



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE MODELACIÓN
DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN LA REGIÓN DE
VALPARAÍSO PARA EL APOYO EN LA GESTIÓN DE DESASTRES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: JORGE EDUARDO PEÑA PARRA
PROFESOR GUÍA: DANIEL UNDURRAGA PERALTA

VALPARAÍSO, 2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera expresar mi más grande agradecimiento a mi familia: mi padre, Francisco Peña, mi madre, Rosa Parra, y mi hermana, Bárbara Peña, quienes han sido y son los pilares de mi vida. Gracias por su apoyo incondicional durante toda mi etapa formativa, por ayudarme a superar las dificultades, por todos los consejos que me han dado, por siempre haber estado ahí en los momentos difíciles y por hacerme la persona que soy hoy en día. El haber llegado a este punto de mi vida es gracias a ustedes, por lo que les dedico este y todos mis logros. Gracias infinitas.

También, quisiera agradecer a mi profesor guía Daniel Undurraga, por todo su apoyo y orientación a lo largo del desarrollo de este trabajo. Al profesor Matías Quezada, por compartir sus conocimientos y por su guía en el campo de la modelación. Al profesor Joao Cerqueira, por sus observaciones, consejos y recomendaciones. Al profesor Raúl Conejeros, a la división de incendios de CONAF, al profesor Miguel Castillo, a Diego Becerra y a los profesionales de Ecotecnos, por sus guías y aportes al trabajo. Y a todos los profesores que he tenido durante esta etapa, por entregar sus conocimientos y formarnos como profesionales.

Agradecer también a todos mis amigos, tanto a los que siempre estuvieron como aquellos que conocí durante la carrera. Gracias por su apoyo, por siempre ayudar a subir los ánimos y por todos los momentos compartidos que llenaron esta etapa de buenos recuerdos y la hicieron mucho más llevadera.

Y por último quiero dar gracias a Dios, por darme fortaleza, por las personas que ha puesto en mi vida y por las puertas que ha abierto.

RESUMEN

Los incendios forestales constituyen una problemática a nivel mundial que cada vez se agrava más. En Chile, los incendios han aumentado desde el año 1964, siendo el periodo 2019-2020 donde se registró un mayor número de incendios forestales. La problemática de incendios forestales se ve agravada por el cambio climático. En este contexto, existen herramientas informáticas que permiten modelar el comportamiento de incendios forestales para apoyar en su gestión y combate. Entre estas herramientas, destacan principalmente Prometheus (ver. 2021.12.03) y FlamMap (ver. 6.2), de Canadá y Estados Unidos, respectivamente.

Por ello, se planteó adaptar uno de estos modelos al contexto territorial de la Región de Valparaíso, en vista de la magnitud de los incendios ocurridos en el pasado, como el “Gran Incendio de Valparaíso” en 2014 y el “Mega Incendio” ocurrido en febrero de 2024. A esto se suma también la poca presencia de estaciones meteorológicas en el sector, que puede dificultar la obtención de información meteorológica precisa para combatir los incendios forestales. Para ello, se estudió la precisión, definida como la relación entre el área afectada correctamente predicha por los modelos y el área predicha de forma incorrecta utilizando la Puntuación-F1, de ambos modelos para seleccionar el más adecuado, estudiar su sensibilidad, ajustar sus modelos de combustible al contexto de la Región de Valparaíso y evaluar su precisión luego del ajuste.

De esta manera, se realizaron simulaciones de 48 y 12 horas de los incendios Lo Moscoso, Cuesta Llampaiquillo, La Engorda y el Mega Incendio de Valparaíso, ocurridos los años 2016, 2019, 2021 y 2024, respectivamente. De sus resultados, se observó que la precisión promedio más alta obtenida con FlamMap fue de 30% y con Prometheus fue de 48%, siendo así este el modelo más preciso de ambos. Luego, se realizó un análisis de sensibilidad en el modelo Prometheus. De dicho análisis se obtuvo que la variable meteorológica de mayor importancia fue la velocidad de viento, con una sensibilidad normalizada de hasta 4,9. Además, se observó que los parámetros a, b, c y q eran los que tenían una mayor sensibilidad dentro de los modelos de combustible.

El ajuste de los modelos de combustible se llevó a cabo en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso, luego de lo cual se determinó que valores altos de los cuatro parámetros a, b, c y q representan de mejor manera lo ocurrido, siendo una de las combinaciones 250, 0,0829, 1,3 y 1 para cada parámetro, respectivamente, teniendo una precisión de 56,75%. Por último, de la evaluación del modelo en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024 luego del ajuste, se obtuvieron valores de precisión de hasta 53,2% y 55,4% para simulaciones de 6 y 8 horas, respectivamente, que supera a la precisión obtenida con los parámetros originales en las mismas simulaciones (14,5% y 29,6%, respectivamente). Al evaluar los parámetros en los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo se observó una sobreestimación de los incendios simulados.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Incendios forestales en el mundo	1
1.1.2	Incendios forestales en Chile	2
1.2	Gestión de incendios forestales	5
1.2.1	Gestión a nivel global	5
1.2.2	Gestión en Chile	6
1.3	Relación entre el cambio climático y los incendios forestales.....	7
1.4	Modelación de incendios forestales	9
2	PROBLEMA.....	11
3	OBJETIVOS.....	12
3.1	Objetivo general	12
3.2	Objetivos específicos.....	12
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	13
4.1	Modelación numérica de incendios forestales.....	13
4.2	Modelos de combustible.....	14
4.3	Modelos de propagación de incendios	15
4.3.1	Modelo Prometheus	17
4.3.2	Modelo FlamMap.....	20
4.3.3	Modelo Cell2Fire	22
5	MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1	Selección de un modelo de propagación de incendios forestales	24
5.1.1	Asignación de modelos de combustible.....	24
5.1.2	Realización de simulaciones.....	25
5.1.3	Determinación de la precisión.....	26
5.2	Análisis de sensibilidad	28
5.2.1	Sensibilidad de las variables meteorológicas	28
5.2.2	Sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible.....	29
5.3	Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso.....	29

5.4	Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales.....	30
6	RESULTADOS	31
6.1	Selección de un modelo de propagación de incendios forestales	31
6.1.1	Asignación de los modelos de combustible	31
6.1.2	Realización de simulaciones	35
6.1.3	Determinación de la precisión	44
6.2	Análisis de sensibilidad	46
6.2.1	Sensibilidad de las variables meteorológicas	46
6.2.2	Sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible.....	50
6.3	Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso.....	60
6.4	Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales.....	64
7	DISCUSIÓN.....	72
7.1	Selección de un modelo de propagación de incendios forestales	72
7.2	Análisis de sensibilidad	73
7.3	Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso.....	75
7.4	Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales.....	76
7.5	Observaciones finales	78
8	CONCLUSIONES.....	79
9	BIBLIOGRAFÍA.....	80
10	ANEXOS	85
	Anexo 1: Parámetros de los modelos de combustible.	85
	Anexo 2: Ecuaciones del sistema FBP relacionadas a las tasas de propagación (Forestry Canada, 1992).....	89
	Anexo 3: Información meteorológica incendio Lo Moscoso	91
	Anexo 4: Información meteorológica incendio Cuesta LLampaquillo.....	92
	Anexo 5: Información meteorológica Incendio La Engorda.....	93
	Anexo 6: Información meteorológica Mega Incendio Valparaíso 2024.....	94
	Anexo 7: Resultados del análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas.....	95

Anexo 8: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible.....	97
Anexo 9: Resultados del estudio de adaptación del modelo de combustible C-3	99
Anexo 10: Análisis de regresión lineal de los parámetros a, b, c y q.....	101
Anexo 11: Valores utilizados en los gráficos de contorno de los parámetros a, b y c..	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Reclasificación de la vegetación regional de Hagelin y Cluzel (2016) para coincidir con los modelos de combustible del sistema FBP. (Hagelin & Cluzel, 2016).	25
Tabla 5.2: Formato propuesto para la asignación de modelos de combustible a los uso de suelos/vegetación de la Región de Valparaíso.....	25
Tabla 6.1: Asignación de uso de suelo para Prometheus.	31
Tabla 6.2: Asignación de uso de suelo para FlamMap.....	33
Tabla 6.3: Incendios seleccionados para realizar las simulaciones.	35
Tabla 6.4: Área afectada por los cuatro incendios seleccionados.	38
Tabla 6.5: Área afectada por los cuatro incendios de acuerdo con simulaciones en Prometheus.	38
Tabla 6.6: Área afectada por los cuatro incendios de acuerdo con simulaciones en FlamMap.....	41
Tabla 6.7: Valores obtenidos para el cálculo del parámetro F1 en las simulaciones realizadas en Prometheus.....	44
Tabla 6.8: Valores obtenidos para el cálculo del parámetro F1 en las simulaciones realizadas en FlamMap.	44
Tabla 6.9: Valor obtenido de F1 para todas las simulaciones realizadas.	46
Tabla 6.10: Rangos de valores considerados para el análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas.....	47
Tabla 6.11: Modelos de combustible identificados en los cuatro escenarios de simulación junto a sus parámetros.	51
Tabla 6.12: Cobertura de modelos de combustible en cada escenario de simulación.....	51
Tabla 6.13: Modelos de combustible con mayor y menor cobertura en cada escenario de simulación.....	51
Tabla 6.14: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Lo Moscoso.	52
Tabla 6.15: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Cuesta Llampaiquillo.	52
Tabla 6.16: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Mega Incendio Valparaíso 2024.	52
Tabla 6.17: Rangos de valores considerados para el análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros más sensibles de los modelos de combustible.	55
Tabla 6.18: Valores considerados en el estudio de adaptación de los modelos de combustible.....	60

Tabla 6.19: Iteraciones con un mayor valor F1 junto a los parámetros considerados en el estudio de ajuste del modelo de combustible.....	61
Tabla 6.20: Iteraciones con un menor valor F1 junto a los parámetros considerados en el estudio de ajuste del modelo de combustible.....	61
Tabla 6.21: Valores de F1 para las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros de las 5 iteraciones con mayor precisión. 65	
Tabla 6.22: Valores F1 para las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 con los parámetros de combustible originales.	67
Tabla 6.23: Valores de F1 para las simulaciones a 12 horas de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo considerando los parámetros de las 5 iteraciones con mayor precisión.....	69
Tabla 6.24: Valores F1 para las simulaciones a 12 horas de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo con los parámetros de combustible originales.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Área quemada acumulada por año desde 2003 en Canadá. (AFP, 2023)	2
Figura 1.2: Causas de los incendios forestales ocurridos en Chile en el periodo 2003-2023. (Conaf, 2023).....	3
Figura 1.3: Ocurrencia nacional (Chile) de incendios forestales histórica. (Conaf, 2023)...	3
Figura 1.4: Daño nacional (Chile) histórico de incendios forestales. (Conaf, 2023).....	4
Figura 1.5: Mapa de severidad del Mega Incendio de Valparaíso 2024 (Chávez <i>et al.</i> , 2024).	5
Figura 1.6: Tendencia temporal de estudios realizados globalmente sobre incendios forestales, junto con el correspondiente número de estudios por cada año (Bargali <i>et al.</i> , 2024).....	6
Figura 1.7: Triángulo de riesgo de incendios forestales (Thompson & Calkin, 2011).	6
Figura 1.8: Pérdida de cubierta arbórea mundial debido a incendios comparada con otros factores de pérdida, 2001-2022 (MacCarthy <i>et al.</i> , 2023).....	8
Figura 1.9: Tendencias en el número anual de grandes incendios en el oeste de Estados Unidos para una variedad de ecorregiones. (USGCRP, 2017).....	8
Figura 1.10: Simulación en Prometheus del incendio "Västmanland" (Hagelin & Cluzel, 2016).....	10
Figura 4.1: Dimensiones de un modelo elíptico de crecimiento de incendios. (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	13
Figura 4.2: Formación de un nuevo frente de onda usando el principio de Huygens. (Tymstra <i>et al.</i> , 2010)	13
Figura 4.3: Ilustración del principio de Huygens usando elipses. (Finney, 1998).....	14
Figura 4.4: Diagrama de las entradas y salidas de los modelos de propagación de incendios forestales (Finney, 1998; Tymstra <i>et al.</i> , 2010; Pais <i>et al.</i> , 2021).....	16
Figura 4.5: Resultado de una simulación en la interfaz de Prometheus. (Alberta, 2023).	20
Figura 4.6: Interfaz de FlamMap. (Seli <i>et al.</i> , 2023).	22
Figura 4.7: Validación de Cell2Fire. (Pais <i>et al.</i> , 2021).	23
Figura 5.1: Diagrama de flujo del trabajo.....	24
Figura 5.2: Diagrama de flujo del uso de los modelos Prometheus y FlamMap.	27
Figura 6.1: Área total afectada por los cuatro incendios seleccionados al término de cada uno.	36
Figura 6.2: Extensión de los incendios a 12 horas de su inicio según información del FIRMS.	37
Figura 6.3: Extensión de los incendios simulados en Prometheus en 48 horas.	39

Figura 6.4: Extensión de los incendios simulados en Prometheus en 12 horas.	40
Figura 6.5: Extensión de los incendios simulados en FlamMap en 48 horas.	42
Figura 6.6: Extensión de los incendios simulados en FlamMap en 12 horas.	43
Figura 6.7: Valores F1 de las 24 simulaciones realizadas.	45
Figura 6.8: Efecto de la velocidad de viento sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	47
Figura 6.9: Efecto de la temperatura sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	48
Figura 6.10: Efecto de la humedad relativa sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	48
Figura 6.11: Sensibilidad normalizada de las variables meteorológicas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	50
Figura 6.12: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del incendio Lo Moscoso.	53
Figura 6.13: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del incendio Cuesta Llampaquillo.	53
Figura 6.14: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	54
Figura 6.15: Efecto del parámetro a sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	56
Figura 6.16: Efecto del parámetro b sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	56
Figura 6.17: Efecto del parámetro c sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	57
Figura 6.18: Efecto del parámetro q sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	57
Figura 6.19: Sensibilidad normalizada de los parámetros más sensibles de los modelos de combustible en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024. Los ejes horizontales inferiores muestran los valores de los parámetros a y c y los ejes horizontales superiores muestran los valores de los parámetros b y q.	59
Figura 6.20: Representación cartográfica de las 5 iteraciones con un mayor valor F1 en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	62
Figura 6.21: Gráfico de contorno del efecto de los parámetros a y b sobre la Puntuación-F1 de acuerdo con el análisis de regresión lineal.	63
Figura 6.22: Gráfico de contorno del efecto de los parámetros a y c sobre la Puntuación-F1 de acuerdo con el análisis de regresión lineal.	63

Figura 6.23: Simulaciones del avance en 6 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1.	65
Figura 6.24: Simulaciones del avance en 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1.	66
Figura 6.25: Simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros de los modelos de combustible originales.	67
Figura 6.26: Puntuación-F1 de las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.	68
Figura 6.27: Simulaciones del avance en 12 horas del escenario Lo Moscoso considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1 y los parámetros originales.	69
Figura 6.28: Simulaciones del avance en 12 horas del escenario Cuesta Llampaiquillo considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1 y los parámetros originales.	70
Figura 6.29: Puntuación-F1 de las simulaciones del incendio Lo Moscoso considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.....	71
Figura 6.30: Puntuación-F1 de las simulaciones del incendio Cuesta Llampaiquillo considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.....	71
Figura 7.1: Puntuación F-1 de las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando variaciones porcentuales de la velocidad de viento real y utilizando los parámetros considerados en las iteraciones 39 y 75.	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4.1: Localización de vértices en el eje x.....	14
Ecuación 4.2: Localización de vértices en el eje y	14
Ecuación 4.3: Variación del componente x de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.4: Variación del componente y de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.5: Componente a del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.6: Componente b del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.7: Componente c del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.8: Dirección de la dispersión efectiva neta (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.9: Dirección x del vector de crecimiento (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.10: Dirección y del vector de crecimiento (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	18
Ecuación 4.11: Longitud de un segmento del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	18
Ecuación 4.12: Componente del vector tangente unitario a la curva del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).....	19
Ecuación 4.13: Producto cruz entre el vector tangente unitario y el vector normal unitario (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	19
Ecuación 4.14: Coseno del ángulo cartesiano entre el vector de dirección del viento y el vector que va de la celda incendiada a una celda adyacente (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	19
Ecuación 4.15: Seno del ángulo cartesiano entre el vector de dirección del viento y el vector que va de la celda incendiada a una celda adyacente (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	19
Ecuación 4.16: Variación del componente x de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	19
Ecuación 4.17: Variación del componente y de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra <i>et al.</i> , 2010).	19
Ecuación 4.18: Localización de vértices en el eje x (Finney, 1998).	21
Ecuación 4.19: Localización de vértices en el eje y (Finney, 1998).	21
Ecuación 4.20: Corrección del ángulo diferencial en la dimensión x para considerar el efecto de la topografía (Finney, 1998).	21

Ecuación 4.21: Corrección del ángulo diferencial en la dimensión y para considerar el efecto de la topografía (Finney, 1998).	21
Ecuación 5.1: Puntuación-F1.....	26
Ecuación 5.2: Sensibilidad del resultado frente a una variable de entrada (Acosta-Alvarado <i>et al.</i> , 2020).....	28
Ecuación 5.3: Función considerada para el análisis de regresión lineal.	30
Ecuación 6.1: Función ajustada del efecto de la velocidad del viento sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	49
Ecuación 6.2: Función ajustada del efecto de la temperatura sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	49
Ecuación 6.3: Función ajustada del efecto de la humedad relativa sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	49
Ecuación 6.4: Función ajustada del efecto del parámetro a sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	58
Ecuación 6.5: Función ajustada del efecto del parámetro b sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	58
Ecuación 6.6: Función ajustada del efecto del parámetro c sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	58
Ecuación 6.7: Función ajustada del efecto del parámetro q sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.	58
Ecuación 6.8: Relación entre los parámetros a, b, c y q y la puntuación F-1.	62

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

1.1.1 Incendios forestales en el mundo

Los incendios forestales son un tipo de desastre natural que, hoy en día, se presenta en diversos lugares del planeta, teniendo consecuencias negativas tanto sociales como ambientales. Por ejemplo, en 2023 el área afectada por incendios forestales en los países pertenecientes a la Unión Europea fue de 504.002 ha, en otros países europeos fue de 300.768 ha y en el Medio Oriente y en África del Norte fue de 130.598 ha, lo que corresponde a un área total de 935.368 ha. De esto, los tres países con una mayor área afectada corresponden a Ucrania, Grecia e Italia, con un total de 226.421, 175.759 y 107.231 ha, respectivamente (San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2024). En este contexto, cabe mencionar los incendios forestales ocurridos en Ática, Grecia, en 2018, los cuales son clasificados como uno de los peores del siglo XXI, ya que resultaron en más de 100 personas fallecidas, cerca de 200 heridos y más de 3000 casas destruidas (Christakis, 2021).

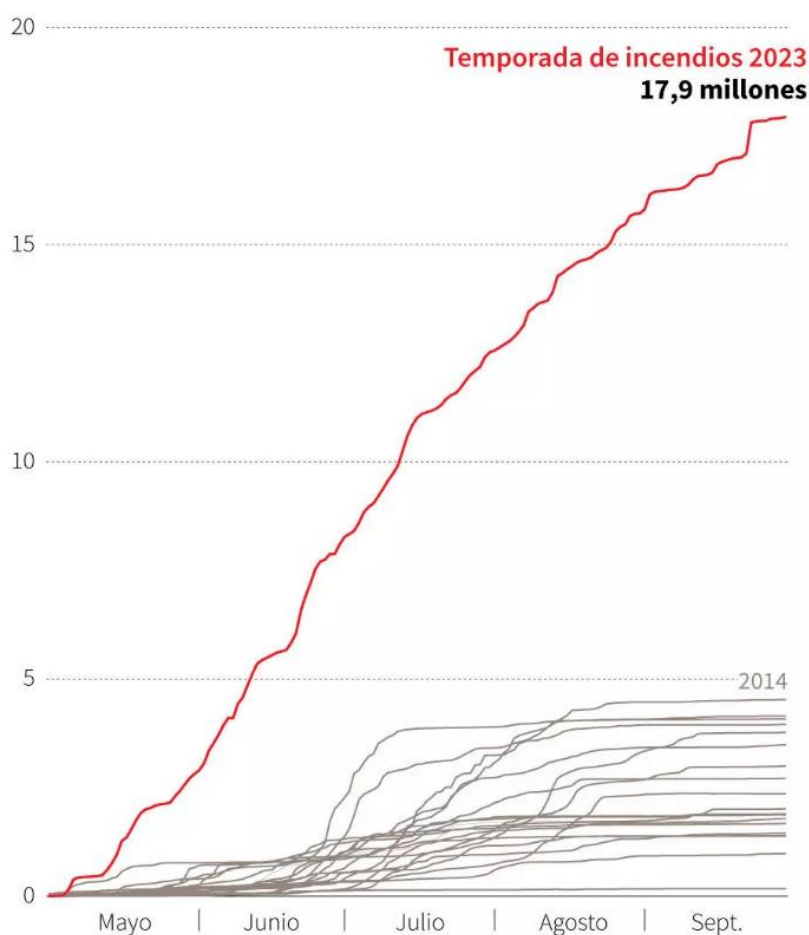
En el caso de América del Sur, Brasil fue el país sudamericano con un mayor número de incendios forestales el año 2023, registrando un total de 189.926, siendo seguido por Bolivia y Venezuela, con un registro de 42.110 y 29.361, respectivamente (Statista, 2024). En este contexto, las hectáreas perdidas debido a incendios forestales en Brasil fueron aproximadamente 27,5 millones hasta el 23 de diciembre de 2023 (AFP, 2023).

Por otro lado, para el caso de América del Norte, solo en Canadá los incendios destruyeron un total de 18 millones de hectáreas. En la Figura 1.1 se muestra una comparación entre el área quemada acumulada en dicho país en el año 2023 y en años anteriores (AFP, 2023). En el caso de Estados Unidos, ha sido posible constatar un aumento de los incendios forestales en las últimas décadas, sobre todo en la zona oeste y en la región de Alaska, además de un aumento desde la década de 1970 del área quemada por incendios forestales en estas zonas (USGCRP, 2017).

Por último, se puede mencionar el caso de Australia, cuya temporada alta de incendios comienza a principios de agosto y dura alrededor de 25 semanas. Así, para el periodo comprendido entre el 17 de abril de 2023 y el 15 de abril de 2024, se registró un total de 167.187 alertas de incendios (Global Forest Watch, s. f.). Junto a esto, cabe mencionar que Australia presenta uno de los incendios más letales del siglo XXI, el llamado Black Saturday, que ocurrió el 7 de febrero de 2009 en el Estado de Victoria y que resultó en un total de 173 fallecidos, 414 heridos, más de un millón de animales domésticos y salvajes perdidos y 450.000 hectáreas quemadas (National Museum of Australia, 2023).

Récord de áreas quemadas en Canadá

Área quemada acumulada por año* desde 2003, en millones de hectáreas



*Estimaciones basadas en datos satelitales para la temporada de incendios, del 1 de mayo al 30 de septiembre

Fuente: Canadian Wildland Fire Information System



Figura 1.1: Área quemada acumulada por año desde 2003 en Canadá. (AFP, 2023)

1.1.2 Incendios forestales en Chile

Chile es un país en el que todos los años ocurren incendios forestales en distintas regiones y de variadas magnitudes. Según datos de CONAF (2023), solo un 0,3% de los 133.405 incendios forestales ocurridos en el periodo 2003-2023 en Chile fueron causados por circunstancias naturales, mientras que un 54,3% fue iniciado de forma accidental y un 34,4% fue causado intencionalmente (Figura 1.2). En este contexto, las tres causas accidentales principales corresponden al tránsito de personas, vehículos o aeronaves, a actividades recreativas y a faenas agrícolas y pecuarias, que representan un 28,02%, 6,13% y 4,80% del total de causas, respectivamente. Así, en este periodo, el 2015 fue el año con un mayor número de incendios accidentales, registrando un total de 4.252.

