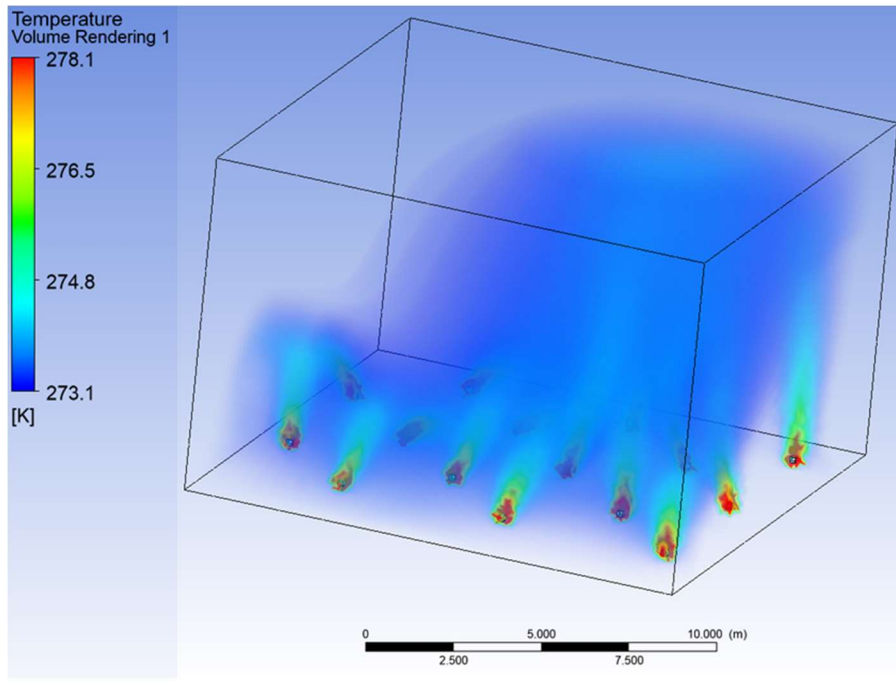


FIGURA 5-44. TEMPERATURA DE LA MASA DE AIRE CONTENIDA EN EL VOLUMEN DE CONTROL COMPENDIDO ENTRE LOS 0 Y 5 °C. ESCALA DE TEMPERATURA AJUSTADA ENTRE 0 Y 5 °C (273Y 298 K, RESPECTIVAMENTE).

TEMPERATURAS > 5 °C EN ROJO.

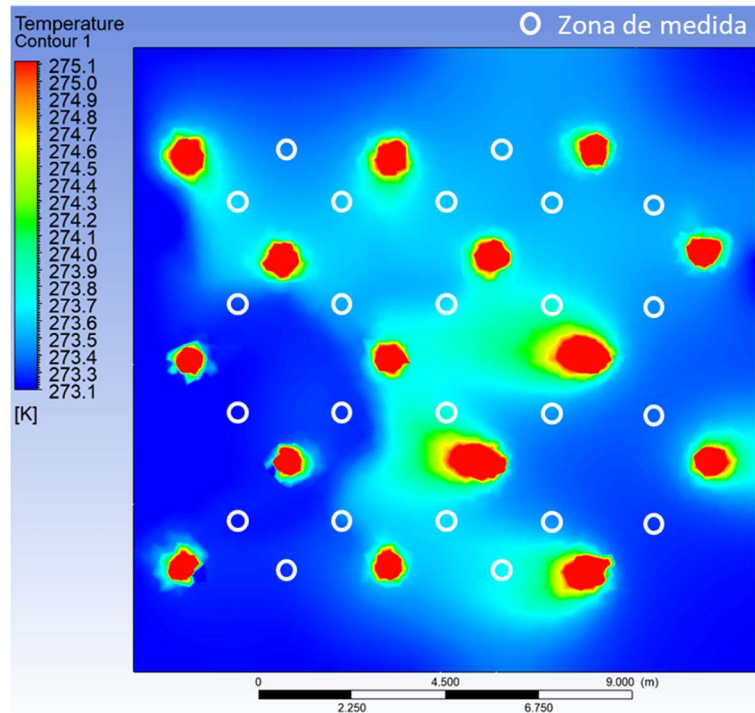


FIGURA 5-45. CAMPO DE TEMPERATURA A UNA ALTURA DE 0.4 SOBRE EL TERRENO CON LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE MEDIA DE TEMPERATURA EN CAMPO. ESCALA DE TEMPERATURA AJUSTADA ENTRE 0 Y 5 °C (273Y 298 K, RESPECTIVAMENTE). TEMPERATURAS > 5 °C EN ROJO.