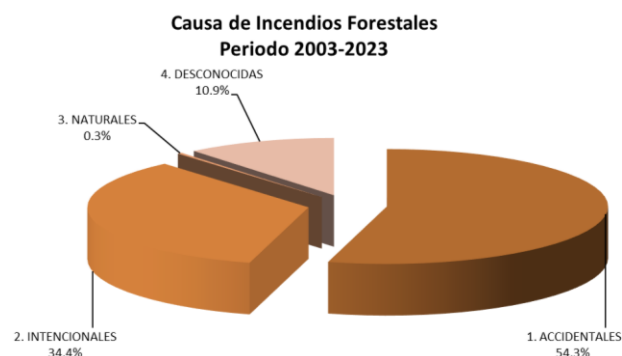


Figura 1.2: Causas de los incendios forestales ocurridos en Chile en el periodo 2003-2023. (Conaf, 2023)

Junto a lo anterior, al visualizar los datos históricos, se puede observar que el número de incendios forestales ocurridos en Chile ha ido en aumento desde la temporada 1963-1964 hasta la temporada 2022-2023 (Figura 1.3), donde los tres periodos con un mayor número de incendios registrados corresponden al de 2019-2020, 2014-2015 y 2002-2003, con un total de 8.127, 8.048 y 7.572, respectivamente. En este mismo contexto, en la Figura 1.4 se puede observar el daño nacional histórico provocado por incendios forestales, es decir, las hectáreas quemadas desde la temporada 1963-1964 hasta la temporada 2022-2023. Cabe destacar los periodos de 2016-2017 y 2022-2023, donde se registraron un total de 570.197 y 429.103 hectáreas quemadas, respectivamente, siendo así los periodos que presentan un mayor daño. Para el periodo 2014-2023, en promedio, la vegetación de tipo matorral fue la más afectada por los incendios forestales, representando el 20,02% del total de hectáreas quemadas, seguido por el tipo arbolado y las plantaciones de pino insigne de 18 años o más, que representan el 16,07% y 15,54% del total, respectivamente (Conaf, 2023).

Ocurrencia Nacional Histórica 1964-2023

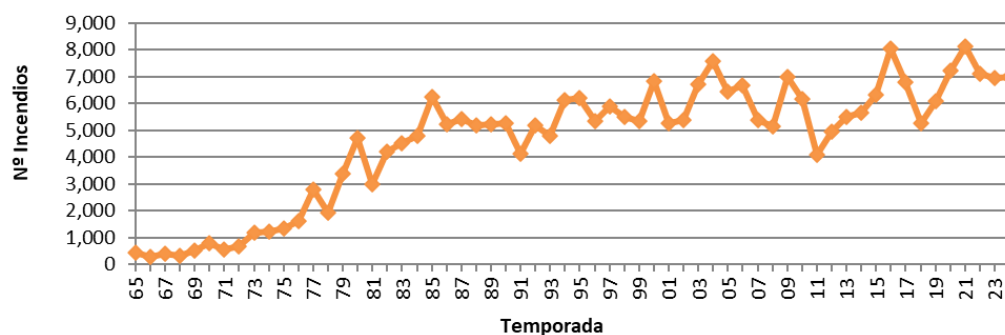


Figura 1.3: Ocurrencia nacional (Chile) de incendios forestales histórica. (Conaf, 2023)

Daño Nacional Histórico 1964-2023

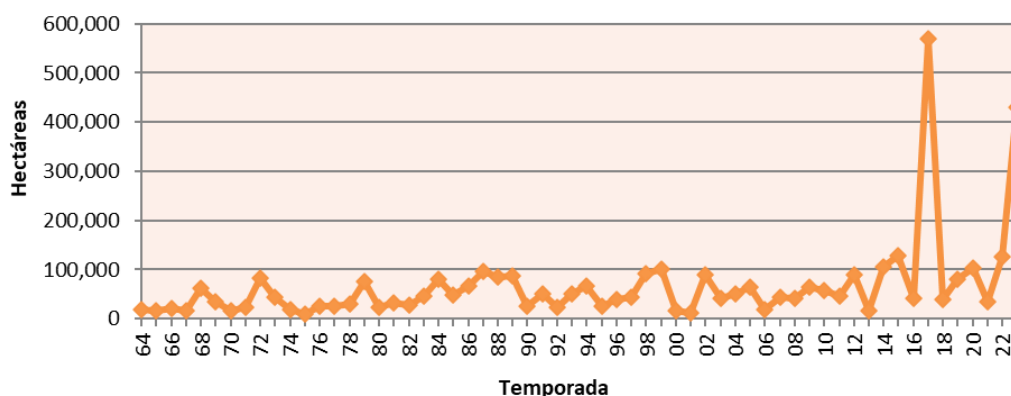


Figura 1.4: Daño nacional (Chile) histórico de incendios forestales. (Conaf, 2023)

También, al tomar en cuenta las regiones de Chile, se tiene que para el periodo 2017-2022 el total de ocurrencias fue de 52.104, donde las regiones con un mayor número de incendios fueron Biobío, Magallanes y La Araucanía, con un registro de 12.012, 11.417 y 6.154, respectivamente. En este contexto, para el periodo 2016-2021, las regiones con una mayor superficie afectada fueron La Araucanía, Biobío y Ñuble, con un total de 72.354, 23.246 y 9.857 hectáreas, respectivamente (González, 2023).

Por último, cabe detallar los incendios más grandes ocurridos en el país, donde se destacan dos. El primero de ellos es el Incendio Santa Olga, que ocurrió entre finales de 2016 y principios de 2017 en la comuna de Constitución, Región del Maule, el cuál abarcó un total de 570.197 hectáreas, dejando 11 fallecidos y más de 6.000 damnificados (Corvalán, 2024). El segundo corresponde al Mega Incendio de Valparaíso, ocurrido en la Región de Valparaíso entre el 2 y 3 febrero del año 2024, en el cual se registraron alrededor de 9.216 hectáreas quemadas entre las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache. Se estimó también un total de 9.828 edificaciones afectadas, donde los sectores más perjudicados fueron: Los Almendros B, Villa Independencia, Villa Arauco, Alto Horizonte, El Olivar I, El Olivar II, Villa Hermosa y Villa Rogers. Así, este incendio dejó un total de 135 víctimas fatales, lo que lo convierte en el segundo incendio más letal del siglo XXI en todo el mundo, siendo solo superado por el ya mencionado Black Saturday en Australia (Martínez *et al.*, 2024; Calderana, 2024; Valencia, 2024). En la Figura 1.5 se muestra una imagen satelital con el área afectada por el Mega Incendio de Valparaíso.

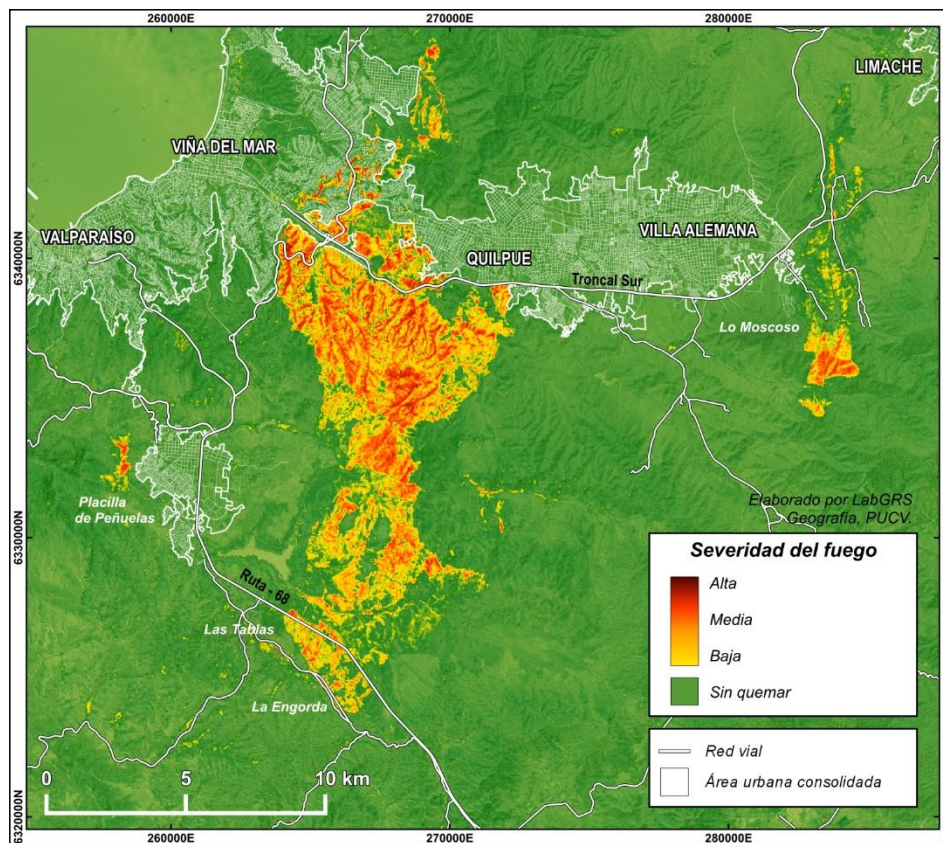


Figura 1.5: Mapa de severidad del Mega Incendio de Valparaíso 2024 (Chávez *et al.*, 2024).

1.2 Gestión de incendios forestales

1.2.1 Gestión a nivel global

Tomando en cuenta el gran problema que suponen los incendios forestales a nivel global, es de esperar que existan formas de hacer frente a este tipo de desastres. En este contexto, una de las principales herramientas corresponde a la investigación y generación de conocimientos para poder abordar de mejor manera los incendios forestales. A nivel mundial, Estados Unidos corresponde al principal contribuyente de publicaciones relacionadas con los incendios forestales, contabilizando 3.261 hasta el 1 de junio de 2023, que corresponde al 28% del total, siendo seguido por China, Canadá, España, Australia e India, con 10%, 7,26%, 6%, 5% y 3%, respectivamente (Bargali *et al.*, 2024). En la Figura 1.6 se muestra el crecimiento en el número de estudios realizados a nivel mundial sobre incendios forestales a lo largo de los años.

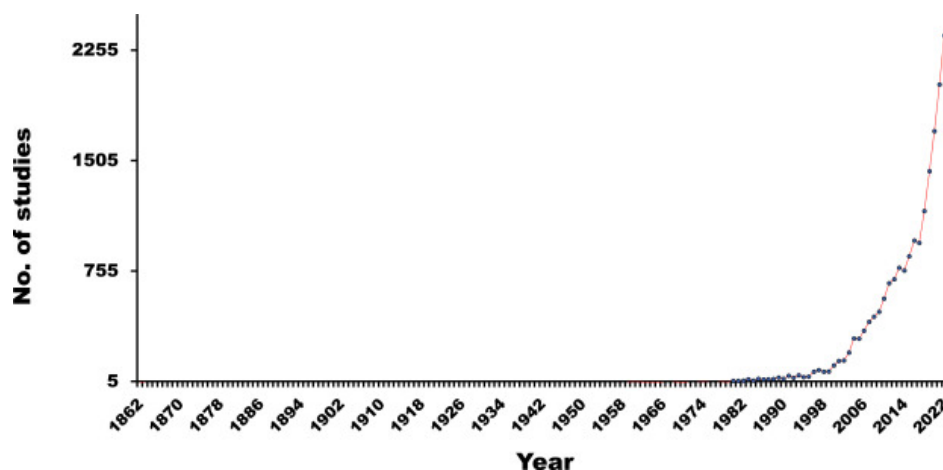


Figura 1.6: Tendencia temporal de estudios realizados globalmente sobre incendios forestales, junto con el correspondiente número de estudios por cada año (Bargali *et al.*, 2024).

En el trabajo de Thompson y Calkin (2011) se aborda la gestión de incendios forestales desde el punto de vista de la incertidumbre asociada a este tipo de fenómenos naturales y de la evaluación de riesgos. Así, se establece que existen cuatro categorías de incertidumbre: incertidumbre lingüística, incertidumbre de variabilidad, incertidumbre de conocimiento e incertidumbre de decisión. Junto a ello, se establece que el riesgo de un incendio forestal es función de la probabilidad de combustión, intensidad del incendio y efectos del incendio (Figura 1.7).

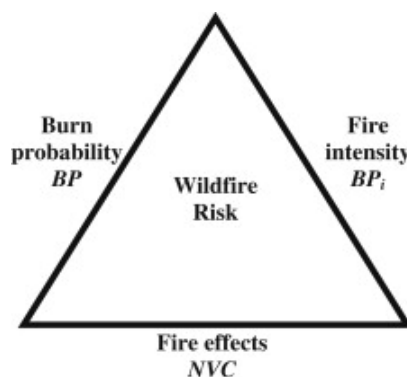


Figura 1.7: Triángulo de riesgo de incendios forestales (Thompson & Calkin, 2011).

Así, las herramientas y formas de abordar los incendios forestales tienen una serie de características en común, pero tienen diferencias sustanciales que dependen del país que se esté estudiando, ya que cada territorio presenta diferencias en los tipos de incendios forestales presentes.

1.2.2 Gestión en Chile

En Chile, la gestión de incendios forestales es llevada a cabo por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Esta institución es una entidad de derecho privado dependiente del Ministerio de Agricultura, cuya principal tarea es administrar la política forestal de Chile y fomentar el desarrollo del sector (Biblioteca Nacional de Chile, s. f.).

En dicho contexto, existe el programa de protección contra incendios forestales de CONAF (CONAF, s. f.), donde se establece un plan estratégico para el periodo 2022-2026 para hacer frente a los incendios forestales. Este programa está estructurado de forma que posee dos procesos: estratégicos y de soporte. Dentro de ellos se encuentran:

- La prevención, que consiste en la difusión, concientización e investigación de causas, y tiene como fin reducir la amenaza que propicia la ocurrencia de incendios forestales.
- La mitigación, que considera la gestión comunitaria, la planificación territorial, la regulación, la normativa y la coordinación público-privada, y tiene como fin reducir la vulnerabilidad de las comunidades y ecosistemas frente a la amenaza de los incendios forestales.
- La preparación para la respuesta, que considera el análisis y predicción, el despacho y coordinación de recursos y la detección y monitoreo. Tiene como fin disponer de información territorial, protocolos, procedimientos, personal y recursos de pronóstico, detección, monitoreo, y preparación de recursos equipados, capacitados y entrenados para una respuesta eficaz y eficiente.
- La respuesta, que consiste en el combate de incendios, y tiene como fin asegurar una efectiva respuesta en ataque inicial ante ocurrencia emergente y una gestión integrada en ataque ampliado frente a emergencias de incendios forestales.
- El soporte técnico y logístico, que se establece para apoyar los procesos anteriores y considera el reclutamiento y selección del personal, la formación técnica, la seguridad y salud ocupacional, la investigación, desarrollo e innovación, la gestión del conocimiento, la planificación y control de gestión, la logística operacional, la seguridad de la información, las telecomunicaciones y la comunicación.

Junto a esto, CONAF cuenta con la herramienta “Wildfire Analyst”, que corresponde a un simulador de incendios forestales que, utilizando información satelital, meteorológica y datos de eventos pasados, proyecta escenarios de incendios (Corporación Nacional Forestal, 2015; González, 2024). Esta herramienta es utilizada por CONAF cuando ocurre un incendio forestal para proyectar su posible avance, utilizando información obtenida por brigadistas en terreno (R. Martínez, comunicación personal, 12 de abril de 2024).

1.3 Relación entre el cambio climático y los incendios forestales

El cambio climático que enfrentamos hoy en día como sociedad producto del desarrollo industrial humano ha provocado, entre otras cosas, el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en varias regiones del planeta (US EPA, 2024). Esto, según varias fuentes, genera las condiciones propicias para que cada vez se genere un mayor número de incendios y de proporciones más grandes, agravando sus consecuencias sobre el medio ambiente y las vidas de las personas (Environmental Defense Fund, s.f.; MacCarthy *et al.*, 2023; US EPA, 2024). Por ejemplo, de acuerdo con Tyukavina *et al.* (2022) y MacCarthy *et al.* (2023), se ha observado un aumento en la pérdida de bosques debido a incendios forestales entre 2001 y 2019 impulsado por un aumento de las temperaturas, lo

que se muestra en la Figura 1.8 y, también, se ha visto un aumento en el número de grandes incendios en Estados Unidos entre 1984 y 2011, como se muestra en la Figura 1.9 (USGCRP, 2017).

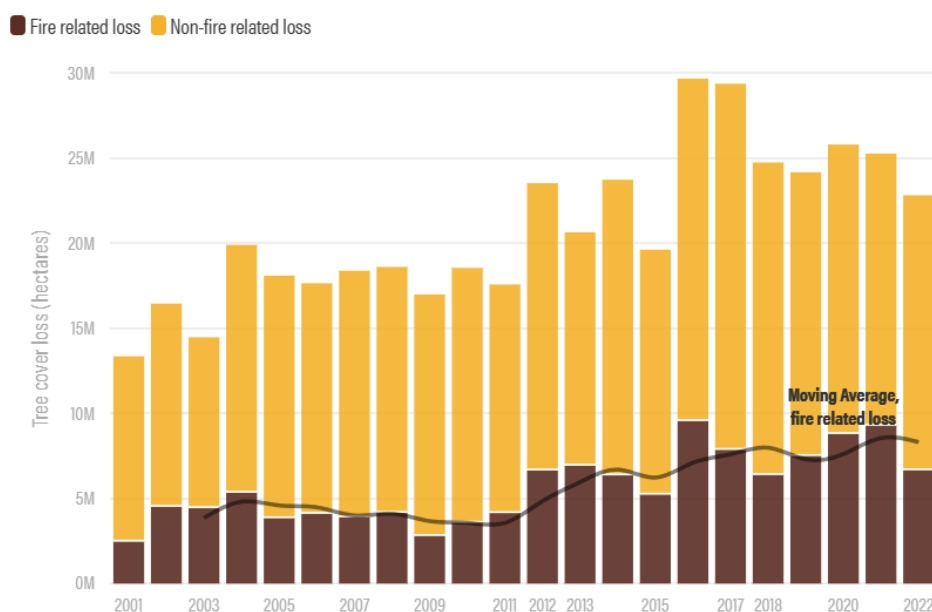


Figura 1.8: Pérdida de cubierta arbórea mundial debido a incendios comparada con otros factores de pérdida, 2001-2022 (MacCarthy *et al.*, 2023)

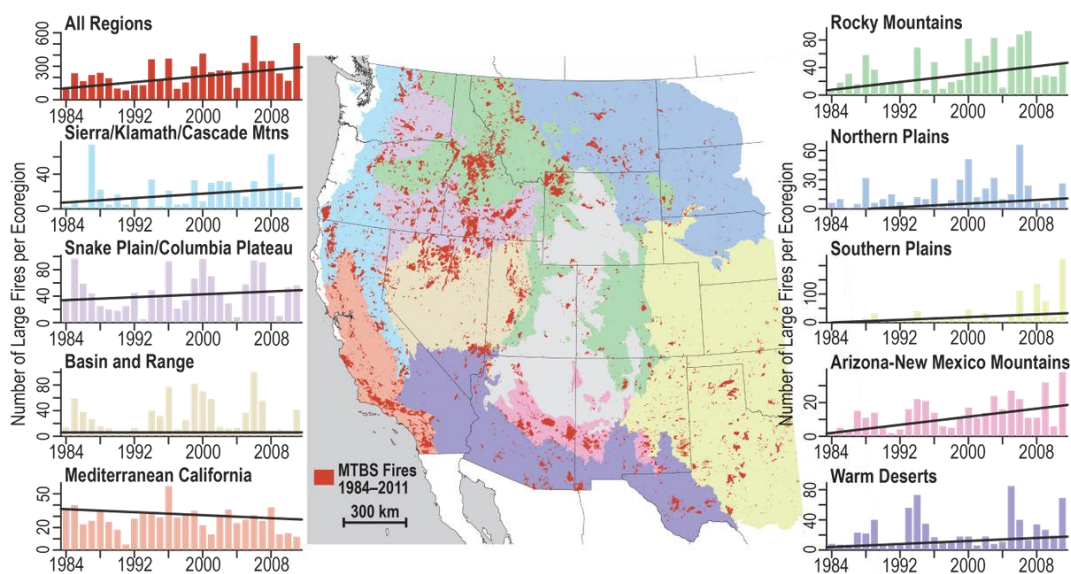


Figura 1.9: Tendencias en el número anual de grandes incendios en el oeste de Estados Unidos para una variedad de ecorregiones. (USGCRP, 2017)

Entre las consecuencias del aumento de incendios forestales, se encuentra la generación de problemas ecológicos que amenazan la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas. Uno de los más claros es la presencia de incendios en ecosistemas donde

históricamente no se daban, de forma que las especies presentes no están adaptadas a ellos (Pausas, 2012).

De acuerdo con Pausas (2012), uno de los problemas corresponde al riesgo de inmadurez, que se da cuando la frecuencia de los incendios es tan elevada que no da tiempo a las especies para volver a llegar a su edad reproductiva, impidiendo la regeneración de las poblaciones luego del fin del siniestro. Un segundo problema corresponde al riesgo de senescencia, que se da cuando la frecuencia de incendios disminuye en un ecosistema donde naturalmente es alta. Esto puede hacer que aquellas especies cuya germinación es estimulada por calor o humo mueran por senescencia antes de poder dejar descendencia.

1.4 Modelación de incendios forestales

La modelación del comportamiento de incendios se ha llevado a cabo en diversos países del mundo. Entre ellos destacan los Estados Unidos, Australia y Canadá, siendo pioneros gracias a autores como McArthur (1966), Rothermel (1972) y Wagner (1973). También, se han llevado a cabo importantes trabajos en países como España, Portugal, Italia y Nueva Zelanda, donde se han adaptado modelos de comportamiento de incendios a realidades locales (Carrasco *et al.*, 2023). A esta lista se puede sumar Chile, que utiliza el software español “Wildfire Analyst” para apoyar en el combate de incendios de CONAF.

Carrasco *et al.* (2023) describen al Sistema Canadiense de Predicción de comportamiento de Incendios (FBP, por sus siglas en inglés “Fire Behavior Prediction”) como uno de los más importantes en la actualidad, al que se suma el Sistema de Predicción de Comportamiento de Incendios y Modelación de Combustibles (BEHAVE) en Estados Unidos. En el caso de Chile existe el denominado sistema KITRAL, creado para predecir el comportamiento de incendio de superficie e intensidad del fuego.

En dicho contexto, existe por ejemplo el modelo Prometheus, que integra el sistema FBP para modelar la propagación de un incendio forestal. FARSITE, por su lado, hace lo mismo en Estados Unidos utilizando el sistema BEHAVE. Hagelin y Cluzel (2016) utilizaron ambos modelos para recrear el incendio de “Västmanland” ocurrido en Suecia. En dicho trabajo se realizaron 3 simulaciones con dos conjuntos distintos de datos meteorológicos. Las dos primeras simulaciones (en Prometheus y FlamMap) mostraron pobres resultados, ya que no lograron representar fielmente la extensión del incendio. La tercera simulación, hecha solo en Prometheus, mostró mejores resultados que se acercaron más a la representación del incendio. Este último resultado se muestra en la Figura 1.10. Los autores concluyeron que, de forma preliminar, Prometheus es el modelo que tiene un mayor potencial de aplicación en Suecia al comparar sus resultados con los de FlamMap, pero que se requieren más estudios para generar un modelo realmente aplicable al territorio sueco.

En el caso de Chile, en los últimos años se ha desarrollado el modelo Cell2Fire, que tiene un funcionamiento similar a los dos anteriores (Pais *et al.*, 2021).

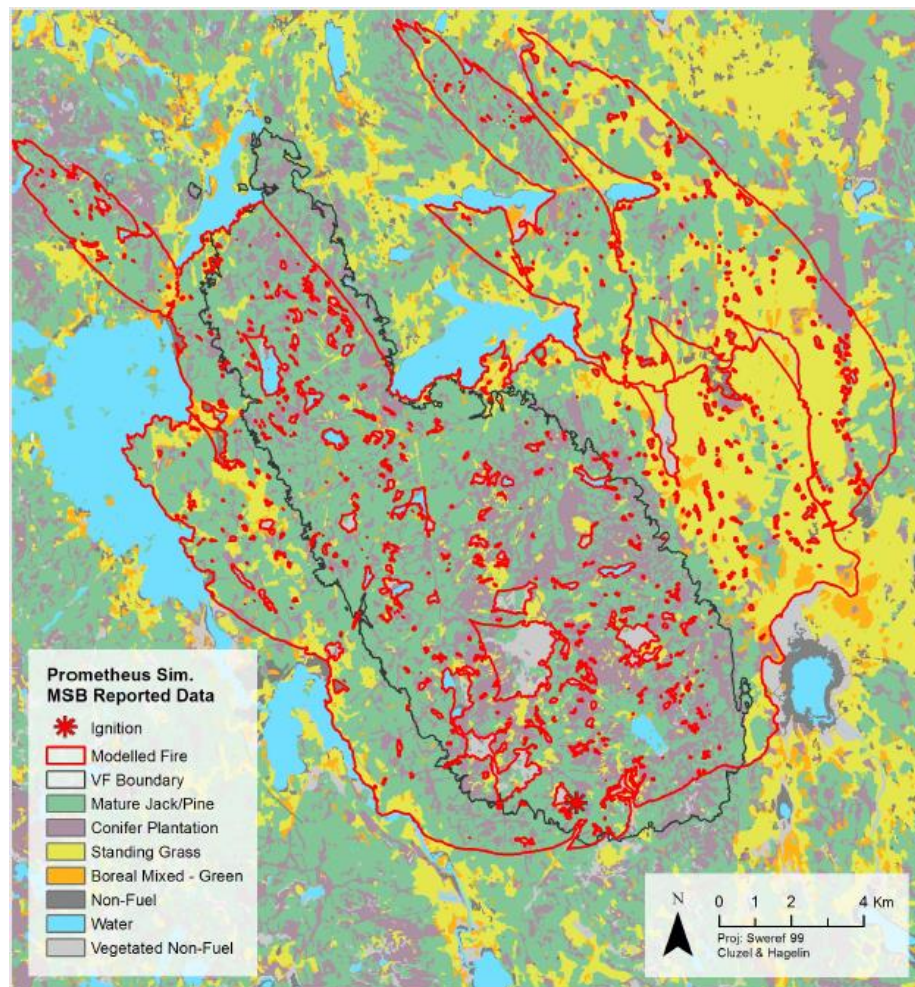


Figura 1.10: Simulación en Prometheus del incendio "Västmanland" (Hagelin & Cluzel, 2016).

2 PROBLEMA

El cambio climático ha impactado fuertemente en la ocurrencia de incendios forestales, aumentando su magnitud y cantidad de eventos. Esta situación amerita tomar medidas que aporten en el combate de incendios forestales para disminuir sus consecuencias sobre las personas y el medio ambiente. Por todo esto, la implementación de herramientas informáticas que permitan predecir el comportamiento de los incendios forestales resulta de vital importancia en la gestión y prevención de este tipo de desastres, ya que entregan información valiosa sobre la velocidad de propagación, el área afectada en el tiempo, la intensidad del incendio, entre otros datos. Esta información resulta fundamental a la hora de establecer planes de ordenamiento territorial y planes de evacuación ante desastres, ya que se podría conocer de mejor manera los sectores más propensos a sufrir consecuencias por un incendio forestal. Además, permitiría establecer estrategias para hacer frente a los incendios forestales cuando ocurren, ya que se podría minimizar el gasto de recursos y priorizarlos en donde más se necesiten al poder predecir la forma en la que un incendio se va a comportar. Como se mencionó, este tipo de herramientas son utilizadas en diversos lugares del mundo, como puede ser el uso de FlamMap en Estados Unidos y de Prometheus en Canadá.

Actualmente, en Chile no existe un modelo de propagación de incendios forestales que esté adecuado a la región de Valparaíso. Junto a ello, existe un desconocimiento de los modelos de combustible presentes en la región. Por ello, en este trabajo se planteó la posibilidad de adaptar uno de los softwares utilizados en Norteamérica (Prometheus, de Canadá, y FlamMap, de Estados Unidos) a la región de Valparaíso, adecuando su configuración y parámetros para que represente de mejor manera el comportamiento de incendios en dicho territorio. Esto en vista de la magnitud de los incendios ocurridos en el pasado, como el “Gran Incendio de Valparaíso” en 2014 y el mega incendio ocurrido en febrero de 2024. La existencia de un modelo de propagación de incendios forestales adecuado para la región de Valparaíso impactaría de forma positiva en los esfuerzos de combate y prevención de incendios forestales.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Generar una propuesta de adaptación de un modelo de propagación de incendios forestales para la Región de Valparaíso.

3.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar un modelo de propagación de incendios forestales basándose en su precisión y simplicidad de implementación.
2. Determinar la sensibilidad del modelo seleccionado frente a cambios en las variables meteorológicas y en los modelos de combustible.
3. Adaptar los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso.
4. Evaluar la precisión del modelo adaptado para predecir la propagación de incendios forestales.

4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Modelación numérica de incendios forestales

Una gran parte de los modelos de propagación de incendios forestales se basa en la asunción de que la forma de un incendio a partir de un foco puede ser representada por una elipse (Finney, 1998; Tymstra *et al.*, 2010; Pais *et al.*, 2021). Una representación gráfica de esto se muestra en la Figura 4.1.

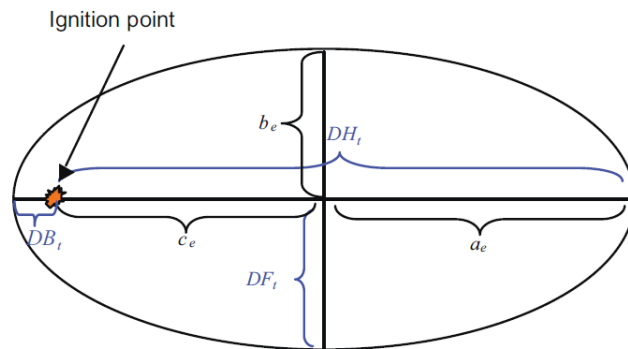


Figura 4.1: Dimensiones de un modelo elíptico de crecimiento de incendios. (Tymstra *et al.*, 2010). DH_t = Distancia de propagación del incendio en el frente en el tiempo t . DB_t = Distancia trasera de propagación del incendio en el tiempo t . DF_t = Distancia de propagación del incendio de flanco en el tiempo t . a_e = Distancia de dispersión hacia adelante desde el centro de la elipse. b_e = Distancia de dispersión de flanco. c_e = Distancia de propagación hacia adelante desde el punto de ignición hasta el centro de la elipse.

Para representar el crecimiento de un incendio, se utiliza el principio de Huygens de propagación de ondas de luz, quien considera cada punto en el frente de una onda de luz como la fuente de ondas más pequeñas individuales, describiendo el nuevo frente de onda como la superficie tangente a las circunferencias de las ondas pequeñas (Tymstra *et al.*, 2010). Esto se muestra en la Figura 4.2.

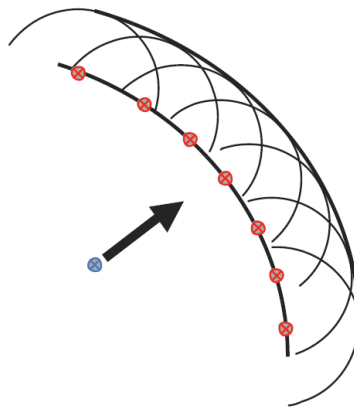


Figura 4.2: Formación de un nuevo frente de onda usando el principio de Huygens. (Tymstra *et al.*, 2010)

Richards (1990) desarrolló un método para combinar el principio de Huygens y la representación elíptica de un foco de incendio para modelar el crecimiento de un frente de incendio. En él, se utilizan ecuaciones diferenciales parciales para propagar y localizar los vértices del perímetro de incendio (Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2). En la Figura 4.3 se muestra cómo se ve el principio de Huygens aplicado a formas elípticas.

$$X_t = \frac{b^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - a^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(a^2(x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - b^2(x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \sin \theta$$

Ecuación 4.1:
Localización de
vértices en el eje x

$$Y_t = \frac{-b^2 \sin \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - a^2 \cos \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(a^2(x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - b^2(x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \cos \theta$$

Ecuación 4.2:
Localización de
vértices en el eje y

Donde:

X_t , corresponde a la componente de la tasa de dispersión superficial para la dimensión x [m/min]

Y_t , corresponde a la componente de la tasa de dispersión superficial para la dimensión y [m/min]

a , corresponde a la dimensión a_e de la elipse (Figura 4.1)

b , corresponde a la dimensión b_e de la elipse (Figura 4.1)

c , corresponde a la dimensión c_e de la elipse (Figura 4.1)

x_s , corresponde al ángulo diferencial en la dimensión x horizontal [radianes]

y_s , corresponde al ángulo diferencial en la dimensión y horizontal [radianes]

θ , corresponde a la dirección de la velocidad máxima de propagación [radianes], que coincide con la dirección del vector viento y la pendiente

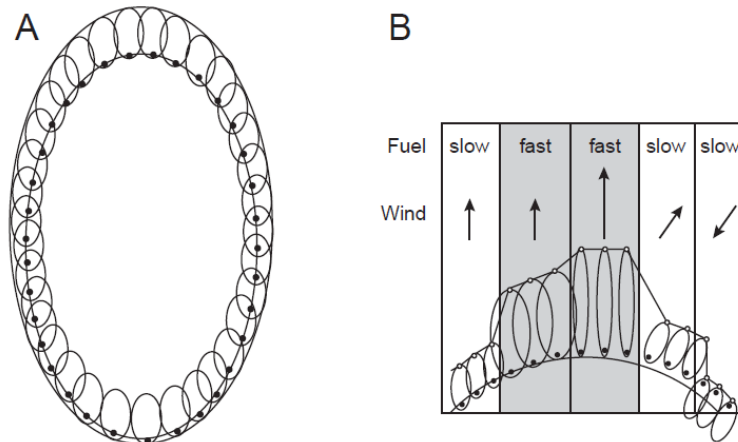


Figura 4.3: Ilustración del principio de Huygens usando elipses. (Finney, 1998).

A) Condiciones uniformes. B) Condiciones no uniformes mostrando el efecto que el tipo de combustible, velocidad y dirección del viento tienen sobre la forma y orientación de la elipse.

4.2 Modelos de combustible

Los modelos de combustible se definen como “estructuras de la vegetación tipo a las que se les presuponen un comportamiento frente al fuego conocido, permiten predecir el

comportamiento del fuego definiendo, entre otros parámetros, la velocidad de propagación y la longitud de llama” (Generalitat Valenciana, s. f.). En otras palabras, son modelos que representan distintos tipos de vegetación y la forma en que un incendio se comportaría en presencia de ellos.

Se han realizado numerosos trabajos para desarrollar modelos de combustible. Uno de ellos es el de Anderson (1982), quien clasificó los combustibles en cuatro grupos: *grasses* (pastos), *brush* (maleza), *timber* (madera) y *slash* (tala). La principal diferencia de comportamiento del fuego entre ellos está asociada a la carga de combustible, que es la cantidad de energía total que un material liberaría en un incendio (Cortafuegos: Peritaje & Ingeniería, s. f.), y su distribución a través de las clases de tamaño de las partículas de combustible. Así, el autor describe un total de 13 modelos de combustible.

Posteriormente, Scott y Burgan (2005) desarrollaron un nuevo conjunto de modelos de combustible basándose en los 13 modelos de Anderson (1982). De esta forma, agruparon los nuevos modelos de combustible en 7 grupos: *nonburnable* (no combustible), *Grass* (hierba), *grass-shrub* (hierba-arbusto), *shrub* (arbusto), *timber-understory* (madera-sotobosque), *timber litter* (camadas de madera) y *slash-blowdown* (tala-desbroce). Con ello, describieron un total de 40 modelos de combustible.

En Canadá, Hirsch (1996) describe 16 modelos de combustible, que representan la mayoría de los conjuntos de combustibles encontrados en ese país. De esta forma, los modelos de combustible se agrupan en 5 categorías: *coniferous* (coníferas), *deciduous* (caducifolio), *mixedwood* (madera mixta), *slash* (tala) y *open* (abiertos). Estos modelos de combustibles son utilizados dentro del sistema de Predicción del Comportamiento de Incendios (*FBP System*) de Canadá.

En el caso de Chile, Julio *et al.* (1995a) llevaron a cabo un trabajo para desarrollar un conjunto de modelos de combustible para Chile. En dicho trabajo, se describe un total de 31 modelos de combustible, separados en 5 grupos: Grupo I (Praderas, pastizales, estratos herbáceos y cultivos agrícolas), grupo II (Matorrales, arbustos y renovables nativos), grupo III (arbolado nativo), grupo IV (plantaciones forestales) y grupo V (desechos de explotaciones forestales a tala rasa).

Los parámetros de estos tres conjuntos de modelos de combustible se muestran en el Anexo 1.

4.3 Modelos de propagación de incendios

De forma general, los modelos de propagación funcionan recibiendo entradas, entre las cuales se encuentra (Finney, 1998; Tymstra *et al.*, 2010; Pais *et al.*, 2021):

- Información topográfica del terreno que se va a simular, incluyendo la elevación, el aspecto y la pendiente.

- Información meteorológica, incluyendo la temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitaciones y cobertura de nubes.
- Información sobre los modelos de combustible presentes en el terreno que se va a simular.
- Información sobre los puntos de ignición que se van a considerar.

Esta información es utilizada por los modelos para realizar los cálculos necesarios y entregar resultados. Así, entre las salidas entregadas, por ejemplo, se encuentran (Finney, 1998; Tymstra *et al.*, 2010; Pais *et al.*, 2021):

- Tasa de propagación.
- Dirección de propagación.
- Intensidad del fuego.
- Vectores de propagación.
- Perímetros de incendio.
- Calor liberado.
- Longitud de llama.

En la Figura 4.4 se muestra un diagrama que representa lo descrito.

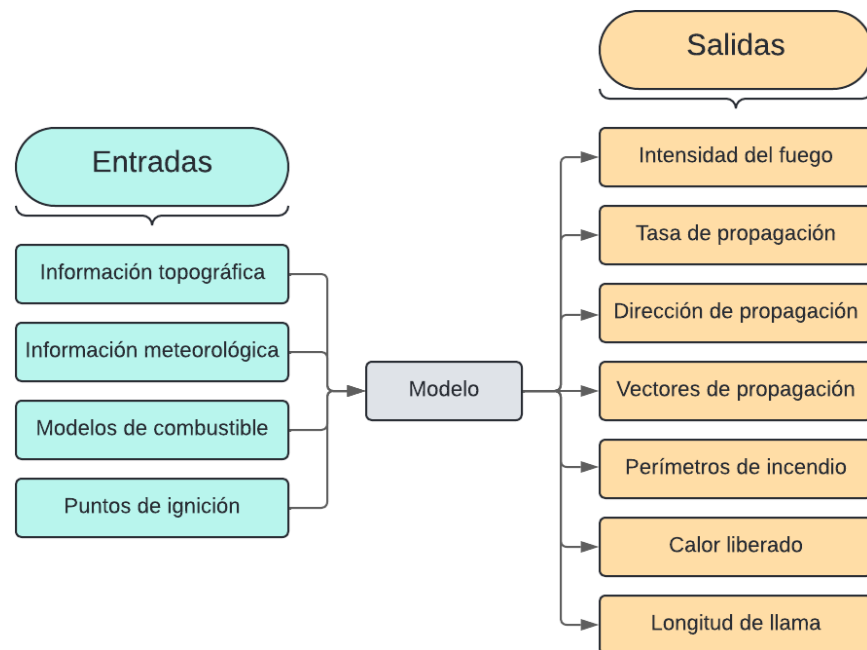


Figura 4.4: Diagrama de las entradas y salidas de los modelos de propagación de incendios forestales (Finney, 1998; Tymstra *et al.*, 2010; Pais *et al.*, 2021).

A continuación, se describen tres modelos de propagación de incendios.

4.3.1 Modelo Prometheus

Prometheus es un modelo determinista de simulación del crecimiento de incendios forestales desarrollado en Canadá. Está basado en el Índice Meteorológico de Incendios (FWI, por las siglas *Fire Weather Index*) y en el sistema de Predicción del Comportamiento de Incendios (FBP, por las siglas *Fire Behaviour Prediction*), ambos subsistemas del Sistema Canadiense de Clasificación del Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS, por las siglas *Canadian Forest Fire Danger Rating System*). Es resultado de un proyecto respaldado por el Centro Interagencial Canadiense de Incendios Forestales y sus miembros. Fue originalmente lanzado en 2002 y su versión más reciente fue publicada el 23 de diciembre de 2021 (Alberta, 2023). En la Figura 4.5 se muestra un resultado de simulación en la interfaz de Prometheus, correspondiente al incendio Dogrib, ocurrido en 2001 al sudoeste de Alberta, Canadá.

El modelo utiliza datos heterogéneos de combustibles, topografía y condiciones meteorológicas para calcular resultados espacialmente explícitos sobre el comportamiento y la propagación del incendio. Para ello, se requiere ingresar esta información en un formato de grilla, donde cada celda contiene las variables asociadas a los puntos geográficos. Así, a partir de los puntos de ignición, el modelo proyecta una elipse, cuyas dimensiones cambiarán dependiendo de las variables de la celda desde la cual se proyecta, para luego generar una capa tangente a todas las elipses generadas proyectando así el nuevo perímetro de incendio. Todos los resultados de salida son compatibles con sistemas de integración geográfica, como QGIS o ArcGIS (Alberta, 2023). La Ecuación 4.3, Ecuación 4.4, Ecuación 4.5, Ecuación 4.6, Ecuación 4.7, Ecuación 4.8, Ecuación 4.9, Ecuación 4.10 y Ecuación 4.11 son utilizadas por Prometheus para modelar la propagación de incendios en dos dimensiones. La Ecuación 4.12, Ecuación 4.13, Ecuación 4.14, Ecuación 4.15, Ecuación 4.16 y Ecuación 5.3 se utilizan para modelar la propagación de un incendio en tres dimensiones. Las variables ROS_{tj}^i , $BROS_{tj}^i$ y $FROS_{tj}^i$ provienen del sistema FBP (Forestry Canada, 1992) y algunas de sus ecuaciones se muestran en el Anexo 2.

Entre las potenciales aplicaciones de Prometheus, se describen:

- Previsión del crecimiento de los incendios forestales para la toma de decisiones operativas.
- Evaluación de la eficacia de estrategias alternativas de gestión del combustible.
- Planificación de quemas prescritas.
- Apoyo forense a las investigaciones de incendios forestales.
- Estudio del papel del fuego en el establecimiento y mantenimiento de patrones paisajísticos.
- Proporcionar estimaciones espaciales y temporales de las emisiones de humo.
- Examinar el impacto de los escenarios de cambio climático en la superficie quemada.
- Complementar los programas de formación y educación sobre comportamiento en caso de incendio.

$$\Delta P_{x_j}^i = \Delta t \left(\frac{-a_e^2 \sin(\theta) [-y_s \sin(\theta) + x_s \cos(\theta)] + b_e^2 \cos(\theta) [y_s \cos(\theta) + x_s \sin(\theta)]}{\sqrt{a_e^2 [-y_s \sin(\theta) + x_s \cos(\theta)]^2 + b_e^2 [y_s \cos(\theta) + x_s \sin(\theta)]^2}} + c_e \sin(\theta) \right)$$

$$\Delta P_{y_j}^i = \Delta t \left(\frac{-a_e^2 \cos(\theta) [-y_s \sin(\theta) + x_s \cos(\theta)] - b_e^2 \sin(\theta) [y_s \cos(\theta) + x_s \sin(\theta)]}{\sqrt{a_e^2 [-y_s \sin(\theta) + x_s \cos(\theta)]^2 + b_e^2 [y_s \cos(\theta) + x_s \sin(\theta)]^2}} + c_e \cos(\theta) \right)$$

$$a_e = \frac{ROS_{t_j}^i + BROS_{t_j}^i}{2}$$

$$b_e = FROS_{t_j}^i$$

$$c_e = \frac{ROS_{t_j}^i - BROS_{t_j}^i}{2}$$

$$\theta = RAZ_j^i$$

$$x_s = \frac{P_{x_j}^{i+1} - P_{x_j}^{i-1}}{2\Delta s}$$

$$y_s = \frac{P_{y_j}^{i+1} - P_{y_j}^{i-1}}{2\Delta s}$$

$$\Delta s = \frac{2\pi}{N_j}$$

Donde:

P_j^i , corresponde a un vértice específico en el perímetro de incendio.

$P_{x_j}^i$ y $P_{y_j}^i$ corresponden a componentes dimensionales de P_j^i .

Δt , corresponde a la duración del paso de tiempo.

a_e , b_e y c_e , corresponden a las dimensiones de la elipse en P_j^i .

$ROS_{t_j}^i$, corresponde a la tasa de propagación de frente.

$BROS_{t_j}^i$, corresponde a la tasa de propagación hacia atrás.

$FROS_{t_j}^i$, corresponde a la tasa de propagación de flanco.

θ , corresponde a la dirección de máxima propagación potencial del incendio.

RAZ_j^i , corresponde a la dirección de propagación neta efectiva.

x_s y y_s , corresponden a la dirección en la que el vector de crecimiento se extenderá a partir de P_j^i .

N_j , corresponde al número de vértices al paso de tiempo j .

Ecuación 4.3: Variación del componente x de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.4: Variación del componente y de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.5: Componente a del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.6: Componente b del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.7: Componente c del modelo elíptico de focos de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.8: Dirección de la dispersión efectiva neta (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.9: Dirección x del vector de crecimiento (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.10: Dirección y del vector de crecimiento (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.11: Longitud de un segmento del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

$$r_{x_j}^i = \frac{L_j^{i+1}(P_{x_j}^{i+1} - P_{x_j}^i) - L_j^i(P_{x_j}^{i-1} - P_{x_j}^i)}{\left\| L_j^{i+1}(P_{x_j}^{i+1} - P_{x_j}^i) - L_j^i(P_{x_j}^{i-1} - P_{x_j}^i) \right\|}$$

$$\vec{n}_j^i = \vec{r}_j^i \times \vec{N}_j^i$$

$$\cos \varphi = \vec{n}_j^i \cdot \vec{\theta}_j^i$$

$$\sin \varphi = (\vec{N}_j^i \times \vec{\theta}_j^i) \cdot \vec{n}_j^i$$

$$\Delta P_{x_j}^i = \Delta t \left(\left[\frac{a_e^2 \cos \varphi}{\sqrt{a_e^2 \cos^2 \varphi + b_e^2 \sin^2 \varphi}} + c \right] \theta_{x_j}^i + \left[\frac{b_e^2 \sin \varphi}{\sqrt{a_e^2 \cos^2 \varphi + b_e^2 \sin^2 \varphi}} (N_{y_j}^i \theta_{z_j}^i - N_{z_j}^i \theta_{y_j}^i) \right] \right)$$

$$\Delta P_{y_j}^i = \Delta t \left(\left[\frac{a_e^2 \cos \varphi}{\sqrt{a_e^2 \cos^2 \varphi + b_e^2 \sin^2 \varphi}} + c \right] \theta_{y_j}^i + \left[\frac{b_e^2 \sin \varphi}{\sqrt{a_e^2 \cos^2 \varphi + b_e^2 \sin^2 \varphi}} (N_{z_j}^i \theta_{x_j}^i - N_{x_j}^i \theta_{z_j}^i) \right] \right)$$

Donde:

$\vec{r}_j^i$, corresponde al vector unitario tangente al vértice P_j^i .

$r_{x_j}^i$, corresponde a una componente dimensional de $\vec{r}_j^i$.

L_j^i , corresponde a la longitud de un borde que define una parte del perímetro del incendio.

$P_{x_j}^i$ y $P_{y_j}^i$ corresponden a componentes dimensionales de P_j^i .

$\vec{n}_j^i$, corresponde al producto cruz entre $\vec{r}_j^i$ y $\vec{N}_j^i$.