La Figura 5-45 muestra el campo de temperatura del plano paralelo al terreno a una altura de 0,4 m donde se marcan con círculos los puntos compatibles con la medida en campo realizadas: temperaturas a 0,4 m de altura en el espacio libre de vela entre dos árboles consecutivos (Figura 5-28, Sección 5.10). Como ya se ha discutido, la temperatura de la masa de aire en esos puntos presenta diferencias que son consecuencia de la distribución de las velas a través de la plantación e, incluso, debido a la propia ascensión del aire caliente. Teniendo en cuenta esta situación, se realiza la simulación de las condiciones ambientales de la parcela testigo recogida en la Tabla 5-13 (Sección 5.10) y se toma la temperatura máxima registrada en alguno de los círculos. Esas temperaturas se comparan con las medidas de campo en la Figura 5-46. El resultado muestra que pese a predecir un aumento de la temperatura en de la plantación, éste es de décimas de grado menor que el medido en campo. La menor temperatura de la simulación, pese a escoger la máximas de las registradas en los círculos (Figura 5-45), puede deberse a las simplificaciones establecidas en la simulación, por ejemplo, el tamaño del paralelepípedo: Se ha establecido un tamaño que simula una llama de 16,5 cm de altura, siguiendo las Figura 5-41 y Figura 5-27 en el encendido, sin embargo, el tamaño de la llama después de algún tiempo de combustión parece ser mayor, como se aprecia en la Figura 5-24.

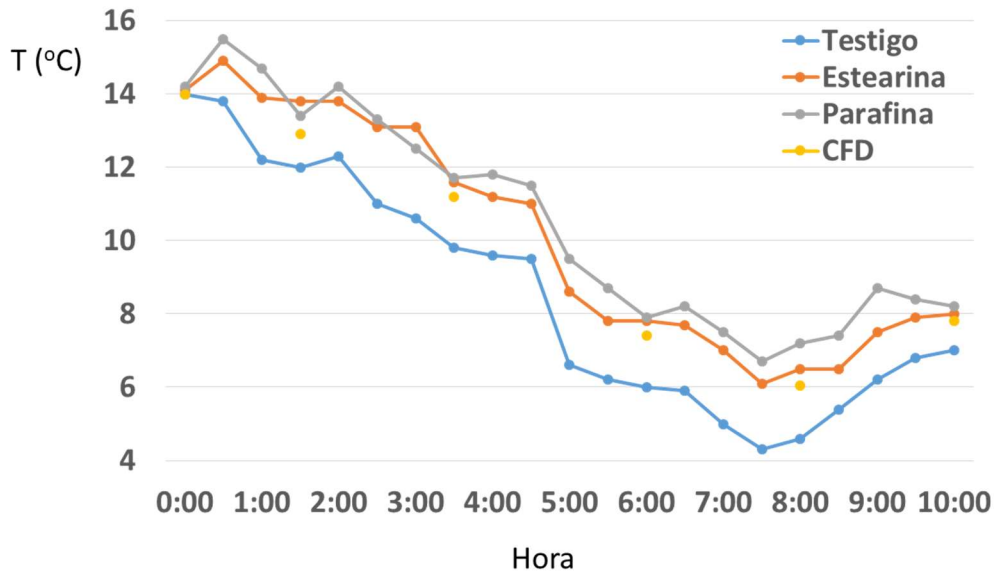


FIGURA 5-46. EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN LOS TERMÓMETROS DURANTE LA NOCHE DEL 24/02/2020 PARA LAS PARCELAS TESTIGO (SIN VELAS), CON VELAS DE PARAFINA, CON VELAS DE ESTEARINA DE SOJA FRENTE A LAS TEMPERATURAS SIMULADAS POR CFD.

Conclusiones

El principal objetivo de las simulaciones CFD discutidas es entender el calentamiento del aire alrededor de los árboles de la plantación, de forma que, se pueda dilucidar si una distribución de las velas en el campo, diferente a la comúnmente utilizada: tresbolillo con una vela cada dos árboles, y/o masas de velas distintas a los 6 kg, reduciría el coste económico asociado y la contaminación ambiental.