φ , corresponde al ángulo cartesiano entre el vector de dirección del viento y el vector que va de la celda incendiada a una celda adyacente.

$\vec{\theta}_j^i$, corresponde a la dirección efectiva del viento expresada como vector de longitud unitaria.

$\theta_{x_j}^i$, $\theta_{y_j}^i$ y $\theta_{z_j}^i$ corresponden a las componentes dimensionales de $\vec{\theta}_j^i$.

Ecuación 4.12: Componente del vector tangente unitario a la curva del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.13: Producto cruz entre el vector tangente unitario y el vector normal unitario (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.14: Coseno del ángulo cartesiano entre el vector de dirección del viento y el vector que va de la celda incendiada a una celda adyacente (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.15: Seno del ángulo cartesiano entre el vector de dirección del viento y el vector que va de la celda incendiada a una celda adyacente (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.16: Variación del componente x de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

Ecuación 4.17: Variación del componente y de un vértice del perímetro de incendio (Tymstra *et al.*, 2010).

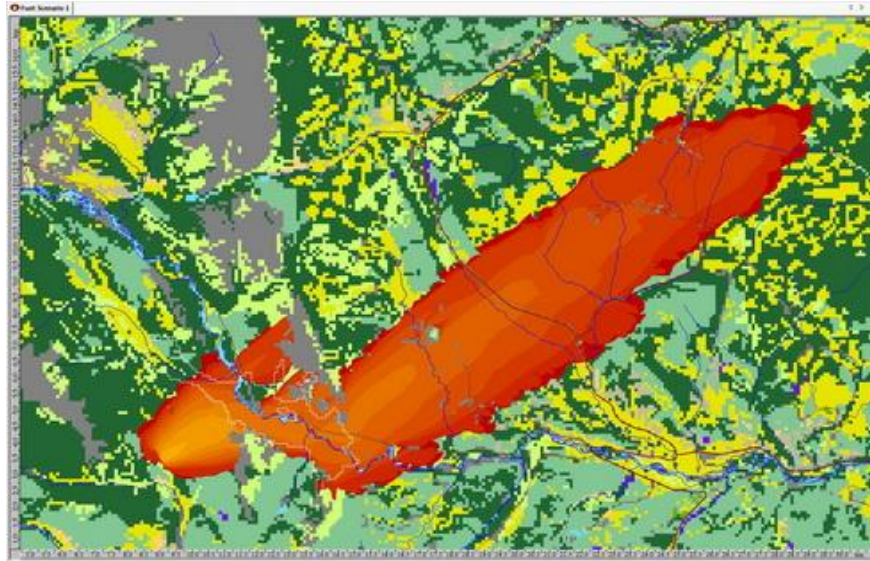


Figura 4.5: Resultado de una simulación en la interfaz de Prometheus. (Alberta, 2023).

4.3.2 Modelo FlamMap

FlamMap es una aplicación de escritorio determinista desarrollada en Estados Unidos para el análisis de incendios forestales. Tiene la capacidad de simular características de los incendios bajo condiciones ambientales constantes, que incluyen la tasa de propagación, longitud de la llama, intensidad del perímetro de incendio, probabilidades de ignición, entre otros. Trabaja con un terreno en formato ráster, el cual es dividido en celdas, cada una de las cuales tiene variables asociadas y, de la misma forma que Prometheus, proyecta elipses a partir de los puntos de ignición para generar el nuevo perímetro de incendio. Originalmente, su principal función era calcular las características que un incendio hipotético tendría en cada punto del territorio, sin embargo, actualmente es capaz de simular el comportamiento de un incendio a través del tiempo bajo condiciones heterogéneas de terreno, combustibles y meteorología, esto último gracias a la inclusión de FARSITE, que es el modelo de propagación de incendios que en el pasado se utilizaba de forma separada a FlamMap. En otras palabras, al utilizar FlamMap para modelar la propagación de incendios forestales, se está utilizando lo que antes era individualmente FARSITE (Missoula Fire Sciences Laboratory, s. f.). Las principales ecuaciones utilizadas por FlamMap son la Ecuación 4.18, Ecuación 4.19, Ecuación 4.20 y Ecuación 4.21 (Finney, 1998).

FlamMap fue desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos y su última versión es la 6.2, que fue lanzada el 14 de noviembre de 2023. Una de sus características es que incorpora WindNinja, que es un software que simula campos de viento de acuerdo con variaciones del terreno, lo cual permite el uso de información de viento en formato de grilla (Missoula Fire Sciences Laboratory, s. f.). En la Figura 4.6 se muestra la interfaz de FlamMap.

Junto a lo anterior, FlamMap incorpora los siguientes modelos de comportamiento de incendios (Missoula Fire Sciences Laboratory, s. f.):

- Modelo de propagación de incendio superficial de Rothermel (1972).
- Modelo de iniciación de fuego de copa de Van Wagner (1977).
- Modelo de propagación de fuego de copa de Rothermel (1991).
- Modelo de localización de Albini (1979).
- Método de cálculo de fuego de copa de Finney (1998) o Reinhardt (2001).
- Modelo de humedad de combustible muerto de Nelson (2000).

$$X_t = \frac{a^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2(x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2(x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \sin \theta$$

$$Y_t = \frac{-a^2 \sin \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \cos \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2(x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2(x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \cos \theta$$

$$x_s = (x_{i-1} - x_{i+1}) \pm D_i \sin \omega_i$$

$$y_s = (y_{i-1} - y_{i+1}) \pm D_i \cos \omega_i$$

Ecuación 4.18:
Localización de vértices en el eje x (Finney, 1998).

Ecuación 4.19:
Localización de vértices en el eje y (Finney, 1998).

Ecuación 4.20:
Corrección del ángulo diferencial en la dimensión x para considerar el efecto de la topografía (Finney, 1998).

Ecuación 4.21:
Corrección del ángulo diferencial en la dimensión y para considerar el efecto de la topografía (Finney, 1998).

Donde:

X_t , corresponde a la componente de la tasa de dispersión superficial para la dimensión x [m/min]

Y_t , corresponde a la componente de la tasa de dispersión superficial para la dimensión y [m/min]

a , b y c , corresponden a la dimensión de la elipse

x_s , corresponde al ángulo diferencial en la dimensión x horizontal [radianes]

y_s , corresponde al ángulo diferencial en la dimensión y horizontal [radianes]

θ , corresponde a la dirección de la velocidad máxima de propagación [radianes], que coincide con la dirección del vector viento y la pendiente

D_i , corresponde a la diferencia de la distancia superficial y horizontal del perímetro de incendio [m]

ω_i , corresponde al aspecto del terreno [radianes]

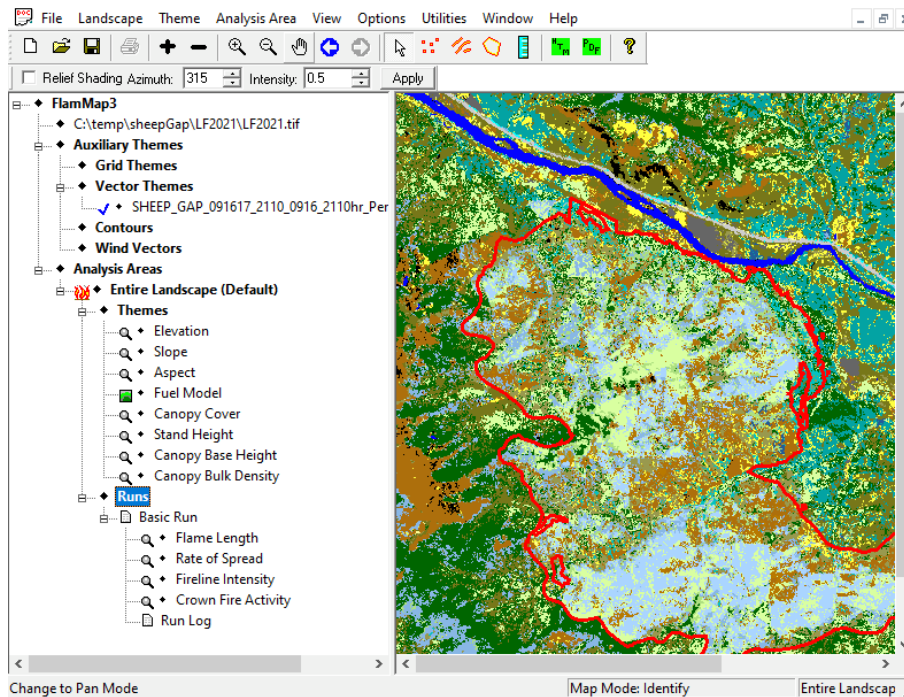


Figura 4.6: Interfaz de FlamMap. (Seli *et al.*, 2023).

4.3.3 Modelo Cell2Fire

Cell2fire es un simulador de propagación de incendios forestales de código abierto basado en celdas y desarrollado en Python y C++ para ser utilizado en computadoras portátiles o de escritorio. Fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Chile y fue publicado inicialmente el 16 de noviembre del año 2023. A diferencia de Prometheus y FlamMap, Cell2Fire no posee interfaz gráfica, sino que se utiliza por medio de la distribución GNU/Linux Ubuntu. Permite al usuario simular el crecimiento de un incendio a través de una grilla que representa un paisaje forestal real, usando variables ambientales como el tipo de combustible, características topográficas, puntos de ignición y variables meteorológicas (Pais *et al.*, 2021).

Cell2fire puede utilizar modelos de combustible ya existentes en sus simulaciones y ha tenido dos actualizaciones: C2F+K es una versión que implementa los modelos de combustible del sistema chileno Kitral; C2F-W es una segunda versión que implementa tanto al sistema Kitral como los modelos de combustible de Scott y Burgan (2005).

Este modelo funciona de forma que cada celda de la grilla que representa el terreno de simulación tiene variables asociadas (tipo de combustible, topografía, variables meteorológicas, etc.) que afectarán la forma en que se propaga un incendio. Si existe un foco de incendio en alguna celda, el modelo comienza a proyectar una elipse que crecerá hasta que termine el tiempo de simulación. Si el borde de la elipse toca el centro de una celda adyacente, se comienza a proyectar una nueva elipse en dicha celda. En la Figura 4.7 se muestra la validación realizada por Pais *et al.* (2021) al comparar los resultados de Cell2Fire y de Prometheus para el incendio Dogrib.

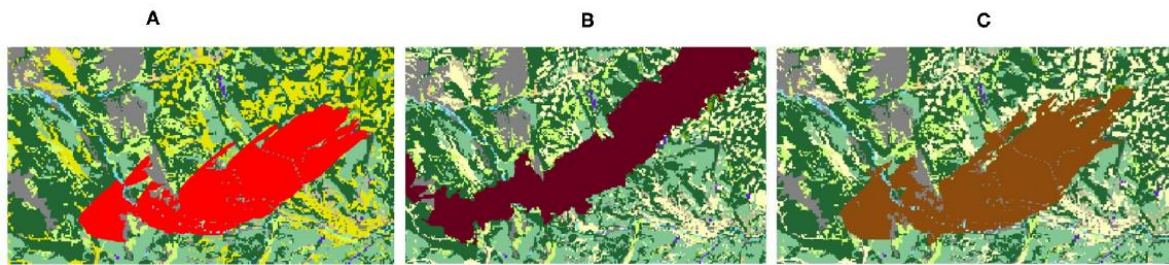


Figura 4.7: Validación de Cell2Fire. (Pais *et al.*, 2021).

A) Resultado del incendio Dogrib modelado en Prometheus. B) Avance real del incendio. C) Resultado de Cell2Fire.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe la metodología utilizada para lograr los objetivos planteados. Para ello, el capítulo se divide en 4 secciones que hacen referencia a cada objetivo específico, detallando las actividades que se deberán llevar a cabo para cada uno de ellos. En la Figura 5.1 se muestra un diagrama del flujo de trabajo propuesto.

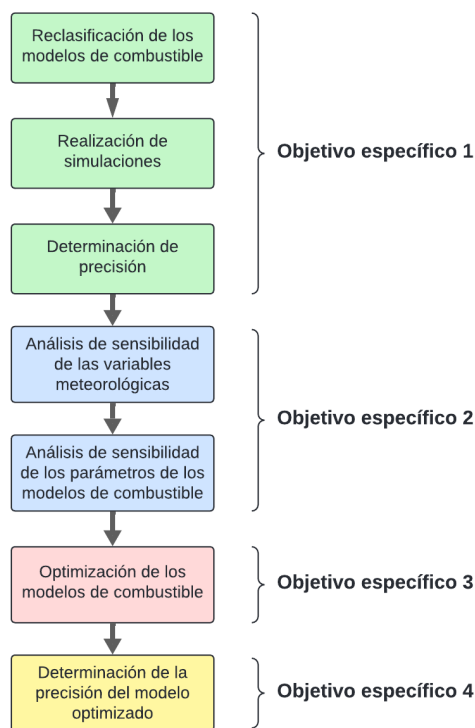


Figura 5.1: Diagrama de flujo del trabajo.

5.1 Selección de un modelo de propagación de incendios forestales

Para lograrlo, se trabajó con dos de los tres modelos de propagación mencionados en el capítulo 4.3: FlamMap y Prometheus, con la finalidad de seleccionar el más adecuado para continuar con el resto del trabajo. Para esto último, se definió el parámetro denominado “Puntuación-F1”, adaptado del trabajo de Carrasco *et al.* (2023), con el cual es posible conocer la precisión de los resultados obtenidos de cada modelo. A continuación, se describe de forma más detallada las actividades asociadas.

5.1.1 Asignación de modelos de combustible

Para ello, se hizo una revisión bibliográfica y cartográfica para conocer cuáles son los usos de suelo presentes en la Región de Valparaíso, esto con la finalidad de identificar el tipo de vegetación presente en la región y su distribución georreferenciada. Para ello, se utilizó el conjunto de datos del “Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de

la Tierra de la Región de Valparaíso (V)” de CONAF, disponible en el IDE del Ministerio de Agricultura¹. Luego, en base a lo anterior, se llevó a cabo una reclasificación de estos usos de suelo para asignarles alguno de los modelos de combustible utilizados por los modelos de propagación considerados. Para esto, se utilizó el formato de trabajo presentado por Hagelin y Cluzel (2016), donde se trabajó con los modelos Prometheus y FlamMap para representar un incendio ocurrido en Suecia. En dicho trabajo, a cada tipo de vegetación presente en el terreno se le asignó un valor para generar una imagen en formato “ráster” (o imagen de píxeles) para que coincidiera con los modelos de combustible, como se muestra en la Tabla 5.1. En este contexto, se utilizó el mismo formato de trabajo, como se muestra en la Tabla 5.2. Para generar la asignación, se utilizaron los softwares QGIS y Microsoft Excel.

Tabla 5.1: Reclasificación de la vegetación regional de Hagelin y Cluzel (2016) para coincidir con los modelos de combustible del sistema FBP. (Hagelin & Cluzel, 2016).

Original Vegetation Type	Raster Value	Model Vegetation Type
Pine Forests	3	Mature Jack / Lodgepole Pine
Conifers	6	Conifer Plantation
Cultivated Area, Grasslands	32	Standing Grass
Deciduous	50	Boreal Mixedwood – Green
Habitations	101	Non-Fuel
Open Water	102	Water
Wetlands	105	Vegetated Non-Fuel

Tabla 5.2: Formato propuesto para la asignación de modelos de combustible a los uso de suelos/vegetación de la Región de Valparaíso.

Uso de suelo/vegetación original	Valor ráster	Modelo de combustible
Uso 1	Valor 1	Modelo 1
Uso 2	Valor 2	Modelo 2
⋮	⋮	⋮
Uso n	Valor n	Modelo n

5.1.2 Realización de simulaciones

Para determinar la precisión de los modelos de propagación evaluados, se realizaron simulaciones de cuatro incendios ocurridos en la Región de Valparaíso. La selección de estos incendios se realizó considerando, por un lado, su extensión, es decir, aquellos con un mayor tamaño y, por consiguiente, mayores consecuencias. Por otro lado, se consideró también que exista la información necesaria para realizar la simulación y que esté disponible para su uso. Como se mencionó anteriormente, estas simulaciones se realizaron en los modelos Prometheus y FlamMap. La selección de estos dos modelos se fundamenta en que son de libre acceso, lo que facilita su utilización. La exclusión de Cell2Fire se debe a la aparición de problemas técnicos al momento de utilizarlo.

¹ <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/21/desastres/>

Para realizar estas simulaciones, se utilizó la información cartográfica del conjunto de datos “DEM Alos Palsar Región de Valparaíso” disponible en el Geoportal de Chile². Dicho conjunto de datos corresponde a un modelo de elevación digital de la Región de Valparaíso, el cuál es necesario para obtener los datos de altura sobre el nivel del mar, pendiente y aspecto requeridos por los modelos de propagación. Para la información de modelos de combustible, se utilizó la asignación hecha previamente. Ambos conjuntos de datos fueron trabajados dentro del software QGIS para adecuarlos al área que se va a simular.

Por último, la información sobre temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, precipitaciones y cobertura de nubes fue obtenida de los datos registrados en las estaciones meteorológicas cercanas a las áreas que se van a simular. Esta información se encuentra disponible dentro del sitio web de servicios climáticos de la Dirección Meteorológica de Chile³.

El proceso de uso de los modelos Prometheus y FlamMap se muestra representado en forma de diagrama de flujo en la Figura 5.2.

5.1.3 Determinación de la precisión

Para determinar la precisión de las simulaciones realizadas, se utilizó el índice denominado “*F1-Score*” o “Puntuación-F1”, adaptado del trabajo de Carrasco *et al.* (2023). Este índice considera tanto el área del incendio que fue representada correctamente por el resultado de la simulación, como el área del incendio que no fue representada y el área que el modelo consideró como afectada cuando en realidad no lo fue. El índice se denota como F_1 y se calcula como se muestra en la Ecuación 5.1.

$$F_1 = \frac{TP}{TP + 0,5 \times (FP + FN)}$$

Ecuación 5.1: Puntuación-F1

Donde:

F_1 , corresponde a al valor de precisión de la Puntuación-F1.

TP , corresponde al área interior del perímetro del incendio representada correctamente por el resultado de la simulación, en hectáreas (Positivos verdaderos).

FP , corresponde al área que el resultado del modelo consideró como afectada cuando en la realidad no lo fue, en hectáreas (Falsos positivos).

FN , corresponde al área que el modelo consideró como no afectada cuando en la realidad sí lo fue, en hectáreas (Falsos negativos).

Los valores de F_1 van de 0 a 1, donde 1 representa un 100% de precisión. Las variables TP , FP y FN serán calculadas utilizando las herramientas de geoprocso “Intersección” y “Diferencia simétrica” del software QGIS.

² <https://www.geoportal.cl/catalog>

³ <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoEmas>

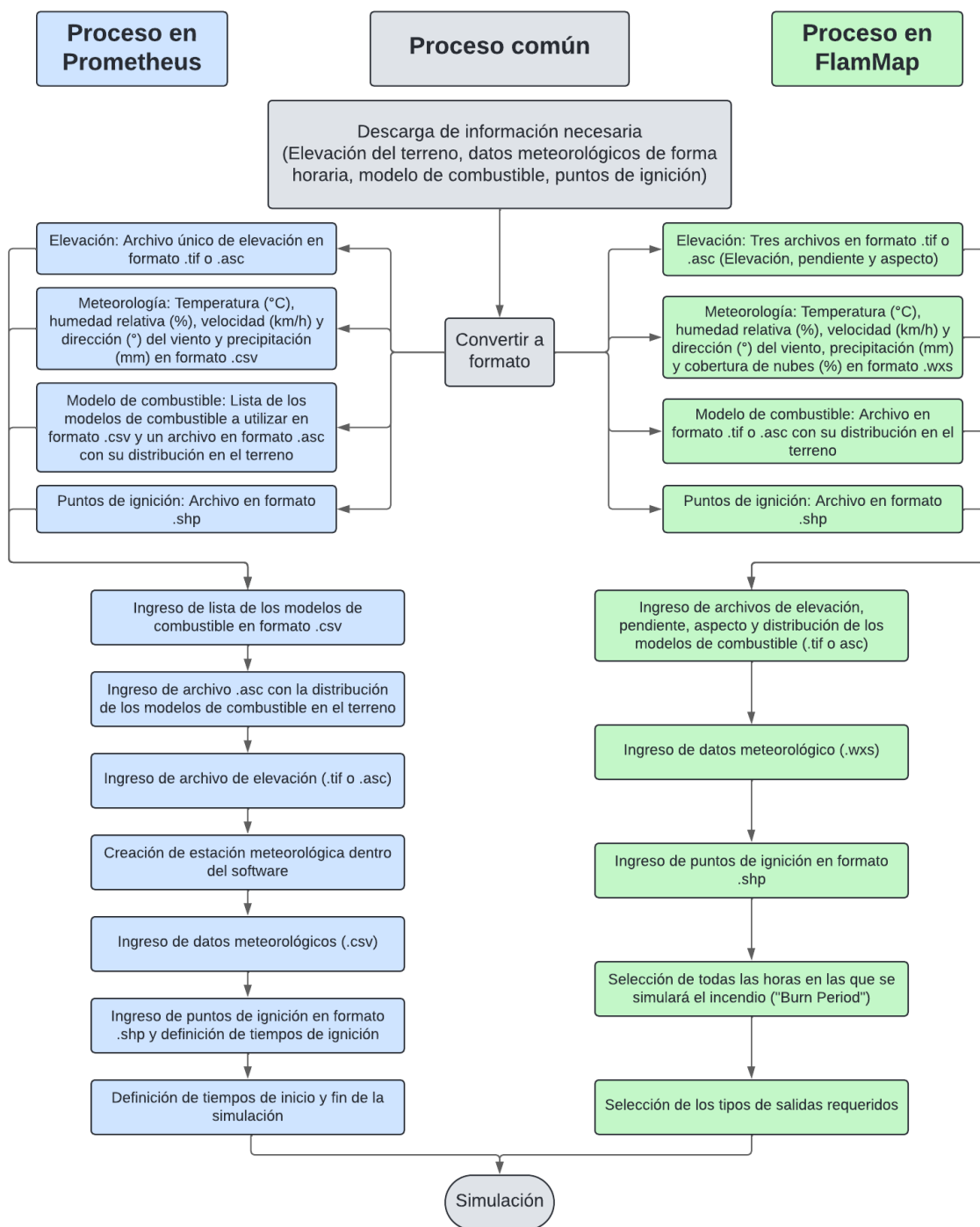


Figura 5.2: Diagrama de flujo del uso de los modelos Prometheus y FlamMap.

5.2 Análisis de sensibilidad

Para el segundo objetivo específico, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas y de los parámetros de los modelos de combustible sobre las salidas del modelo de propagación seleccionado en el primer objetivo específico.

5.2.1 Sensibilidad de las variables meteorológicas

Para el caso de las variables meteorológicas, se consideraron las variables temperatura, velocidad de viento y humedad relativa. Como variable de respuesta, se consideró el área total afectada en la simulación. De esta forma, se seleccionó un rango de variación para cada una de las variables para determinar su efecto sobre el área total afectada. Los datos obtenidos fueron procesados y analizados utilizando los softwares QGIS y Microsoft Excel.

Con la finalidad de poder comparar los resultados, se utilizó el método de análisis de sensibilidad local (ASL) (Acosta-Alvarado *et al.*, 2020). Este método considera la relación entre la variación de la variable de respuesta y la variación de la variable de entrada, normalizando este resultado al multiplicarlo por la relación entre el valor central de la variable de entrada y el valor de la variable de respuesta correspondiente (Ecuación 5.2).

Junto a lo anterior, para considerar un mayor análisis, se llevó a cabo un ajuste de las curvas experimentales resultantes para obtener sus funciones aproximadas. Con ellas, se calculó la derivada en los puntos considerados para tener una mejor visualización de los cambios en la sensibilidad de cada variable.