Mediante la simulación CFD de una superficie de terreno de 15 m x 15 m con una altura de 10 m, se ha comprobado que el emplazamiento de 15 velas distribuidas a través de la plantación aumenta la temperatura de la masa de aire. Sin embargo, el intercambio de calor por radiación y convección natural inducido por las velas origina que las temperaturas de una misma capa de aire no sean homogéneas. De esta forma, para puntos situados a la misma altura y distancia de las velas, pueden existir diferencias superiores a 1°C. Además, se ha encontrado que los flujos de aire a mayores temperaturas, tras el calentamiento en cada una de las velas, tienden a agruparse a medida que gana altura en el volumen de control. Esto último, plantea la posibilidad de optimizar la distribución de las velas a través de la plantación o su tamaño, de forma que, la circulación por convección natural maximice el calentamiento de toda la masa de aire contenida en la plantación.

El modelo ha mostrado su utilidad como herramienta de estudio tras la comparación de las temperaturas estimadas mediante CFD con aquellas medidas en campo. Si bien, dichas estimaciones de temperaturas fueron décimas de grados menores a las experimentales, se han identificado algunas mejoras en las simplificaciones asumidas. Su implementación permitirá mejorar la capacidad del modelo para abordar distribuciones de velas alternativas a las comúnmente utilizadas, incluso tamaños, y permitirá definir puntos de medida en futuras campañas.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES FINALES DEL PROYECTO

Aunque el uso de sistemas antiheladas basados en estufas de combustible sólido está sobradamente justificado para las zonas de cultivo de Andalucía Occidental, dichos sistemas presentan problemas de eficiencia y contaminación por humos (boinas) que pueden ser mejorados. En este proyecto se ha estudiado a un sistema para la mejora del sistema de calentamiento con velas como media de protección contra las heladas en los cultivos de frutales de hueso en la Vega del Guadalquivir. En concreto se ha estudiado el impacto de la composición del combustible sobre la formación de humos y su eficacia calentadora, así como el efecto de la colocación de las velas en campo sobre el movimiento del fluido en la capa de aire cercana al suelo.

Tras un primer estudio de la literatura realizado sobre las patentes que apuntan a mejorar el comportamiento de la actualmente utilizada, se concluyó una serie de aditivos/mezclas que sería interesante probar experimentalmente para mejorar las velas actualmente en uso, en el sentido de que maximicen la fracción de calor que producen en forma de radiación, mejoren la eficiencia de la combustión, permitan reducir los humos y permitan el abaratamiento del coste de las velas prescindiendo de recipientes.

Para poder realizar la caracterización del desempeño de las velas fabricadas, se desarrolló una metodología experimental. En concreto se desarrollaron tres tipos de ensayo: de pirometría para la medición de la temperatura y energía radiante emitida por la llama de la vela durante su combustión, de medición de velocidad de consumo de la vela y de medición de índice de hollín para la caracterización de humos.

Se ensayaron velas fabricadas mezclando varios aditivos al material base utilizado actualmente en los sistemas de protección antihelada (parafina y estearina). Los aditivos incluyeron: Atapulguita (Arcilla Roja), compuesta principalmente por óxidos de silicio, magnesio y aluminio, en aras de conseguir una distribución uniforme del combustible en la vela y promover la reducción inquemados sólidos, así como minimizar el goteo (cera líquida que se escurre y no se quema); Estearina de palma con ácidos grasos vegetales para reducir la formación de hollín, mezclado con triacilgliceridos para mejora de la dureza de la vela; Cera de soja para aumentar el punto de fusión y evitar el uso de recipiente, además de minimizar el hollín y aumentar la durabilidad. Además, se estudiaron varias mechas: enceradas, de algodón y bañadas en Bórax con el objeto de reducir el humo proveniente de la mecha. También se valoraron varias soluciones para el encendido con el objeto de evitar el uso de combustibles líquidos externos, así como mejoras que permitan prescindir el uso de recipientes.

Para cada vela se realizaron ensayos de medidas de caracterización de hollín (índice de hollín) y de potencia radiante durante la combustión utilizando pirometría. Los resultados ayudaron a entender los efectos de las diferentes sustancias. Las mejores combinaciones se obtuvieron usando mechas algodón y enceradas con estearina de palma o soja. La estearina animal presentó ventajas con respecto a las de parafina líquida actualmente usadas en mayor eficiencia y reducción de hollín.