Las variables meteorológicas utilizadas fueron obtenidas de la estación meteorológica más cercana a la zona donde ocurrió el incendio que se está analizando. En este contexto, una de las más importantes corresponde a la estación “Rodelillo, Ad.”, que está ubicada en Ruta 66 S/N Rodelillo, Valparaíso, más específicamente, en la latitud $-33,065277$ y longitud $-71,556388$ a una altitud de 330 metros. Fue creada el 27 de julio del año 2010 y actualmente es la única estación meteorológica cercana a conjunto de comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana.

$$S_r^v = \frac{\Delta r}{\Delta v} \cdot \frac{v_c}{r_c}$$

Ecuación 5.2: Sensibilidad del resultado frente a una variable de entrada (Acosta-Alvarado *et al.*, 2020)

Donde:

S_r^v , corresponde a la sensibilidad del resultado frente a una variable de entrada. El subíndice r hace referencia al resultado (Área total o valor de F_1) y el superíndice v hace referencia a la variable (Temperatura, velocidad de viento, dirección de viento, humedad relativa o parámetro del modelo de combustible).

Δr , corresponde a la variación del resultado (Área total o valor de F_1).

Δv , corresponde a la variación de la variable de entrada (Temperatura, velocidad de viento, dirección de viento, humedad relativa y parámetro del modelo de combustible).

v_c , corresponde al valor central elegido para la variable de entrada.

r_c , corresponde al Valor del resultado asociado al valor central de la variable de entrada.

Cabe destacar que la sensibilidad normalizada puede tomar cualquier valor, ya sea positivo o negativo.

5.2.2 Sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible

Para el caso de los parámetros de los modelos de combustible, se realizó primeramente un análisis de sensibilidad preliminar, que consistió en utilizar el valor máximo y mínimo posible de cada uno de ellos para determinar los más sensibles y así realizar un análisis de sensibilidad más preciso sobre aquellos parámetros. Las variables de respuesta consideradas en este caso fueron tanto el área total afectada en la simulación y el valor del parámetro F_1 .

Luego de determinar los parámetros más sensibles, se estableció un rango de variación para cada uno de ellos con la finalidad de observar sus efectos sobre el área total afectada según la simulación. Al igual que en el caso de las variables meteorológicas, se utilizó el método del análisis de sensibilidad local para poder comparar los resultados de cada parámetro (Ecuación 5.2) y se realizó el ajuste de las curvas experimentales para obtener sus funciones aproximadas, con las cuales se calculó su derivada para una mejor visualización de los cambios en la sensibilidad. Los datos fueron procesados y analizados en los softwares QGIS y Excel.

5.3 Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso

Para este objetivo específico, se trabajó usando el escenario de simulación que tuviera más información disponible sobre el avance real del incendio. Así, la actividad consistió en la realización de varias iteraciones del mismo escenario de simulación utilizando distintas combinaciones de los parámetros más sensibles identificados en el análisis de sensibilidad, manteniendo el resto de los parámetros constantes y utilizando la información meteorológica real entregada por la estación “Rodelillo, Ad.”. El parámetro de evaluación utilizado fue la *Puntuación – F1* (Ecuación 5.1), para lo cual los resultados de las simulaciones fueron procesados y analizados en los softwares QGIS y Microsoft Excel. El análisis se enfocó en el modelo de combustible que tuviera una mayor cobertura en el terreno de simulación.

De esta forma, se definieron tres valores distintos en cada uno de los parámetros a considerar en las simulaciones, tomando en cuenta los valores máximos y mínimos posibles junto al valor central. Esto resultó en un total de 81 iteraciones, las cuales toman en cuenta todas las combinaciones posibles de estos parámetros. Así, se graficaron los resultados obtenidos y se analizó con mayores detalles las 5 iteraciones que obtuvieron valores de $F1$ más altos.

Por último, se realizó un análisis de regresión lineal para estudiar de mejor manera la relación entre los parámetros considerados y la Puntuación-F1, utilizando una función de la forma que se muestra en la Ecuación 5.3.

$$F_1 = \beta_0 + \beta_1 p_1 + \beta_2 p_2 + \dots + \beta_n p_n + \beta_{n+1} (p_1 * p_2) + \beta_{n+2} (p_1 * p_3) + \dots + \beta_{final} (p_{final}^2)$$

Ecuación 5.3: Función considerada para el análisis de regresión lineal.

Donde:

F_1 , corresponde a la Puntuación-F1

β_0 , corresponde al intercepto

β_i , corresponde a coeficientes que indican la influencia de cada término

p_i , corresponde a cada uno de los parámetros considerados

5.4 Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales

Para el cuarto objetivo específico se determinó la precisión del modelo ajustado en el objetivo anterior. Para ello, se volvió a utilizar el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024, esta vez considerando un tiempo de simulación mayor que en el caso anterior y utilizando los parámetros que mostraron resultados más precisos. De esta forma, se consideraron dos tiempos de simulación. Los resultados fueron comparados con el avance real en los tiempos considerados estimado a partir de imágenes satelitales en QGIS y la precisión fue determinada con la Puntuación-F1 de acuerdo con la Ecuación 5.1.

Junto a lo anterior, se realizaron simulaciones considerando los mismos dos tiempos de simulación, pero considerando los valores originales de los modelos de combustible. Estos resultados también fueron comparados con el avance real para determinar su Puntuación-F1 y evaluar la diferencia existente al usar los parámetros del modelo ajustado.

6 RESULTADOS

6.1 Selección de un modelo de propagación de incendios forestales

6.1.1 Asignación de los modelos de combustible

Para la asignación de los modelos de combustibles se utilizó la información del conjunto de datos “Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región de Valparaíso (V)” de CONAF. Dicho conjunto posee información cartográfica georreferenciada de los usos de suelo presentes en la Región de Valparaíso. Esta información fue ingresada y procesada en el software QGIS para conocer la distribución y presencia de los distintos tipos de vegetación en la región.

Paralelamente, se hizo uso de información bibliográfica para conocer los tipos de vegetación a los que corresponden los modelos de combustible utilizados por Prometheus y FlamMap. Para el caso de Prometheus, la información utilizada correspondió a los documentos “Ejemplos de tipos de combustible en el Sistema Canadiense de Predicción del Comportamiento de los Incendios Forestales (FBP)” (de Groot, 1993) y “Sistema canadiense de predicción del comportamiento de los incendios forestales (FBP): guía del usuario” (Hirsch, 1996). Para el caso de FlamMap, el documento utilizado fue “Modelos Estándar de Combustible para el Comportamiento del Fuego: Un conjunto completo para su uso con el modelo de propagación de incendios de superficie de Rothermel” (Scott & Burgan, 2005). Estos documentos entregan descripciones del tipo de vegetación al que corresponde cada modelo de combustible.

Finalmente, haciendo uso de los datos recopilados, se llevó a cabo la asignación de los modelos de combustible a los usos de suelo del “Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región de Valparaíso (V)” de CONAF siguiendo el formato presentado en la Tabla 5.2, donde a cada uso de suelo se le asignó un modelo de combustible y un valor numérico para ser utilizado en Prometheus y FlamMap. Esa asignación se llevó a cabo utilizando los softwares Microsoft Excel y QGIS. En este último software además se generaron las imágenes en formato ráster con los valores numéricos asignados necesarias para los modelos. La asignación completa se muestra en la Tabla 6.1 y Tabla 6.2 para Prometheus y FlamMap, respectivamente.

Tabla 6.1: Asignación de uso de suelo para Prometheus.

Uso de suelo / Tipo de vegetación	Valor ráster	Modelo de combustible Prometheus
Afloramientos Rocosos	299	Non-fuel
Bosque Nativo Adulto Abierto	209	M-1
Bosque Nativo Adulto Denso	212	M-4
Bosque Nativo Adulto Muy Abierto	209	M-1
Bosque Nativo Adulto Semidenso	207	C-7
Bosque Nativo Adulto-Renovo Abierto	209	M-1

Uso de suelo / Tipo de vegetación	Valor ráster	Modelo de combustible Prometheus
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Abierto	209	M-1
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Denso	212	M-4
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Semidenso	207	C-7
Bosque Nativo Renoval Abierto	209	M-1
Bosque Nativo Renoval Denso	212	M-4
Bosque Nativo Renoval Muy Abierto	209	M-1
Bosque Nativo Renoval Semidenso	207	C-7
Bosque Nativo-Plantación Abierto	209	M-1
Bosque Nativo-Plantación Denso	212	M-4
Bosque Nativo-Plantación Muy Abierto	209	M-1
Bosque Nativo-Plantación Semidenso	207	C-7
Cajas de Ríos	298	Non-fuel
Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales	299	Non-fuel
Derrumbe sin Vegetación	299	Non-fuel
Estepa Andina Central	213	O-1a
Formación de Suculentas	213	O-1a
Glaciares	299	Non-fuel
Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques	298	Non-fuel
Matorral Abierto	213	O-1a
Matorral Arborescente Abierto	213	O-1a
Matorral Arborescente Denso	211	M-3
Matorral Arborescente Escaso	213	O-1a
Matorral Arborescente Muy Abierto	213	O-1a
Matorral Arborescente Semidenso	211	M-3
Matorral con Suculentas Abierto	213	O-1a
Matorral con Suculentas Denso	211	M-3
Matorral con Suculentas Escaso	213	O-1a
Matorral con Suculentas Muy Abierto	213	O-1a
Matorral con Suculentas Semidenso	211	M-3
Matorral Denso	211	M-3
Matorral Escaso	213	O-1a
Matorral Muy Abierto	213	O-1a
Matorral Semidenso	211	M-3
Matorral-Pradera Abierto	213	O-1a
Matorral-Pradera Denso	213	O-1a
Matorral-Pradera Escaso	213	O-1a
Matorral-Pradera Muy Abierto	213	O-1a
Matorral-Pradera Semidenso	213	O-1a
Minería Industrial	299	Non-fuel

Uso de suelo / Tipo de vegetación	Valor ráster	Modelo de combustible Prometheus
Nieves	299	Non-fuel
Otros sin Vegetación	299	Non-fuel
Otros Terrenos Húmedos	298	Non-fuel
Plantación Adulta	203	C-3
Plantación con Exóticas Asilvestradas	203	C-3
Plantación Joven o Recién Cosechada	203	C-3
Playas y Dunas	299	Non-fuel
Pradera Perenne	213	O-1a
Praderas Anuales	213	O-1a
Ríos	298	Non-fuel
Rotación Cultivo-Pradera	213	O-1a
Terreno de Uso Agrícola	299	Non-fuel
Terrenos sobre el Límite Altitudinal de la Vegetación	299	Non-fuel
Vegas	298	Non-fuel
Vegetación Herbácea en Orillas de Ríos	299	Non-fuel

Tabla 6.2: Asignación de uso de suelo para FlamMap.

Uso de suelo / Tipo de vegetación	Valor ráster	Modelo de combustible FlamMap
Afloramientos Rocosos	99	NB9
Bosque Nativo Adulto Abierto	161	TU1
Bosque Nativo Adulto Denso	165	TU5
Bosque Nativo Adulto Muy Abierto	161	TU1
Bosque Nativo Adulto Semidenso	162	TU2
Bosque Nativo Adulto-Renovo Abierto	161	TU1
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Abierto	161	TU1
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Denso	165	TU5
Bosque Nativo con Exóticas Asilvestradas Semidenso	162	TU2
Bosque Nativo Renovo Abierto	161	TU1
Bosque Nativo Renovo Denso	165	TU5
Bosque Nativo Renovo Muy Abierto	161	TU1
Bosque Nativo Renovo Semidenso	162	TU2
Bosque Nativo-Plantación Abierto	161	TU1
Bosque Nativo-Plantación Denso	165	TU5
Bosque Nativo-Plantación Muy Abierto	161	TU1
Bosque Nativo-Plantación Semidenso	162	TU2
Cajas de Ríos	98	NB8
Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales	91	NB1
Derrumbe sin Vegetación	99	NB9
Estepa Andina Central	101	GR1

Uso de suelo / Tipo de vegetación	Valor ráster	Modelo de combustible FlamMap
Formación de Suculentas	141	SH1
Glaciares	92	NB2
Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques	98	NB8
Matorral Abierto	141	SH1
Matorral Arborescente Abierto	142	SH2
Matorral Arborescente Denso	147	SH7
Matorral Arborescente Escaso	141	SH1
Matorral Arborescente Muy Abierto	142	SH2
Matorral Arborescente Semidenso	145	SH5
Matorral con Suculentas Abierto	142	SH2
Matorral con Suculentas Denso	147	SH7
Matorral con Suculentas Escaso	141	SH1
Matorral con Suculentas Muy Abierto	142	SH2
Matorral con Suculentas Semidenso	145	SH5
Matorral Denso	147	SH7
Matorral Escaso	141	SH1
Matorral Muy Abierto	142	SH2
Matorral Semidenso	145	SH5
Matorral-Pradera Abierto	122	GS2
Matorral-Pradera Denso	124	GS4
Matorral-Pradera Escaso	122	GS2
Matorral-Pradera Muy Abierto	121	GS1
Matorral-Pradera Semidenso	122	GS2
Minería Industrial	91	NB1
Nieves	92	NB2
Otros sin Vegetación	99	NB9
Otros Terrenos Húmedos	98	NB8
Plantación Adulta	165	TU5
Plantación con Exóticas Asilvestradas	165	TU5
Plantación Joven o Recién Cosechada	164	TU4
Playas y Dunas	99	NB9
Pradera Perenne	102	GR2
Praderas Anuales	101	GR1
Ríos	98	NB8
Rotación Cultivo-Pradera	106	GR6
Terreno de Uso Agrícola	93	NB3
Terrenos sobre el Límite Altitudinal de la Vegetación	99	NB9
Vegas	98	NB8
Vegetación Herbácea en Orillas de Ríos	98	NB8

6.1.2 Realización de simulaciones

6.1.2.1 Incendios seleccionados

Según lo mencionado en el capítulo 5.1.2, se realizó una selección de cuatro incendios forestales para llevar a cabo las simulaciones con los modelos Prometheus y FlamMap. Estos cuatro incendios se resumen en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Incendios seleccionados para realizar las simulaciones.

Nombre del Incendio	Comuna	Punto de ignición (UTM)		Fecha de inicio	Hora de inicio
		E	N		
Lo Moscoso	Quilpué	280880	6335051	17-11-2016	15:00
Cuesta LLampaquillo	Casablanca	257949	6322365	15-11-2019	11:34
La Engorda	Valparaíso	270870	6328694	14-01-2021	20:37
Mega Incendio Valparaíso 2024	Valparaíso	266185	6324614	02-02-2024	12:35
		266843	6341193	02-02-2024	16:20

La información sobre fechas y horas de inicio y puntos de ignición de los incendios Lo Moscoso, Cuesta LLampaquillo y La Engorda se obtuvo de bases de datos de CONAF (IDE Minagri, s. f.). Para el caso del Mega Incendio Valparaíso 2024, esta información se estimó a partir de notas de prensa y consulta a testigos. La información meteorológica considerada para cada incendio se obtuvo de la estación meteorológica “Rodelillo, Ad.”. Esta información se encuentra adjunta en: Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6.

En la Figura 6.1 se muestra la representación cartográfica en el software QGIS del área total afectada por estos incendios forestales al término de cada uno. La información del área afectada por los incendios Lo Moscoso, Cuesta LLampaquillo y La Engorda fue obtenida de las mismas bases de datos de CONAF, mientras que la del Mega Incendio Valparaíso 2024 fue estimada en QGIS a partir de la “cicatriz de fuego” observada en imágenes del satélite Landsat. Adicionalmente, para un mayor análisis, se utilizó la información disponible en el Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS, por las siglas en inglés “*Fire Information for Resource Management System*”) de la NASA para obtener una estimación del área afectada por cada incendio a 12 horas de su inicio. Esta información se muestra en la Figura 6.2. Junto a lo anterior, el área afectada por cada uno de los incendios se resume en la Tabla 6.4.

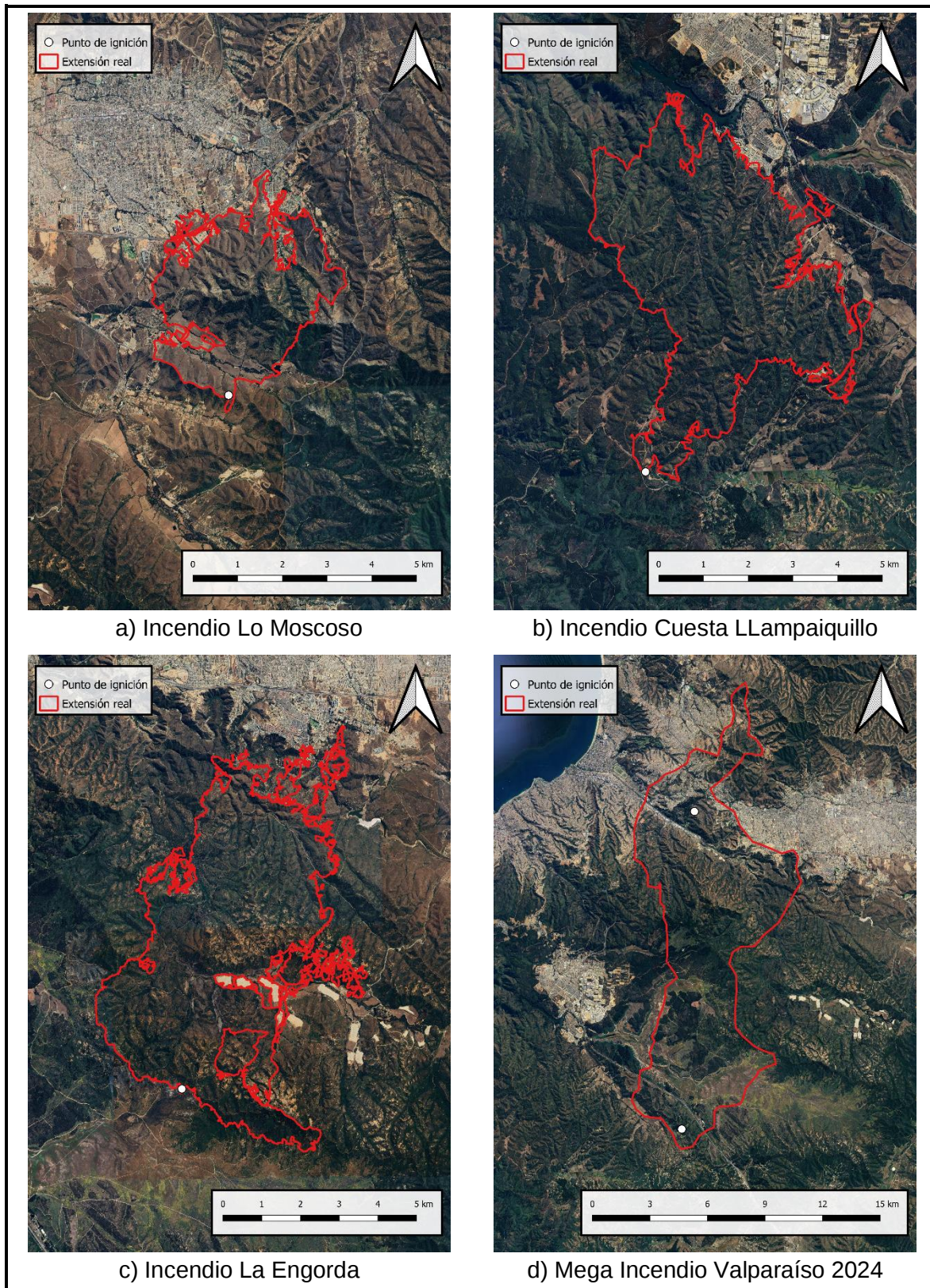


Figura 6.1: Área total afectada por los cuatro incendios seleccionados al término de cada uno.

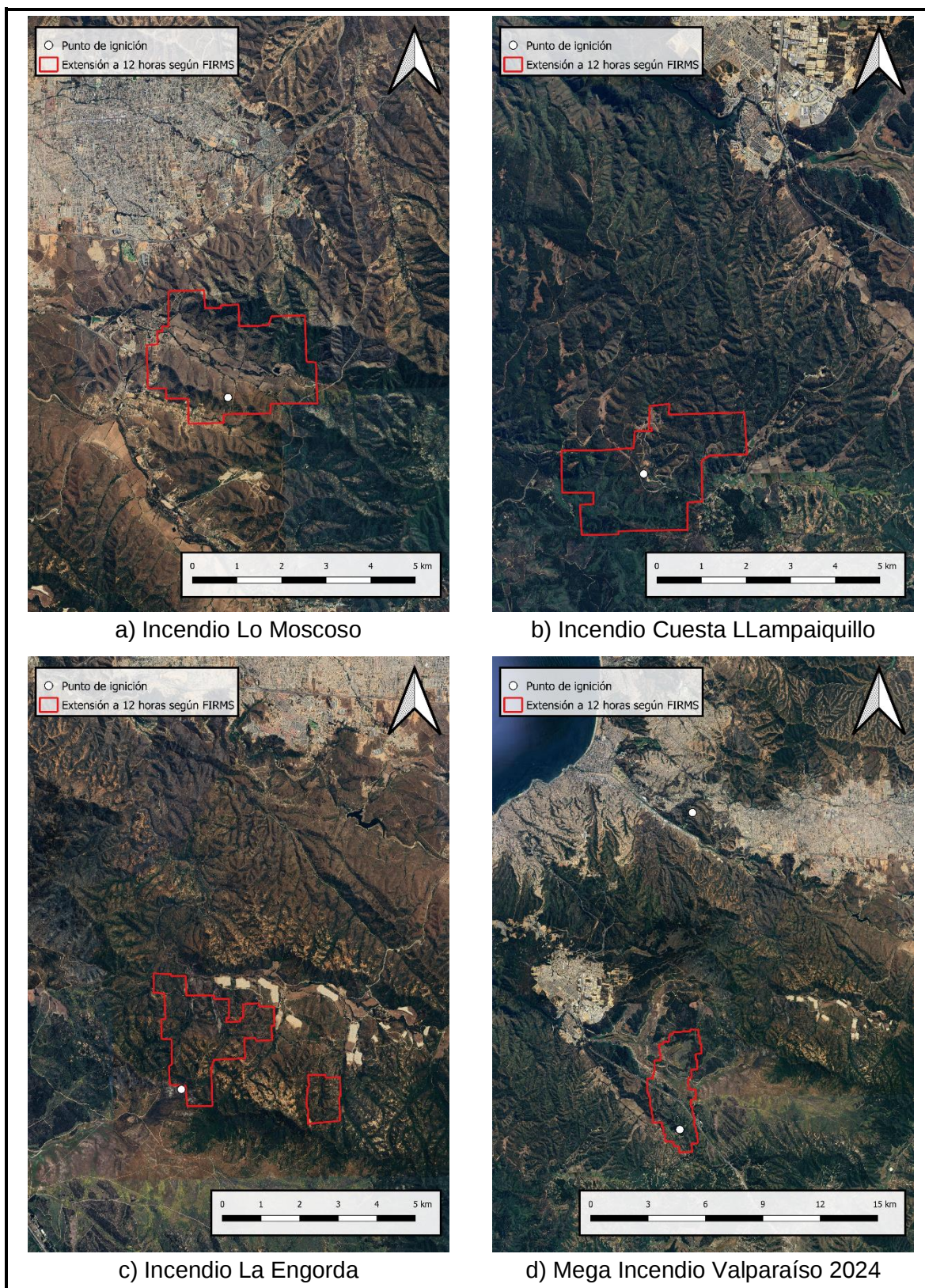


Figura 6.2: Extensión de los incendios a 12 horas de su inicio según información del FIRMS.

Tabla 6.4: Área afectada por los cuatro incendios seleccionados.

Nombre del incendio	Área afectada real [ha]	Área afectada a 12 horas según el FIRMS [ha]
Lo Moscoso	1.169	785
Cuesta LLampaiquillo	2.532	722
La Engorda	3.403	626
Mega Incendio Valparaíso 2024	10.364	1.208

6.1.2.2 Resultados en Prometheus

Para las simulaciones realizadas en Prometheus, se utilizó la configuración por defecto del modelo y se consideró un tiempo de simulación de 48 y 12 horas desde el inicio de cada incendio, teniendo un total de 8 resultados de simulación. En la Figura 6.3 y en la Figura 6.4 se resumen los resultados obtenidos en las simulaciones de 48 horas y 12 horas para cada incendio, respectivamente, y en la Tabla 6.5 se muestra el área afectada según la simulación.

Tabla 6.5: Área afectada por los cuatro incendios de acuerdo con simulaciones en Prometheus.

Nombre del Incendio	Área simulada en 12 horas [ha]	Área simulada en 48 horas [ha]
Lo Moscoso	2.049	4.884
Cuesta LLampaiquillo	3.310	10.282
La Engorda	260	8.975
Mega Incendio Valparaíso 2024	1.817	14.882

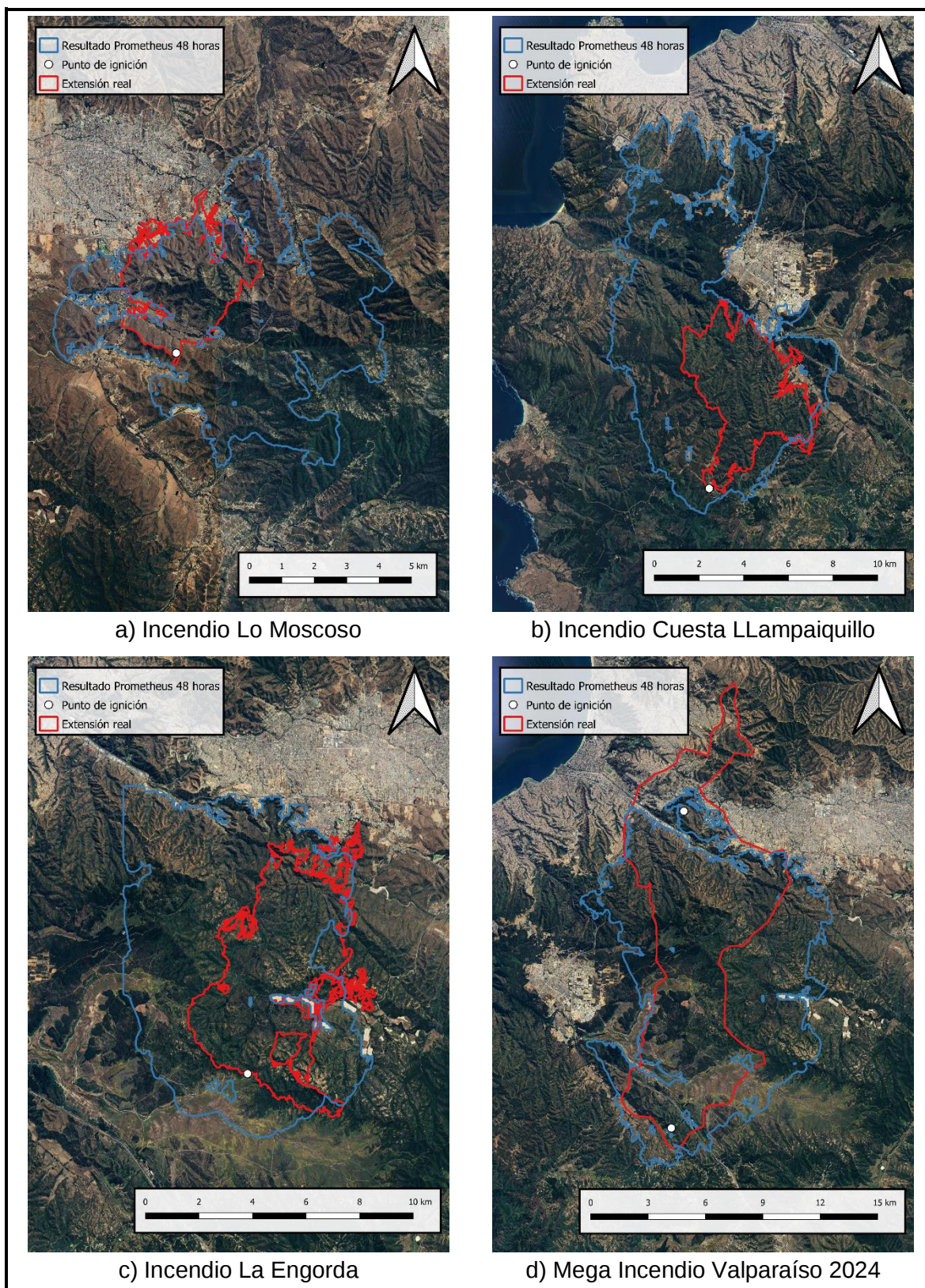


Figura 6.3: Extensión de los incendios simulados en Prometheus en 48 horas.

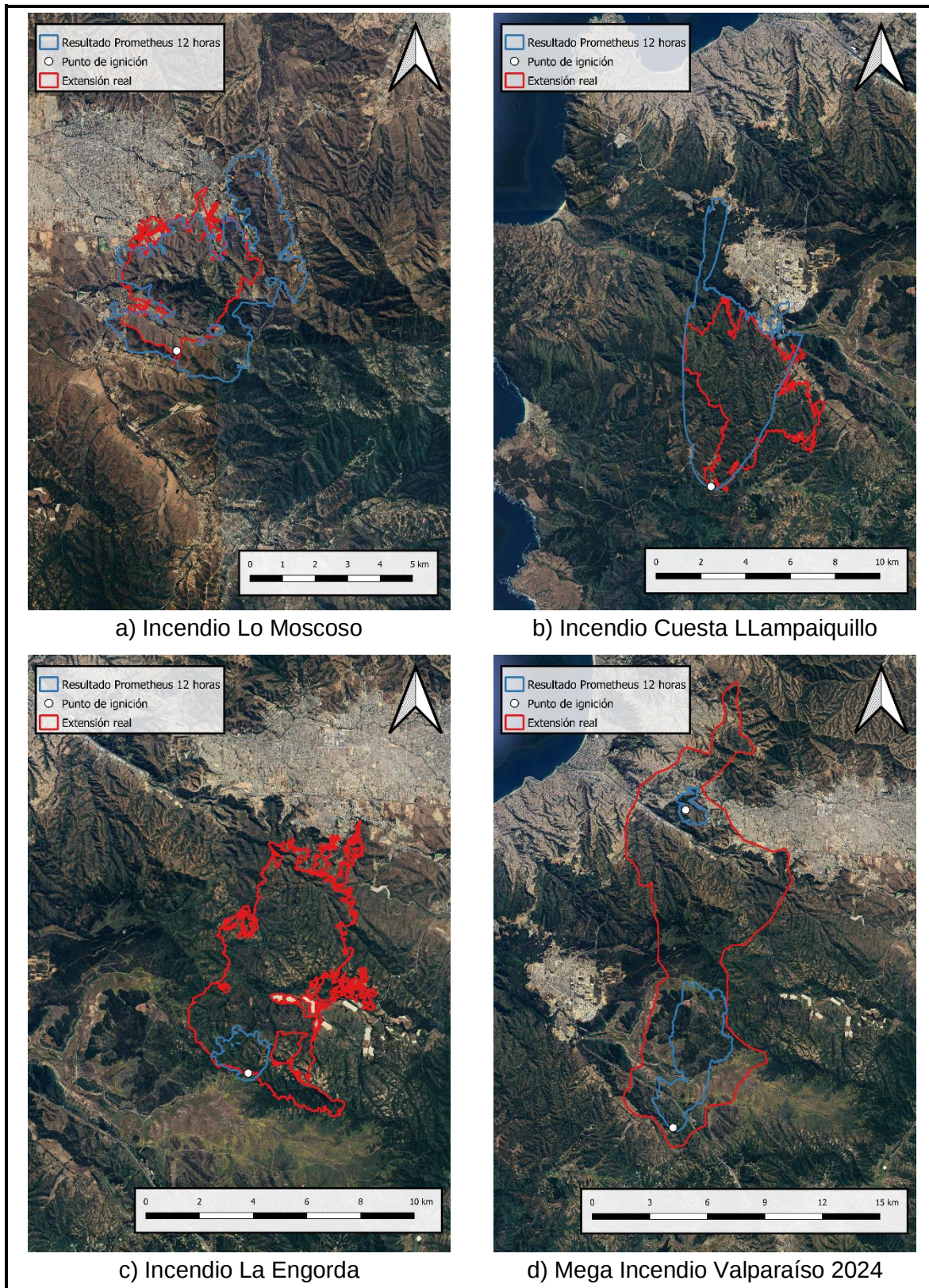


Figura 6.4: Extensión de los incendios simulados en Prometheus en 12 horas.

6.1.2.3 Resultados en FlamMap

Al igual que en el caso anterior, para las simulaciones en FlamMap se utilizó la configuración predeterminada del modelo y se utilizó un tiempo de simulación de 12 y 48 horas desde el inicio de los incendios, obteniendo también 8 resultados. Debido a la forma en que FlamMap procesa los datos, las horas de inicio de cada incendio se redondearon hacia abajo, es decir, sólo se consideró la hora de inicio sin los minutos. En la Figura 6.5 y en la Figura 6.6 se resumen los resultados obtenidos para cada incendio en las simulaciones de 48 horas y 12 horas, respectivamente, y en la Tabla 6.6 se muestra el área afectada según cada simulación.

Tabla 6.6: Área afectada por los cuatro incendios de acuerdo con simulaciones en FlamMap.

Nombre del Incendio	Área simulada en 12 horas [ha]	Área simulada en 48 horas [ha]
Lo Moscoso	116	218
Cuesta LLampaiquillo	238	1.714
La Engorda	43	1.289
Mega Incendio Valparaíso 2024	421	2.640



Figura 6.5: Extensión de los incendios simulados en FlamMap en 48 horas.

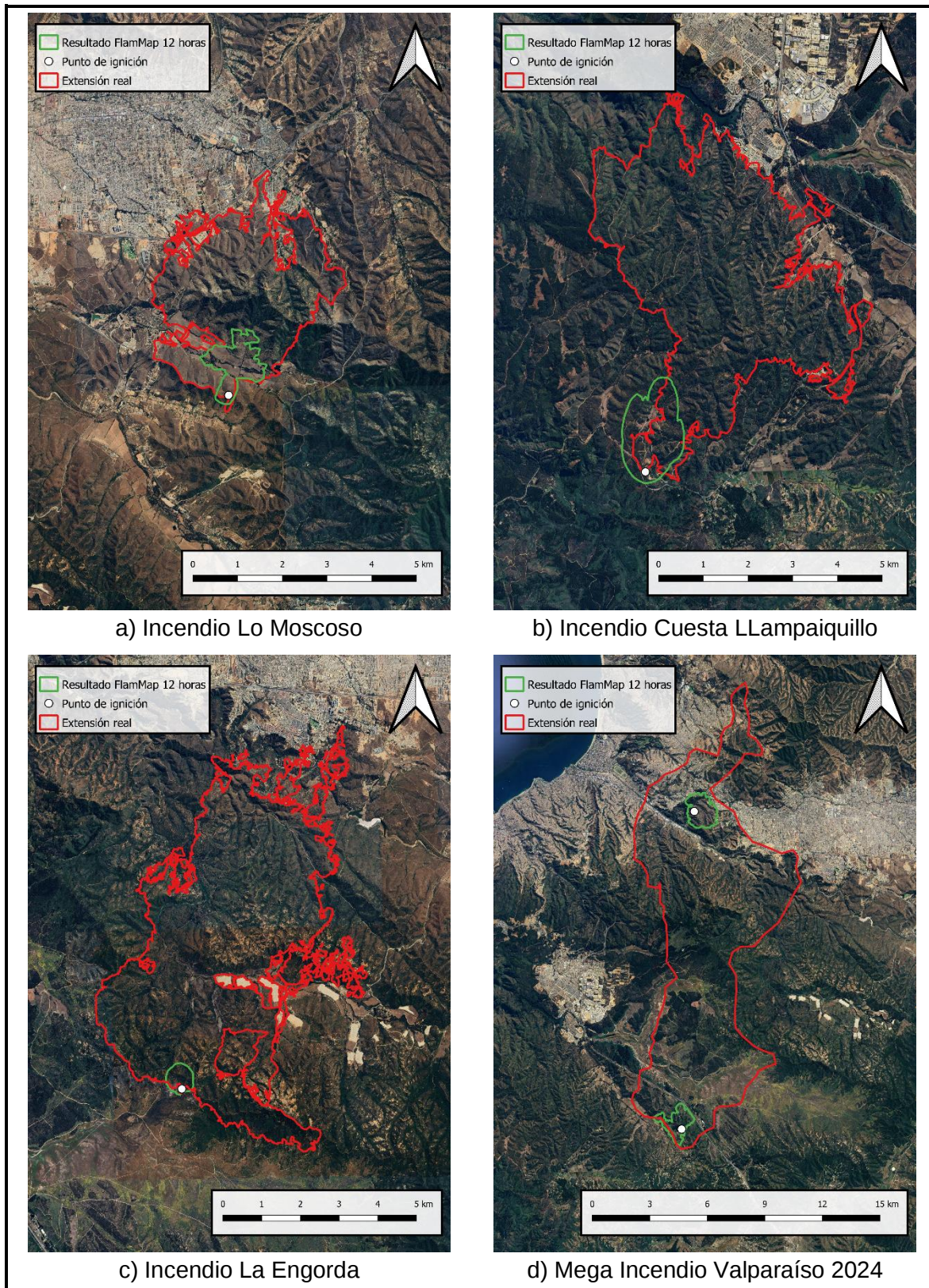


Figura 6.6: Extensión de los incendios simulados en FlamMap en 12 horas.

6.1.3 Determinación de la precisión

Como se mencionó anteriormente, para determinar la precisión de los modelos se utilizó la Ecuación 5.1 en cada uno de los resultados obtenidos. La determinación de los valores de TP, FP y FN se realizó por medio de las herramientas de geoprocso “Intersección” y “Diferencia simétrica” del software QGIS. En la Tabla 6.7 y en la Tabla 6.8 se resumen los resultados de Prometheus y FlamMap, respectivamente.

Los resultados están separados en las secciones “48 horas”, “12 horas” y “12 horas FIRMS”, cada una de las cuales contiene los resultados de TP, FP y FN en hectáreas y el valor de F1 expresado en porcentaje para cada uno de los incendios. Las secciones “48 horas” y “12 horas” hacen referencia a las simulaciones realizadas en 48 y 12 horas, respectivamente, tomando como punto de comparación el área real afectada por cada incendio (Figura 6.1) para determinar la precisión. La sección “12 horas FIRMS” también hace referencia a las simulaciones realizadas en 12 horas, pero tomando como punto de comparación el área afectada por cada incendio a 12 horas de su inicio según el FIRMS (Figura 6.2).

Tabla 6.7: Valores obtenidos para el cálculo del parámetro F1 en las simulaciones realizadas en Prometheus.

Nombre Incendio	Prometheus								
	48 Horas			12 Horas			12 Horas FIRMS		
	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]
Lo Moscoso	1.030,9	3.853,3	137,6	1.013,7	1.035,3	154,7	650,5	1.398,5	134,2
Cuesta Llampaiquillo	2.479,2	7.802,9	51,2	2.024,7	1.285,1	505,7	197,1	3.112,7	524,8
La Engorda	3.067,8	5.907,5	333,6	235,4	24,1	3.166,0	145,4	114,1	480,2
Mega Incendio Valparaíso 2024	8.283,1	6.599,1	118,0	1.816,7	0,3	8.547,4	552,9	1.264,1	655,2

Tabla 6.8: Valores obtenidos para el cálculo del parámetro F1 en las simulaciones realizadas en FlamMap.

Nombre Incendio	FlamMap								
	48 Horas			12 Horas			12 Horas FIRMS		
	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]
Lo Moscoso	151,6	66,4	1.016,8	110,2	5,9	1.058,2	116,2	0,0	668,6
Cuesta Llampaiquillo	682,2	1.032,2	1.848,2	128,4	110,1	2.401,9	154,0	84,5	567,8
La Engorda	1.048,9	240,6	2.352,6	36,2	7,2	3.365,2	31,9	11,5	593,7
Mega Incendio Valparaíso 2024	1.395,4	1.244,8	8.968,8	398,4	22,3	9.965,8	191,1	229,6	1.017,0

Junto a lo anterior, en la Figura 6.7 se muestra un gráfico con los resultados obtenidos del parámetro F1 en cada una de las simulaciones. Las barras de tonalidades azules representan los resultados de Prometheus y las barras de tonalidades verdes representan los resultados de FlamMap. En ambos casos, las barras más oscuras representan las

simulaciones hechas a 48 horas comparadas con la extensión real, las barras intermedias representan las simulaciones hechas a 12 horas comparadas con la extensión real y las barras más claras representan las simulaciones hechas a 12 horas comparadas con información del FIRMS.

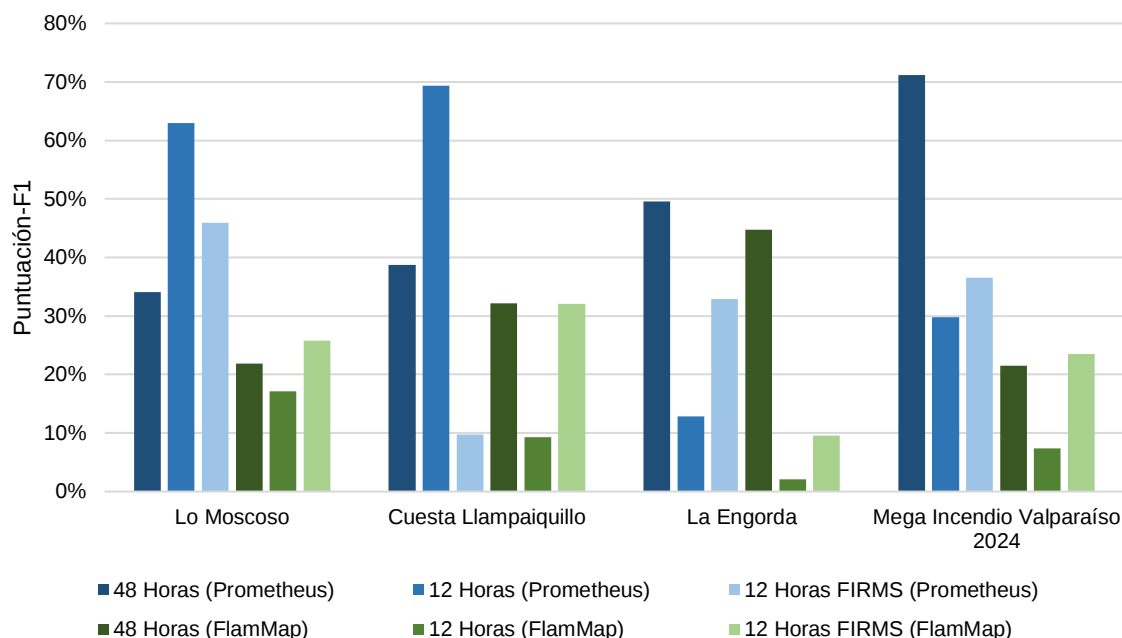


Figura 6.7: Valores F1 de las 24 simulaciones realizadas.

De acuerdo con estos resultados, se observa que en casi todas las simulaciones se obtuvo una mayor precisión con Prometheus, exceptuando el caso de la simulación del incendio Cuesta Llampaiquillo a 12 horas comparando con la información del FIRMS, donde la mayor precisión se obtuvo con FlamMap. Junto a ello, se ve que reducir el tiempo de simulación de 48 a 12 horas comparando los resultados con la extensión real aumentó la precisión de las simulaciones de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo con Prometheus, pero la redujo en los incendios La Engorda y el Mega Incendio Valparaíso 2024 con el mismo modelo. En el caso de FlamMap, la reducción del tiempo de simulación a 12 horas comparando los resultados con la información del FIRMS aumentó la precisión para el incendio Lo Moscoso y Mega Incendio Valparaíso 2024, mientras que para Cuesta Llampaiquillo se mantuvo prácticamente igual y para La Engorda disminuyó. Se observa también que las simulaciones, en FlamMap, con un tiempo de 12 horas, fueron las que obtuvieron una menor precisión (respecto de la extensión real), en cada uno de los incendios. En la Tabla 6.9 se resumen los valores obtenidos del parámetro F1 para todas las simulaciones junto a su promedio.

Tabla 6.9: Valor obtenido de F1 para todas las simulaciones realizadas.

Simulación	Incendio Lo Moscoso	Incendio Cuesta Llampaquillo	Incendio La Engorda	Mega Incendio Valparaíso 2024	Promedio
48 horas (Prometheus)	34%	39%	50%	71%	48%
12 horas (Prometheus)	63%	69%	13%	30%	44%
12 horas FIRMS (Prometheus)	46%	10%	33%	37%	31%
48 horas (FlamMap)	22%	32%	45%	21%	30%
12 horas (FlamMap)	17%	9%	2%	7%	9%
12 horas FIRMS (FlamMap)	26%	32%	10%	23%	23%

6.2 Análisis de sensibilidad

6.2.1 Sensibilidad de las variables meteorológicas

En el análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas se consideraron las variables velocidad del viento (km/h), temperatura (°C) y humedad relativa (%). Este análisis se llevó a cabo en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024, considerando un tiempo de simulación de 5 horas a partir del inicio del incendio. Se decidió utilizar 5 horas ya que a tiempos mayores el frente del incendio simulado comienza a llegar a territorio urbano (que no es combustible), lo que influye sobre los resultados y afectaría al análisis de sensibilidad. La variable de salida considerada corresponde al área final afectada expresada en hectáreas.

En primer lugar, se consideró un rango de valores con sentido físico para cada una de las variables. Así, se realizaron simulaciones manteniendo, alternadamente, cada variable en un valor constante durante el tiempo de simulación. El valor de la variable fue aumentado progresivamente en pasos iguales para observar su efecto sobre el resultado (para el resto de las variables se utilizó la información de la estación meteorológica “Rodelillo, Ad.” que se muestra en el Anexo 6). Luego, se observaron aquellos intervalos que mostraron una mayor sensibilidad en cada variable para realizar un análisis más preciso utilizando pasos más finos. Esto se resume en la Tabla 6.10. En el Anexo 7 se muestran las tablas con los resultados para cada una de las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad.

Estos resultados fueron graficados en Excel, en donde también se llevó a cabo un análisis para generar las curvas aproximadas que mejor se ajustaran a cada una de las variables. Para el caso de la velocidad de viento, la curva considerada fue una función logística, cuyos parámetros fueron estimados con el complemento “Solver” de Excel. Para la temperatura y humedad relativa la curva considerada fue una función exponencial, cuyos parámetros

fueron obtenidos con la opción de “agregar línea de tendencia” en Excel. Por último, utilizando las curvas ajustadas, se calculó la derivada en cada uno de los puntos considerados. Todo esto se muestra de forma gráfica en la Figura 6.8, Figura 6.9 y Figura 6.10, donde los puntos negros representan el área obtenida en las simulaciones y la línea negra representa la curva ajustada para la variable correspondiente, cuyo eje vertical es el izquierdo. La línea puntuada naranja representa la derivada de dicha curva y su eje vertical es el derecho.

Tabla 6.10: Rangos de valores considerados para el análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas.