Por otro lado, en los experimentos de pirometría se determinó que, independientemente de su composición, todas las velas producen llamas con casi idéntica radiación emitida, es decir, igual radiación máxima. Además, se ha comprobado que no se debe a distintas emisividades: se ha medido por termopar la temperatura de llama (en la región donde mayor radiación emite) y esta

es idéntica $920 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Así mismo se ha mostrado que la composición de las velas, así como el tipo y tamaño de la mecha, afectan a la superficie de llama.

Los ensayos de campo se realizaron en una finca de melocotoneros entre finales de febrero y principios de marzo de 2020, utilizando dos tipos de latas, una con parafina de petróleo, y la otra con estearina animal previamente ensayada y caracterizada en el laboratorio. Las velas consisten en el material combustible dentro de latas metálicas de tipo pintura, de 5 litros de capacidad, con una mecha de cartón. Cada tipo de vela se dispuso en una zona de ensayo donde se colocaron varios termómetros y se realizó una monitorización durante 12 horas varias noches con heladas, repartidos en las filas intermedias entre los árboles, mientras que una tercera zona igual a las anteriores se reservó como zona “blanco” para comparar el efecto de las velas. Ambos tipos de velas produjeron una mejora notable respecto a los bloques de mezcla serrín/parafina utilizados con anterioridad, resultando muy efectivas en cuanto a su efecto de protección del cultivo, ya que recupera y mantiene la temperatura mínima en un nivel que permite evitar o minimizar los daños debido a las heladas. La parafina, sin embargo, produjo gran cantidad de humo negro mientras que la estearina supuso la mejora que ya se advertía en el laboratorio, corroborando que es un tipo de vela más adecuado medioambientalmente. Sin embargo, su menor duración y, por tanto, coste, la convierten en una solución que ha de mejorar. Las simulaciones permitieron predecirlas medidas de temperatura de campo. Así mismo, la optimización de la distribución superficial permitió predecir una reducción del consumo; Además, ensayos en el banco de datos permiten avalar que el uso de aditivos podría mejorar incluso más la durabilidad y la formación de humos. Sin embargo, no se pudieron hacer nuevas campañas de campo para testar a escala real estos efectos (imposibilidad impuesta por la pandemia en marzo de 2020). En cualquier caso, los resultados muestran que existe un significativo potencial de mejora que se podría aprovechar en futuras campañas.

El estudio numérico que se centró en estudiar la distribución y la potencia de los focos (velas) para garantizar la uniformidad del calentamiento del aire y minimizar la eficacia del sistema (calentar la capa de aire menor posible). Se realizó un estudio bibliográfico y se desarrollaron varios modelos numéricos CFD que se utilizaron para predecir el comportamiento en campo. Se obtuvo una mejor comprensión de la distribución del flujo radiante, convección de aire y aprovechamiento energético para diferentes distribuciones de velas. Se ha mostrado que el número de velas y su distribución superficial sobre el terreno determina la distribución del calor dentro de la zona que se desea proteger. El modelo predice satisfactoriamente las medidas experimentales de temperatura realizadas en las pruebas de campo y explica de forma comprensiva las estrategias a seguir para seleccionar la disposición en función de la meteorología del lugar, tipo de cultivo y tipo de vela.

Finalmente se ha realizado la difusión de los resultados mediante la creación de una página web y se escribirá un resumen de los resultados en distintos medios, todo ello detallado en la memoria de difusión de resultados.

7. REFERENCIAS

- A. D. Roeske, «LOW-SOOT, LOW-SMOKE RENEWABLE RESOURCE CANDLE». EEUU Patente US-6.852.140, 8 Feb 2005.
- A. Hamins, M. Bundy y S. E. Dillon, «Characterization of Candle Flames,» *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 15, 2005.
- B. Vidrih y S. Medved, «Multiparametric model of urban park cooling island,» *Urban Forestry & Urban Greening*, nº 12, pp. 220-229, 2013.
- C.-h. Chang, D. Banks y R. N. Meroney, «Computational Fluid Dynamics Simulation of the Progress of Fire Smoke in Large Space, Building Atria,» *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 6, nº 3, pp. 151-157, 2003.
- J. H. Ktote, «Prediction of Smoke Movement in Atria: Part 11: Application to Smoke Management,» 1997.
- Luciuk, M. (2009). NIGHT RADIATIVE COOLING The.
- M. P. Fuller y P. L. Grace, «A chamber for the simulation of radiation freezing of plants,» *Annals of Applied Biology*, nº 133, pp. 111-121, 1998.
- R. L. Sneyder, J. P. d. Melo-Abreu y J. M. Villar-Mir, «Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía,» Roma, 2010.
- S. Technology, «Testing candles for sooting behaviour. Investigating BS EN 15426:2007 – ‘Candles – Specification for sooting behaviour’,» [En línea]. Available: <https://www.satara.com/spotlight/article.php?id=368>.
- T. W. V. D. Gulik y R. J. Williams, «B.C. FROST PROTECTION GUIDE,» 1988.
- Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu y G. J. F. v. Heijst, «A review on the CFD analysis of urban microclimate,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- Y. Toparlar, B. Blocken, P. Vos, G. v. Heijst, W. Janssen, T. v. Hooff, H. Montazeri y J. Timmermans, «CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam,» *Building and Environment*, vol. 83, pp. 79-90, 2015.

8. ANEXO.

8.1. Tareas definidas al inicio del proyecto, desviaciones y justificación de las mismas.

DISTRIBUCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROGRAMACIÓN TEMPORAL INICIALMENTE PLANTEADAS

Al inicio del proyecto se realizó una distribución secuencial de las actividades (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) necesarias para la consecución de los objetivos propuestos al inicio del proyecto. El cronograma resume las tareas definidas y su distribución secuencial en dos años comenzando en julio de 2018. Cada una de las tareas y su justificación se resumen abajo

Tabla 8-1. Cronograma de actividades inicialmente planteado.

ACTIVIDAD	TAREA	2018						2019												2020						
		Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	
0 Estudio Preliminar	0.1	x	x	x																						
	0.2	x	x	x	x																					
	0.3			x	x	x	x																			
1 Ensayo con Velas	1.1						x	x	x																	
	1.2							x	x	x	x	x														
	1.3							x	x	x	x	x														
	1.4												x	x	x	x	x	x								
2 Simulaciones	2.1			x	x	x	x	x	x																	
	2.2						x	x	x	x	x	x														
	2.3											x	x	x	x	x	x	x	x	x						
3 Pruebas en campo	3.1																		x	x	x	x	x			
4 Diseminación	4.1																		x	x	x	x	x	x	x	
	4.2																			x	x	x	x	x	x	
MES		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	

Actividad 0. Estudio preliminar (Meses 1-6)

- **Tarea 0.1.** Estudio de la literatura y de las soluciones adoptadas para diferentes localidades, tipo de cultivo, tipos de velas, etc.
- **Tarea 0.2.** Estudio de las patentes y sistemas de combustión desarrollados para mitigar este problema, así como las sustancias y aditivos necesarios para mejorar las propiedades de las velas.
- **Tarea 0.3.** Estudio del efecto de configuraciones de focos de combustión para calentamientos de capa límite terrestre. Búsqueda de modelos numéricos y estudio de modelos desarrollados.

Actividad 1. Síntesis y fabricación de velas y ensayos de las mismas en un banco de datos de laboratorio (experiencias piloto) (Meses 6-18)

En base al estudio de la Actividad 0 se espera poder diseñar y sintetizar varias velas con distintos enfoques encaminados a la reducción de humo, control e intensidad de la velocidad de calentamiento, facilidad de prendido, influencia de la forma, tamaño, densidad y tipo de material carburante. Realización de ensayos para la caracterización de los modos de combustión

de las velas y generación de humos en un banco de datos a diseñar. Para ello se plantean las siguientes tareas:

- **Tarea 1.1.** Diseño del banco de datos.
- **Tarea 1.2.** Construcción/Remodelación del banco de datos.
- **Tarea 1.3.** Diseño preliminar de velas.
- **Tarea 1.4.** Ensayos en banco de datos.

Actividad 2. Estudio de simulación y optimización de la distribución de las velas (Meses 3-20)

Esta actividad realizará mediante la herramienta CFD (Computational Fluid Dynamics) usando ANSYS FLUENT. Se plantean las siguientes tareas:

- **Tarea 2.1.** Estudio y formulación del problema CFD de combustión, inversión térmica, radiación atmosférica.
- **Tarea 2.2.** Formulación del modelo adecuado para la aplicación.
- **Tarea 2.3.** Simulaciones: análisis de sensibilidad.