Variable	Rango considerado	Paso	Intervalo más sensible	Paso en el intervalo más sensible
Velocidad de viento [km/h]	[10 – 100]	10	[30 – 50]	2
Temperatura [°C]	[5 – 50]	5	[30 – 50]	2
Humedad relativa [%]	[0 – 100]	10	[0 – 20]	2

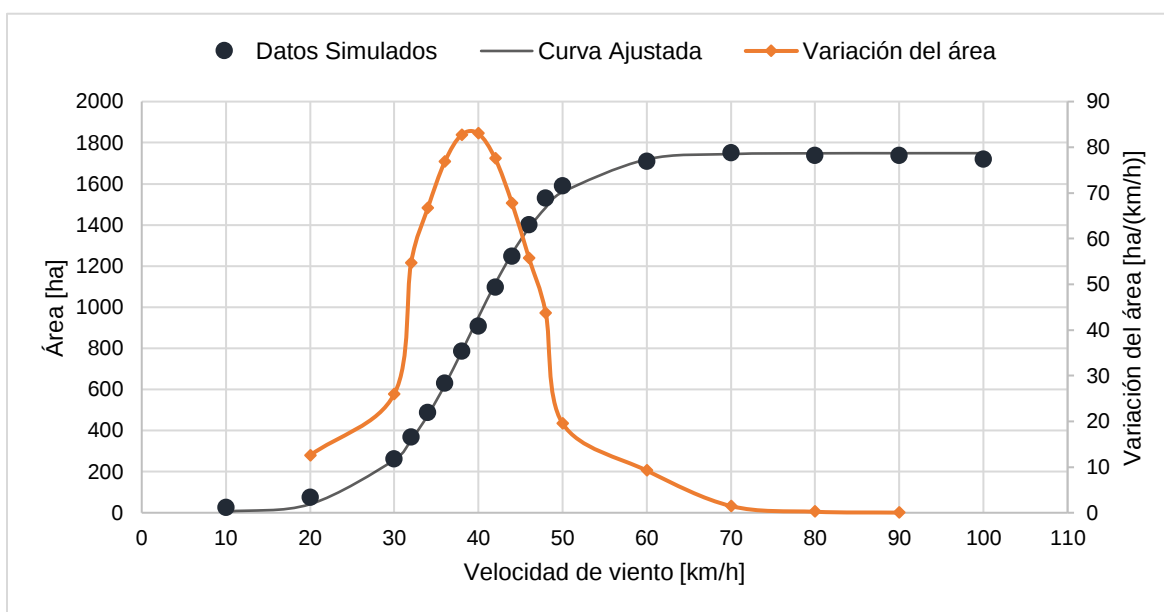


Figura 6.8: Efecto de la velocidad de viento sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024

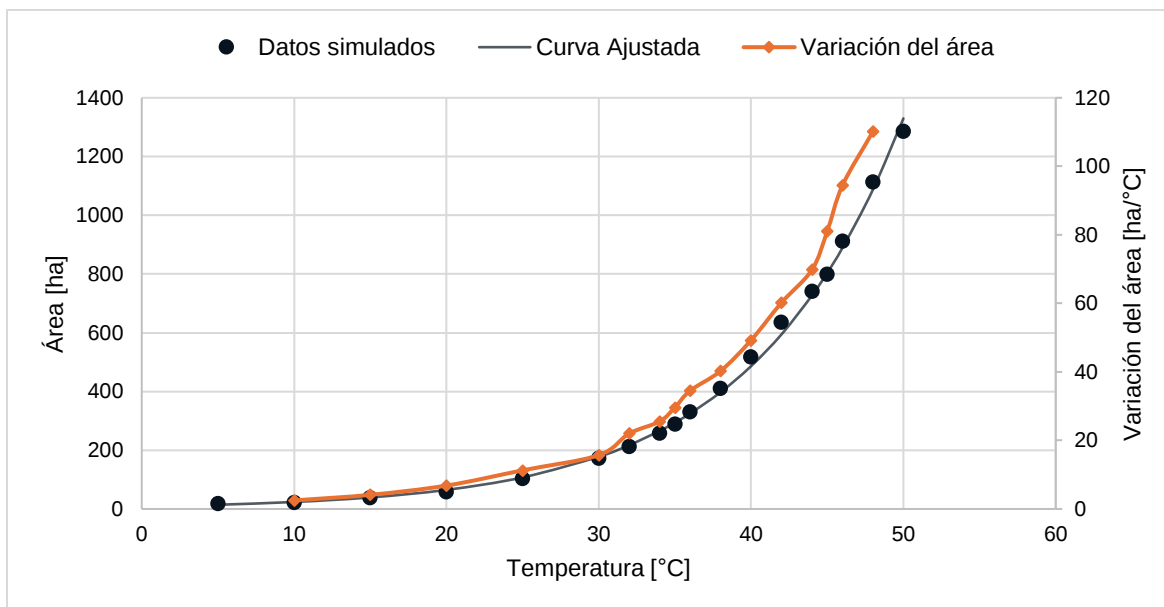


Figura 6.9: Efecto de la temperatura sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

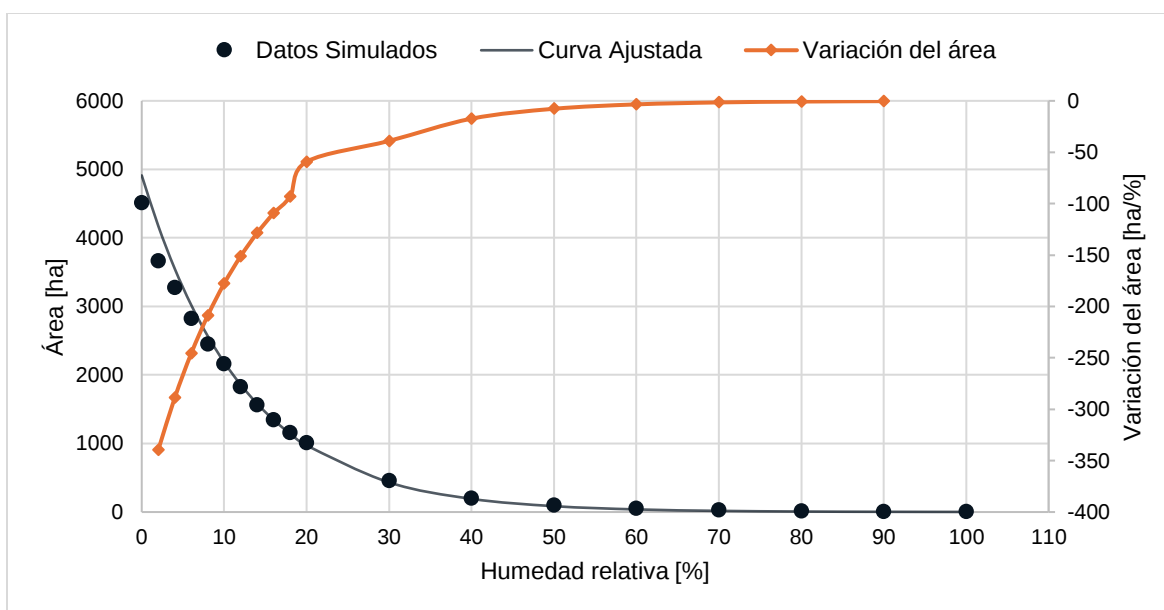


Figura 6.10: Efecto de la humedad relativa sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

La Ecuación 6.1, Ecuación 6.2 y Ecuación 5.3 representan las funciones de las curvas ajustadas para el efecto de las variables velocidad de viento, temperatura y humedad relativa sobre el área total afectada, respectivamente.

$$A(v) = 1748,99 * \frac{1 - e^{-v/5,168}}{1 + 1925,413 * e^{-v/5,168}}$$

$$A(T) = 8,6942 * e^{0,1006*T}$$

$$A(H) = 4911,6 * e^{-0,081*H}$$

Donde:

A , corresponde al área total afectada [ha]

v , corresponde a la velocidad del viento [km/h]

T , corresponde a la temperatura [°C]

H , corresponde a la humedad relativa [%]

Ecuación 6.1: Función ajustada del efecto de la velocidad del viento sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Ecuación 6.2: Función ajustada del efecto de la temperatura sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Ecuación 6.3: Función ajustada del efecto de la humedad relativa sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

De acuerdo con lo observado en los gráficos obtenidos, es posible constatar que cada una de las variables meteorológicas posee un rango de valores en el cual su sensibilidad es mayor. Para el caso de la velocidad de viento, esto ocurre aproximadamente entre los 30 y 50 kilómetros por hora, donde el valor de la derivada alcanza su punto máximo, como puede observarse en la Figura 6.8. Luego, la sensibilidad comienza a disminuir, llegando a ser mínima a velocidades de viento mayores a 60 kilómetros por hora, por lo que su efecto sobre el área final deja de ser importante.

Para el caso de la temperatura, se puede observar un comportamiento exponencial, donde la derivada tiene valores bajos a temperaturas menores a 30 °C aproximadamente, lo que implica una baja sensibilidad. Luego de dicho punto, se ve que la derivada comienza a tener valores cada vez mayores, lo que significa que cambios pequeños en la temperatura provocan grandes variaciones sobre el área final.

En el caso de la humedad relativa, es posible ver un comportamiento exponencial negativo, donde a valores bajos de humedad relativa (menor a 25% aproximadamente) la derivada tiene magnitudes altas, lo que quiere decir que un bajo aumento de la humedad relativa implica una gran disminución sobre el área final (alta sensibilidad). Luego, a valores mayores a 30%, la derivada tiende a cero, lo que implica cambios mínimos sobre el área final frente a variaciones de la humedad relativa (baja sensibilidad).

La Figura 6.11 muestra el gráfico de sensibilidad normalizada de las variables velocidad de viento, temperatura y humedad relativa. En el caso de la velocidad de viento es posible observar que la sensibilidad es máxima en valores cercanos a los 30 kilómetros por hora para luego disminuir hasta llevar a valores cercanos a 0. Para el caso de la temperatura, se puede ver un aumento sostenido de la sensibilidad normalizada, alcanzando un valor máximo en valores cercanos a los 45 °C. Por último, para el caso de la humedad relativa,

se decidió analizar su sensibilidad normalizada solo a valores menores a 50%, ya que a valores mayores las simulaciones entregaron áreas muy pequeñas alejadas de la realidad. En este gráfico se observa una disminución sostenida que alcanza un valor mínimo a un 50% de humedad relativa.

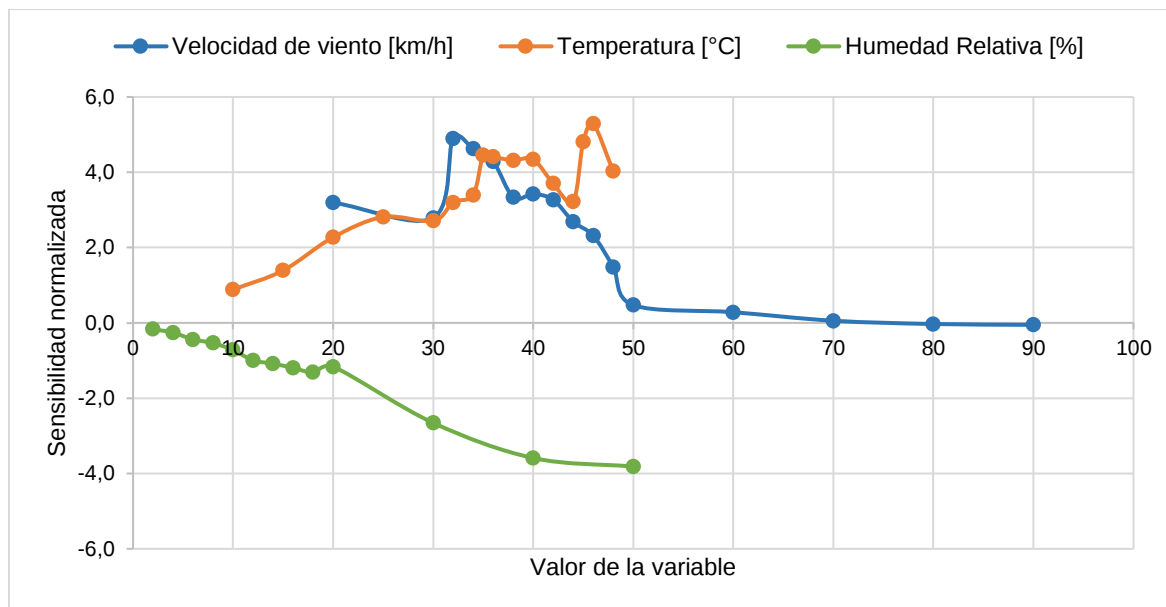


Figura 6.11: Sensibilidad normalizada de las variables meteorológicas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

6.2.2 Sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible

6.2.2.1 Análisis de sensibilidad preliminar

Para el análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible se comenzó identificando los modelos de combustible presentes en los escenarios de simulación de los cuatro incendios considerados (Tabla 6.11). Luego, se identificó el modelo de combustible que ocupaba la mayor superficie en cada uno de los escenarios para así enfocar en él un análisis de sensibilidad preliminar que ayudara a determinar los parámetros más sensibles (Tabla 6.12). De esta forma, se identificó que en el escenario de simulación del incendio Lo Moscoso el modelo con mayor cobertura del terreno corresponde al M-1 con un 32,81%, en el escenario del incendio La Engorda fue el modelo M-4 con un 23,24% y en los escenarios del incendio Cuesta Llampaiquillo y del Mega Incendio de Valparaíso 2024 fue el modelo C-3 con un 34,38% y 26,90%, respectivamente (Tabla 6.13).

Tabla 6.11: Modelos de combustible identificados en los cuatro escenarios de simulación junto a sus parámetros.

Combustible		a	b	c	q	BUlo	Max BE	CBH [m]	TH [m]	CFL [kg/m ²]
C-3		110	0,0444	3	0,75	62	1,261	8	18	1,15
C-7		45	0,0305	2	0,85	106	1,134	10	20	0,5
M-1	C-2	110	0,0282	1,5	0,8	50	1,25	6	13	0,8
	D-1	30	0,0232	1,6						
M-3	M-3	120	0,0572	1,4	0,8	50	1,25	6	10	0,8
	D-1	30	0,0232	1,6						
M-4	M-4	100	0,0404	1,48	0,8	50	1,25	6	10	0,8
	D-1	30	0,0232	1,6						
O-1a		190	0,031	1,4	1	1	1	0	0	0
Valor máximo		190	0,0572	3	1	106	1,261	10	20	1,15
Valor mínimo		30	0,0232	1,4	0,75	1	1	0	0	0

Tabla 6.12: Cobertura de modelos de combustible en cada escenario de simulación.

Modelo de combustible	Cobertura [ha]			
	Lo Moscoso	Cuesta Llampaiquillo	La Engorda	Mega Incendio Valparaíso 2024
C-3	3.128,55	15.038,60	2.848,87	12.178,59
C-7	6.357,79	7.672,60	3.185,67	9.995,94
M-1	7.011,09	8.874,19	3.300,24	8.906,82
M-3	2.362,80	1.451,19	679,40	2.682,19
M-4	788,84	9.295,88	3.485,18	7.511,55
O-1a	1.719,15	1.408,68	1.499,67	4.003,39

Tabla 6.13: Modelos de combustible con mayor y menor cobertura en cada escenario de simulación.

Incendio	Modelo de combustible con mayor cobertura	Porcentaje de mayor cobertura	Modelo de combustible con menor cobertura	Porcentaje de menor cobertura
Lo Moscoso	M-1	32,81%	M-4	3,69%
Cuesta Llampaiquillo	C-3	34,38%	O-1a	3,22%
La Engorda	M-4	23,24%	M-3	4,53%
Mega Incendio Valparaíso 2024	C-3	26,90%	M-3	5,92%

De esta forma, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad preliminar para los escenarios de simulación de Lo Moscoso, Cuesta Llampaiquillo y Mega Incendio de Valparaíso 2024. El escenario de La Engorda tuvo que ser excluido de este análisis debido a que se presentó un fallo dentro de Prometheus que no permitió modificar los parámetros del modelo de

combustible M-4. Para esto, se consideró como variable de entrada cada uno de los parámetros de los modelos de combustible y como variable de salida el área total afectada y la Puntuación-F1 de cada escenario de simulación.

El análisis consistió en realizar simulaciones modificando cada uno de los parámetros de la Tabla 6.11 para los modelos M-1 y C-3 de forma que se utilizara el valor máximo y mínimo, teniendo así dos simulaciones por cada parámetro y por cada modelo de combustible. Para los parámetros a y b del modelo de combustible M-1, como su valor por defecto ya es el mínimo posible, el valor mínimo se consideró como la mitad del valor original. Para el valor máximo de los parámetros c, Max BE y CFL del modelo de combustible C-3, se utilizó un valor cuya distancia al valor central fuera la misma que para el valor mínimo; y para el valor mínimo del parámetro q se utilizó un valor cuya distancia al valor central fuera la misma que para el valor máximo. Los valores utilizados se muestran en la Tabla 6.14, Tabla 6.15 y Tabla 6.16 para los escenarios Lo Moscoso, Cuesta Llampaiquillo y Mega Incendio Valparaíso 2024. Finalmente, los resultados obtenidos fueron normalizados según la Ecuación 5.2 y graficados para poder compararlos.

Tabla 6.14: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Lo Moscoso.

Lo Moscoso		a	b	c	q	BUlo	Max BE	CBH	TH	CFL
M-1	C-2	110	0,0282	1,5	0,8	50	1,25	6	13	0,8
	D-1	30	0,0232	1,6						
Valor máximo		190	0,0572	3	1	106	1,261	10	20	1,15
Valor mínimo		15	0,0116	1,4	0,75	1	1	0	0	0

Tabla 6.15: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Cuesta Llampaiquillo.

Cuesta Llampaiquillo	a	b	c	q	BUlo	Max BE	CBH	TH	CFL
C-3	110	0,0444	3	0,75	62	1,261	8	18	1,15
Valor máximo	190	0,0572	4,6	1	106	1,522	10	20	2,3
Valor mínimo	30	0,0232	1,4	0,5	1	1	0	0	0

Tabla 6.16: Valores considerados para el análisis de sensibilidad preliminar del escenario Mega Incendio Valparaíso 2024.

Mega Incendio Valparaíso 2024	a	b	c	q	BUlo	Max BE	CBH	TH	CFL
C-3	110	0,0444	3	0,75	62	1,261	8	18	1,15
Valor máximo	190	0,0572	4,6	1	106	1,522	10	20	2,3
Valor mínimo	30	0,0232	1,4	0,5	1	1	0	0	0

La Figura 6.12, Figura 6.13 y Figura 6.14 muestran los resultados graficados del análisis de sensibilidad preliminar de los parámetros de los modelos de combustible para los escenarios Lo Moscoso, Cuesta Llampaiquillo y Mega Incendio Valparaíso 2024, respectivamente. Los colores de las barras representan el resultado de sensibilidad de los

valores máximos y mínimos respecto al área total afectada y a la Puntuación-F1, teniendo así cuatro colores en cada gráfico.

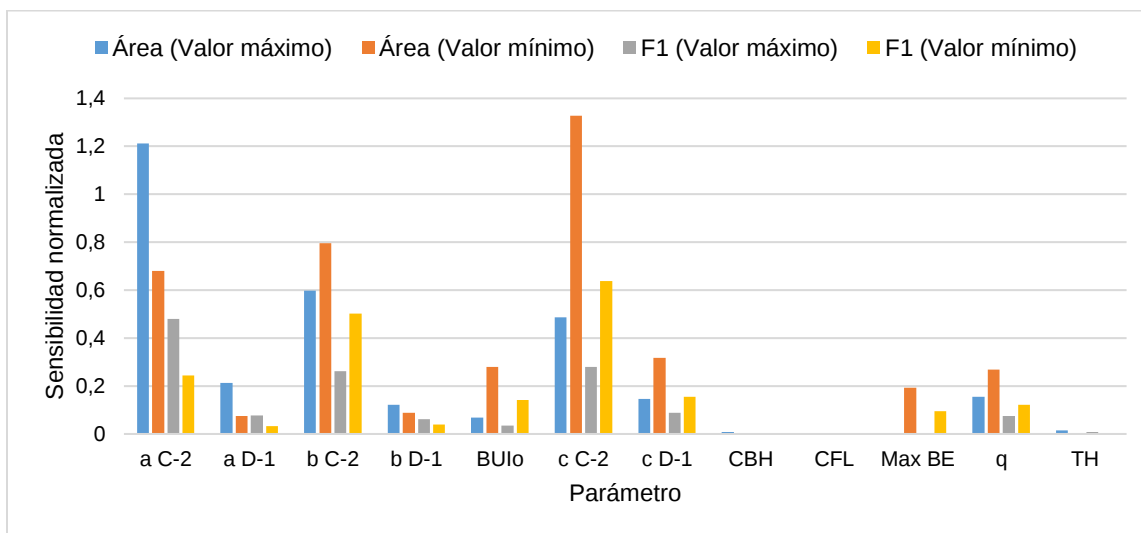


Figura 6.12: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del incendio Lo Moscoso.

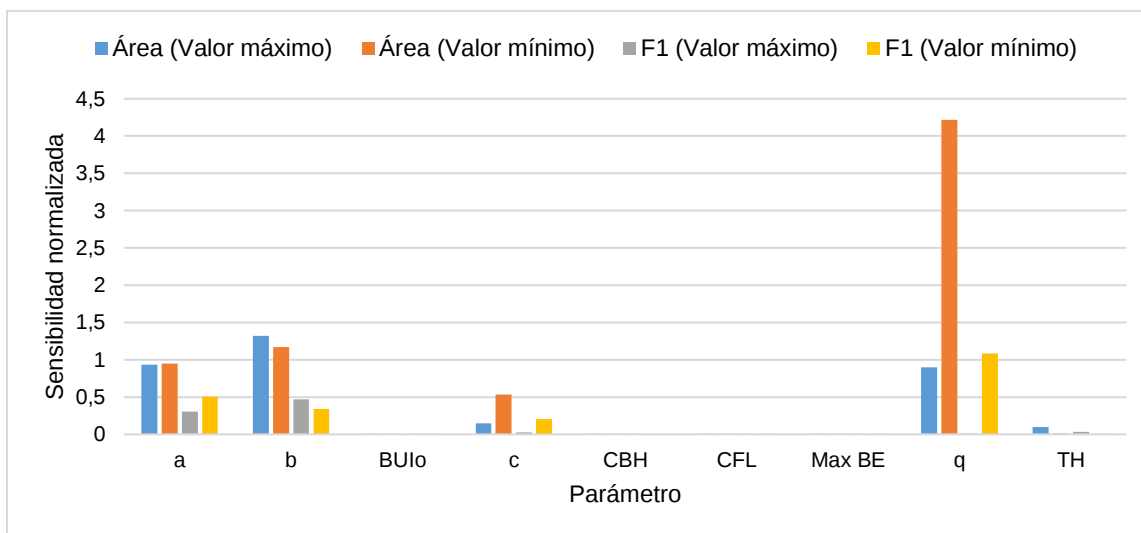


Figura 6.13: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del incendio Cuesta Llampaiquillo.

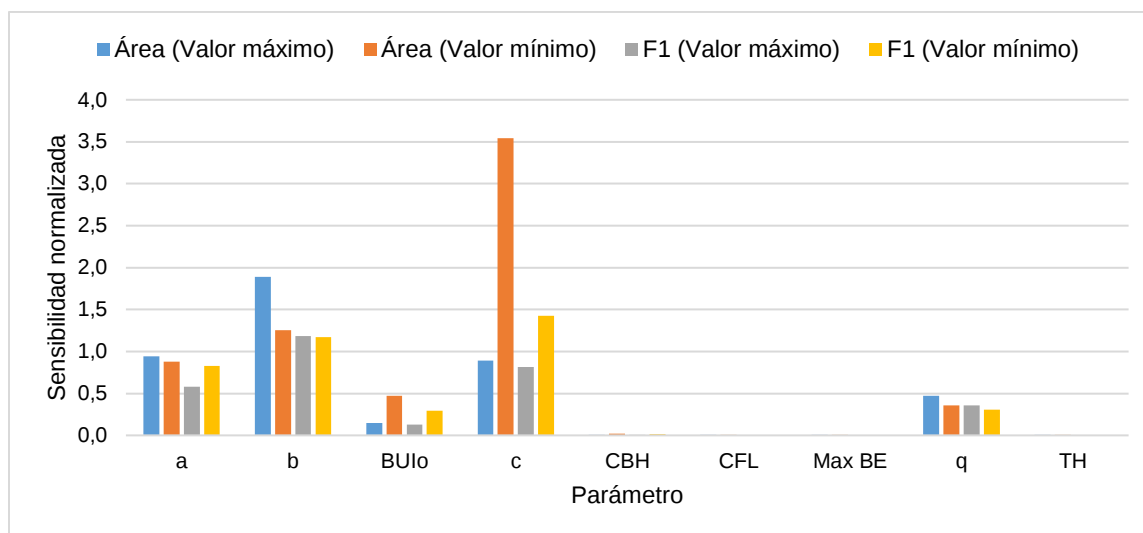


Figura 6.14: Análisis de sensibilidad preliminar para los parámetros de combustible en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Con estos resultados, es posible observar que las variaciones de los parámetros CBH, CFL y TH tuvieron efectos mínimos sobre los resultados de las simulaciones. En el caso del parámetro Max BE ocurre lo mismo exceptuando el escenario de Lo Moscoso, donde es posible ver que el uso del valor mínimo generó cambios más significativos. El parámetro BUlo tuvo una pequeña significancia en los escenarios Lo Moscoso y Mega Incendio de Valparaíso 2024, pero en el escenario de Cuesta Llampaiquillo su efecto fue mínimo. Así, es importante destacar los parámetros a, b, c y q, que tuvieron un efecto más significativo sobre el área en prácticamente todas las simulaciones, exceptuando algunos casos como puede ser el de los parámetros c y q en el escenario de Cuesta Llampaiquillo al considerar el valor mínimo respecto al resultado de F1.