Actividad 3. Validación del modelo y demostración del (los) sistema (as) seleccionados en campo (Meses 18-22)

Se pretenden realizar varias pruebas, a definir de acuerdo con los resultados de la actividad 2, para probar en campo la eficiencia del sistema propuesto. Se realizarán varias pruebas de campo en una superficie limitada en días de distinta temperatura (no solo en heladas) con el fin de validar el modelo de simulación desarrollado. Se plantea la siguiente tarea:

- **Tarea 3.1.** Pruebas de campo

Actividad 4. Selección final de la solución y diseminación del procedimiento encontrado (Meses 18-24)

Finalmente se seleccionarán las mejores opciones y se definirá el procedimiento de fabricación. En su caso se escribirá la patente para su uso y se realizará un informe público (o artículo, o ambos) para describir el estudio, el procedimiento utilizado y las cuestiones científico técnicas derivadas del estudio

- **Tarea 4.1.** Informe de resultados incluyendo procedimientos empleados y principales resultados.
- **Tarea 4.2.** Diseminación (artículo(s) revistas).

DESVIACIONES Y REPROGRAMACIÓN DE SECUENCIA DE ACTIVIDADES

Algunas tareas sufrieron algunos retrasos, ya comunicados en el informe intermedio de Julio de 2019, requiriendo más tiempo de lo inicialmente esperado. En particular la Tarea 2.1 se prolongó

más tiempo de lo esperado, consumiendo la disponibilidad de personal y provocó algunos retrasos en las tareas experimentales que se empezaron a ejecutar con alguna demora. La tarea de diseño de los sistemas experimentales (Tarea 1.1.) también se tuvo que alargar en el tiempo debido a las dificultades de encontrar una metodología adecuada para los ensayos con velas. Sin embargo, la Tarea 1.2 de construcción del banco de datos se redujo notablemente, gracias al diseño de dos arreglos experimentales concebidos mucho más sencillos que el banco inicialmente concebido, pero suficientemente eficiente para los objetivos perseguidos. Ello ha dado lugar al sustancial abaratamiento del banco de datos. La Tarea de diseño de velas se ha extendido también porque se ha realizado por fases, esperando el resultado de algunas velas iniciales para el diseño de nuevas formulaciones.

Las principales tareas que se venían ejecutando en febrero-marzo 2020 eran la Tarea 1.4 (ensayos con velas) y la Tarea 3.1 (ensayos en campo). La llegada del Covid-19 repercutió directamente estas dos tareas como se refleja en el cronograma adjunto. También la Tarea 2.3 de simulación se vio severamente afectada por la falta de disponibilidad de programa informático (solo se puede correr en la ETSI, debido a las limitaciones de licencia y seguridad) así como, parcialmente, por la de personal y coordinación adecuada dada la situación en los laboratorios a causa del COVID. Las Tareas 1.4 y 2.3. se han retomado después del parón del Estado de Alarma y se están ejecutando en la actualidad, pero la tarea 3.1. de ensayos de campo no se ha podido retomar por razones obvias impuestas por la meteorología y el inicio de campaña, que hace que los frutos estén en fase de recolección. Por tanto, sólo pudieron realizarse los primeros ensayos en campo previstos en las fincas de S. A. T. Royal, correspondientes al mes de febrero y primeros días de marzo.

El cronograma actualizado teniendo en cuenta los factores mencionados se presenta a continuación, donde se hace explícito el periodo afectado pro Covid-19 así como los meses de extensión del proyecto.

Tabla 8-2. Cronograma de actividades seguido a lo largo del proyecto.

ACTIVIDAD	TAREA	2018						2019												2020						**	**				
		Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag				
0 Estudio Preliminar	0.1	x	x	x																											
	0.2	x	x	x	x																										
	0.3			x	x	x	x																								
1 Ensayo con Velas	1.1							x	x																						
	1.2								x	x	x	x	x																		
	1.3									x	x	x	x	x	x																
	1.4														x	x	x	x	x	x	x				x	x					
2 Simulaciones	2.1			x	x	x	x	x	x																						
	2.2								x	x	x	x	x	x	x																
	2.3														x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x				
3 Pruebas en campo	3.1																		x	x	x	x									
4 Diseminación	4.1																								x	x	x				
	4.2																								x	x	x				
MES		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	*	*	22	23	24				
		** Extendido por Covid19																													
		* Periodo nulo por Covid19																													