Por todo esto, se decidió que los parámetros a, b, c y q son los más sensibles y que cuya variación tiene un efecto mayor sobre las variables de salida del modelo. Por ello, lo siguiente fue realizar un análisis de sensibilidad más detallado enfocándose en estos cuatro parámetros.

6.2.2.2 Análisis de sensibilidad a los parámetros más sensibles

Al igual que para el caso de las variables meteorológicas, el análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros de combustible más sensibles se llevó a cabo en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024, considerando un tiempo de simulación de 5 horas a partir del inicio del incendio. La variable de salida considerada corresponde al área final afectada expresada en hectáreas.

En primer lugar, se consideró un rango desde el valor mínimo al máximo de cada uno de los parámetros. Así, se realizaron simulaciones manteniendo, alternadamente, cada variable en un valor constante durante el tiempo de simulación, el cuál fue aumentado progresivamente en pasos iguales para observar su efecto sobre el resultado. Esto se

resume en la Tabla 6.17. En el Anexo 8 se muestran las tablas con los resultados para cada una de las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad.

Estos resultados fueron graficados en Excel, en donde también se llevó a cabo un análisis para generar las curvas aproximadas que mejor se ajustaran a cada una de las variables. Para el caso del parámetro a y el parámetro q se consideró una función lineal; para el caso del parámetro b se consideró una función polinómica de segundo grado; y para el caso del parámetro c se consideró una función potencial. Se eligieron estas funciones ya que fueron aquellas que presentaron una mayor correlación R^2 se acuerdo con la opción de “agregar línea de tendencia” en Excel. Por último, utilizando las curvas ajustadas, se calculó la derivada en cada uno de los puntos considerados.

Tabla 6.17: Rangos de valores considerados para el análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros más sensibles de los modelos de combustible.

Variable	Rango considerado	Paso
Parámetro a	[30 – 250]	20
Parámetro b	[0,02 – 0,09]	0,005
Parámetro c	[1,25 – 4,5]	0,25
Parámetro q	[0,7 – 0,9]	0,02

Todo esto se muestra de forma gráfica en la Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17 y Figura 6.18, donde los puntos negros representan el área obtenida en las simulaciones y la línea negra representa la curva ajustada para la variable correspondiente, cuyo eje vertical es el izquierdo. La línea puntuada naranja representa la derivada de dicha curva y su eje vertical es el derecho.

La Ecuación 6.4, Ecuación 6.5, Ecuación 6.6 y Ecuación 6.7 representan las funciones de las curvas ajustadas para el efecto de las variables velocidad de viento, temperatura y humedad relativa sobre el área total afectada, respectivamente.

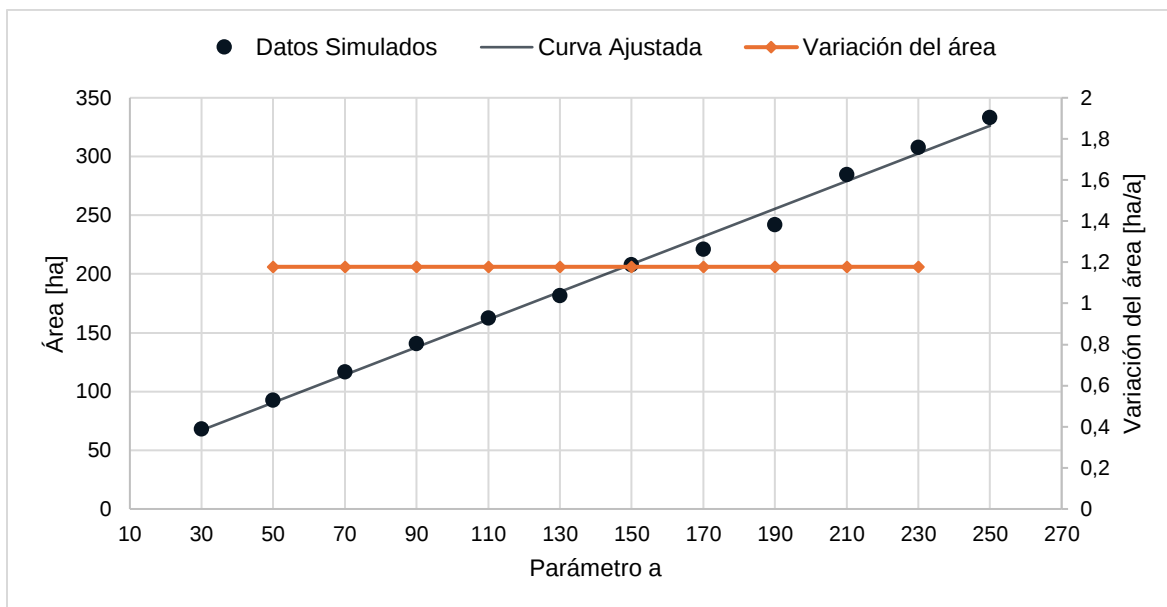


Figura 6.15: Efecto del parámetro a sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

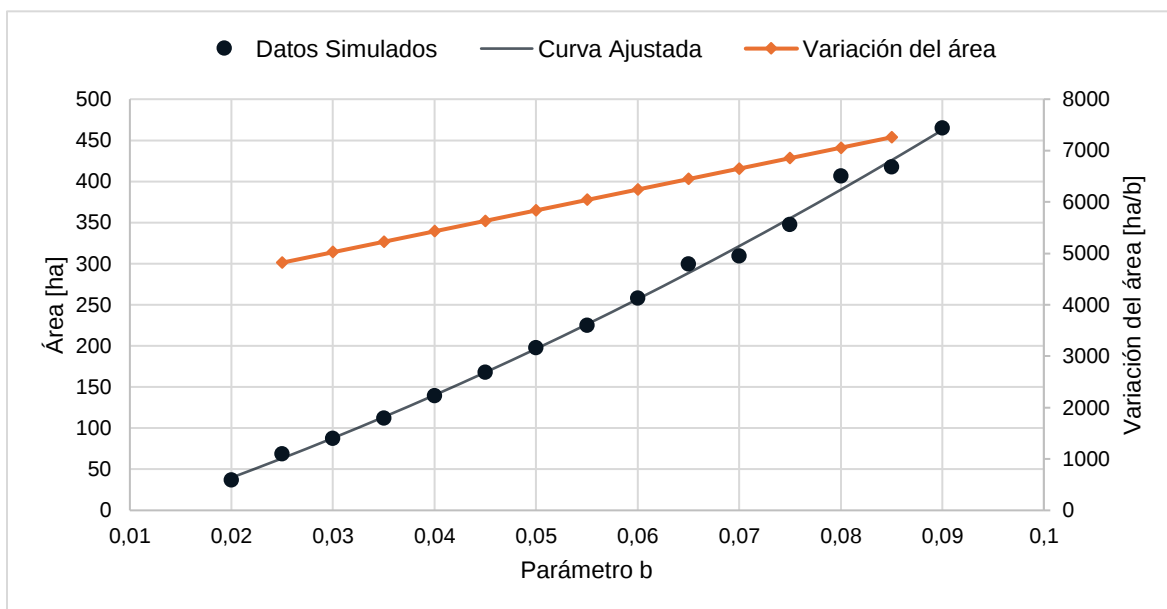


Figura 6.16: Efecto del parámetro b sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

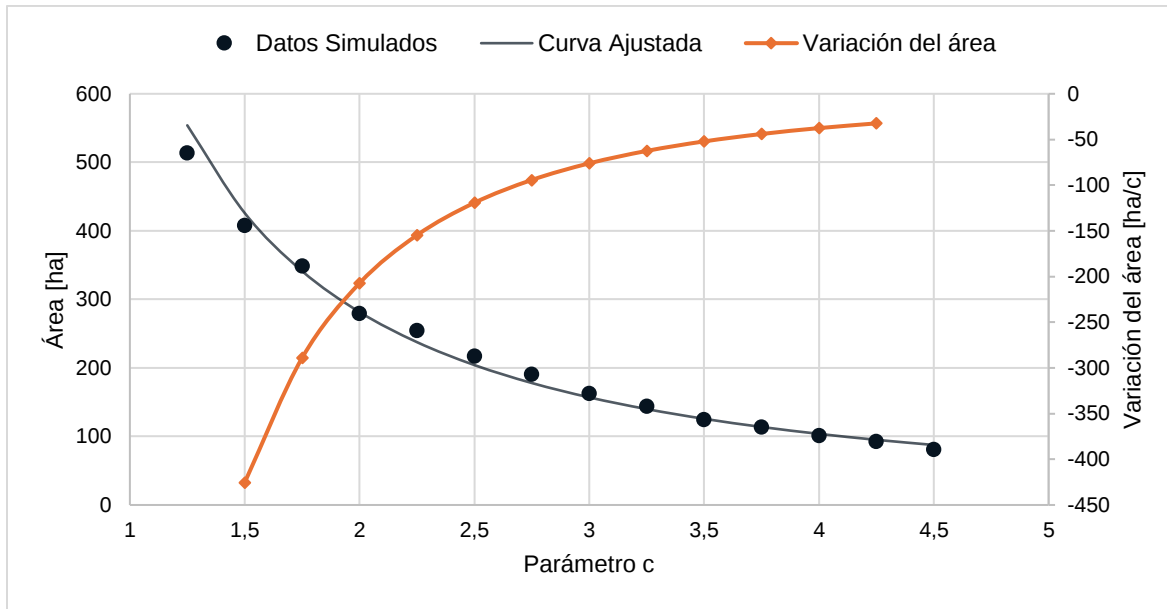


Figura 6.17: Efecto del parámetro c sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

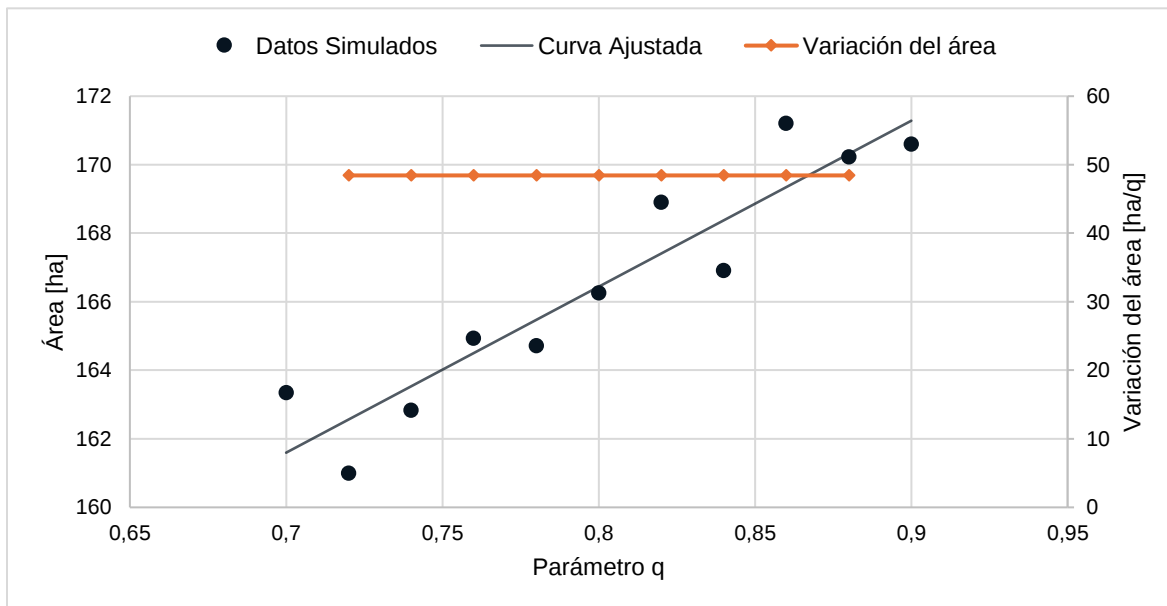


Figura 6.18: Efecto del parámetro q sobre el área a las 5 horas en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

$$A(a) = 1,1779 * a + 31,686$$

$$A(b) = 20330 * b^2 + 3802,6 * b - 44,474$$

$$A(c) = 763,88 * c^{-1,44}$$

$$A(q) = 48,437 * q + 127,69$$

Donde:

A , corresponde al área total afectada [ha]

a , corresponde al valor del parámetro a

b , corresponde al valor del parámetro b

c , corresponde al valor del parámetro c

q , corresponde al valor del parámetro q

Ecuación 6.4: Función ajustada del efecto del parámetro a sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Ecuación 6.5: Función ajustada del efecto del parámetro b sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Ecuación 6.6: Función ajustada del efecto del parámetro c sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

Ecuación 6.7: Función ajustada del efecto del parámetro q sobre el área final en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

De acuerdo con estos resultados, se puede observar que la sensibilidad de cada parámetro tiene un comportamiento distinto al modificar los valores. Para el caso de los parámetros a y q , la variación del área final respecto a cambios en sus valores tiene un comportamiento lineal, lo que implica una derivada constante y una sensibilidad igual en todo el rango de valores estudiado. En este contexto, es posible ver además que la variación del parámetro q mostró efectos mínimos sobre el área final simulada, puesto que, como es posible observar en la Figura 6.18, los valores de área varían entre aproximadamente 161 y 171 hectáreas.

En el caso del parámetro b se puede observar un comportamiento casi lineal. No obstante, como se mencionó anteriormente, la función que mostró una mejor correlación fue una función polinómica de segundo grado. De esta forma, es posible observar que la derivada de la función aumenta de manera constante, lo que implica que la sensibilidad de este parámetro sea mayor a valores más altos y menor a valores más bajos.

En el caso del parámetro c es posible observar un comportamiento que se asemeja a una función potencial de exponente negativo. Esto implica que, a valores más bajos, la derivada de la función tiene magnitudes mayores de signo negativo, es decir, que pequeños aumentos en el valor del parámetro c provocan grandes disminuciones sobre el área final. Luego, a partir de aproximadamente el valor 2,5, la derivada tiende a acercarse a un valor constante, por lo que la sensibilidad comienza a disminuir.

La Figura 6.19 se muestra el gráfico de la sensibilidad normalizada de acuerdo con la Ecuación 5.2. En el caso del parámetro a es posible observar que la sensibilidad normalizada se mantiene casi constante hasta los valores cercanos a 175, para luego aumentar en los valores más altos. En el parámetro b se observan pequeñas variaciones hasta valores cercanos a 0,06, las cuales luego se vuelven más pronunciadas. La sensibilidad normalizada del parámetro c muestra una leve disminución casi constante en el tiempo con un pequeño aumento en los valores 2,75 y 3,75. Por último, el parámetro q presenta variaciones constantes a lo largo de todos sus valores.

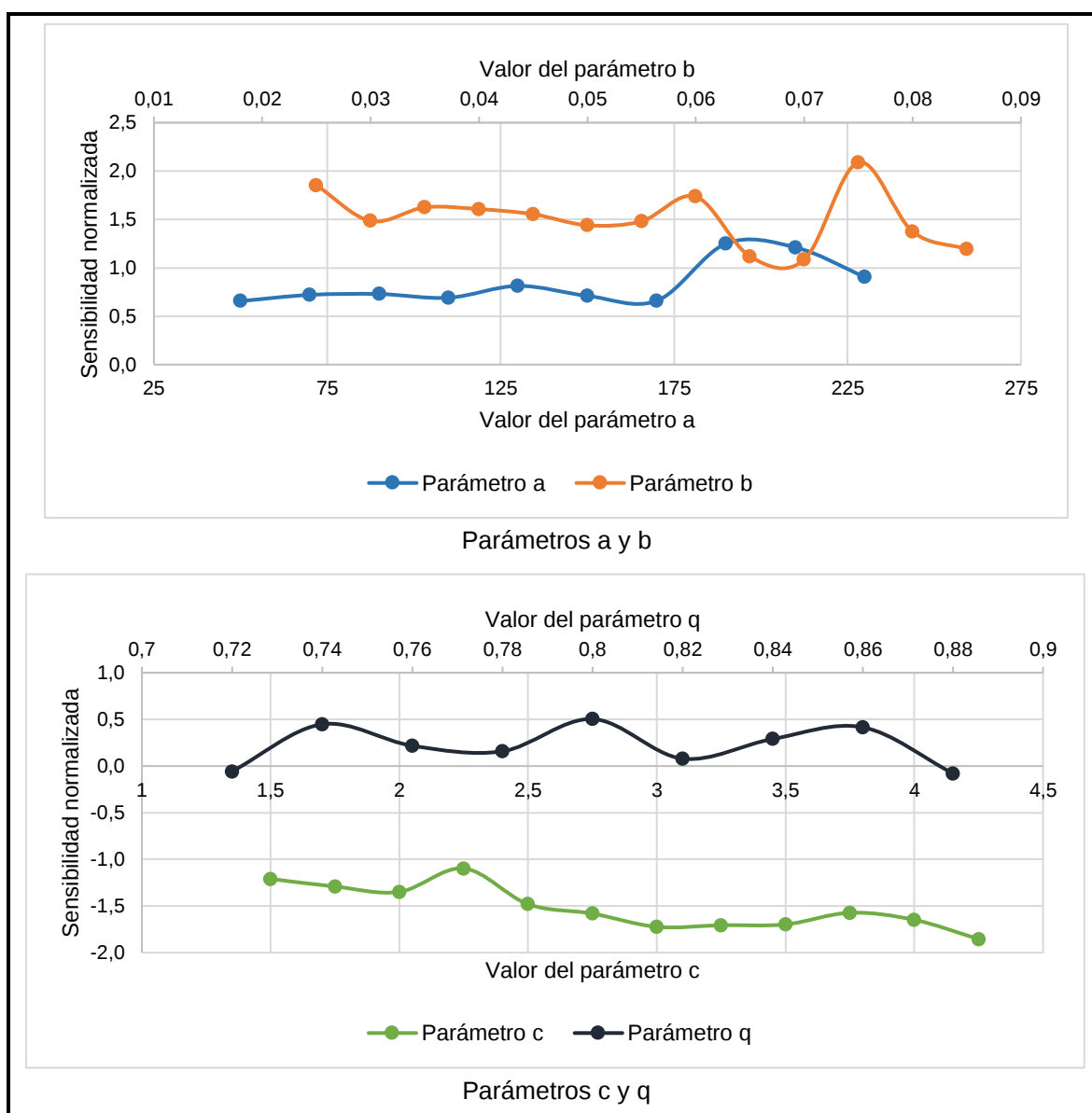


Figura 6.19: Sensibilidad normalizada de los parámetros más sensibles de los modelos de combustible en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024. Los ejes horizontales inferiores muestran los valores de los parámetros a y c y los ejes horizontales superiores muestran los valores de los parámetros b y q.

6.3 Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso

El estudio de ajuste de los modelos de combustible se llevó a cabo en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024. Para ello, se consideró un tiempo de simulación de 5 horas desde el inicio del incendio. El estudio se enfocó en el modelo de combustible que representaba una mayor cobertura (C-3) y en los cuatro parámetros más sensibles identificados anteriormente (a, b, c y q).

La variación de los parámetros siguió el siguiente procedimiento: en primer lugar, se identificaron los valores máximos y mínimos de cada parámetro, con los cuales también se identificó el valor central de cada uno, teniendo así tres valores distintos a utilizar por cada parámetro (Tabla 6.18). Luego, se estableció un orden de variación para considerar todas las posibles combinaciones de estos tres valores en los cuatro parámetros y realizar una simulación por cada una de ellas. Esto resultó en un total de 81 iteraciones (la tabla con todas las combinaciones utilizadas se muestra en el Anexo 9).

Luego de lo anterior, se compararon cada una de las simulaciones con el avance real del incendio a las 5 horas de su inicio. El área del avance real a las 5 horas se obtuvo de forma aproximada por medio de imágenes satelitales en el software QGIS. En la Tabla 6.19 se resumen las 5 iteraciones que obtuvieron un mayor valor del parámetro F1 luego del estudio de ajuste y en la Tabla 6.20 se muestran las 5 iteraciones con un menor valor del mismo parámetro (en el Anexo 9 se muestran los resultados de todas las iteraciones).

La Figura 6.20 muestra la representación cartográfica de las 5 iteraciones con un mayor valor F1 (líneas azul, morada, naranja, celeste y verde) junto a la extensión aproximada del incendio a 5 horas de su inicio por medio de imágenes satelitales (línea roja). En las imágenes se pueden evidenciar similitudes entre las simulaciones, en particular, las iteraciones 46, 64 y 65 muestran una forma similar entre sí. La iteración 39 se diferencia en tener una extensión más pequeña que escapa en menor medida de los límites de la extensión aproximada real. Por otro lado, la iteración 75 presenta la extensión mayor de las 5 iteraciones, presentando además un crecimiento significativo en la dirección oeste que no es tan pronunciado en el resto de las simulaciones.

Tabla 6.18: Valores considerados en el estudio de adaptación de los modelos de combustible.

Valor	a	b	c	q
Máximo	250	0,0829	4,5	1
Central	140	0,05305	2,9	0,875
Mínimo	30	0,0232	1,3	0,75

Tabla 6.19: Iteraciones con un mayor valor F1 junto a los parámetros considerados en el estudio de ajuste del modelo de combustible.

Número de iteración	Valor F1	a	b	c	q
75	56,75%	250	0,0829	1,3	1
64	55,92%	250	0,05305	1,3	0,75
46	55,56%	140	0,0829	1,3	0,75
65	55,29%	250	0,05305	1,3	0,875
39	55,25%	140	0,05305	1,3	1

Tabla 6.20: Iteraciones con un menor valor F1 junto a los parámetros considerados en el estudio de ajuste del modelo de combustible.

Número de iteración	Valor F1	a	b	c	q
7	0,17%	30	0,0232	4,5	0,75
8	0,20%	30	0,0232	4,5	0,875
9	0,50%	30	0,0232	4,5	1
34	1,40%	140	0,0232	4,5	0,75
35	1,43%	140	0,0232	4,5	0,875

Al analizar los parámetros utilizados en las 5 iteraciones que obtuvieron una mayor Puntuación-F1, es posible observar que todas ellas utilizan el valor más bajo posible del parámetro c, mientras que para el parámetro a y b utilizan tanto el valor central como el valor más alto. En el caso del parámetro q, se puede ver que se utilizan todos sus valores.

Por último, para un mayor análisis, se estudió la relación entre los parámetros a, b, c y q y la Puntuación-F1 por medio de una regresión lineal. El análisis consistió en ajustar una función que considera los cuatro parámetros junto a términos de interacción entre ellos, comenzando con 14 grados de libertad. Luego del ajuste, se determinó el término con una menor influencia sobre la variable dependiente, para volver a realizar el ajuste excluyendo dicho término. Este proceso se repitió hasta obtener una función que tuviera el mayor R^2 posible. Los detalles de la regresión lineal se muestran en el Anexo 10.

Con lo anterior, fue posible determinar que los parámetros a, b y c, y las interacciones entre ellos, tienen un mayor efecto sobre la Puntuación-F1 que el parámetro q. Así, de dicho análisis se obtuvo que la función que mejor representa la relación entre las variables fue una función lineal con 8 grados de libertad, teniendo un R^2 de 0,800254 (Ecuación 6.8).

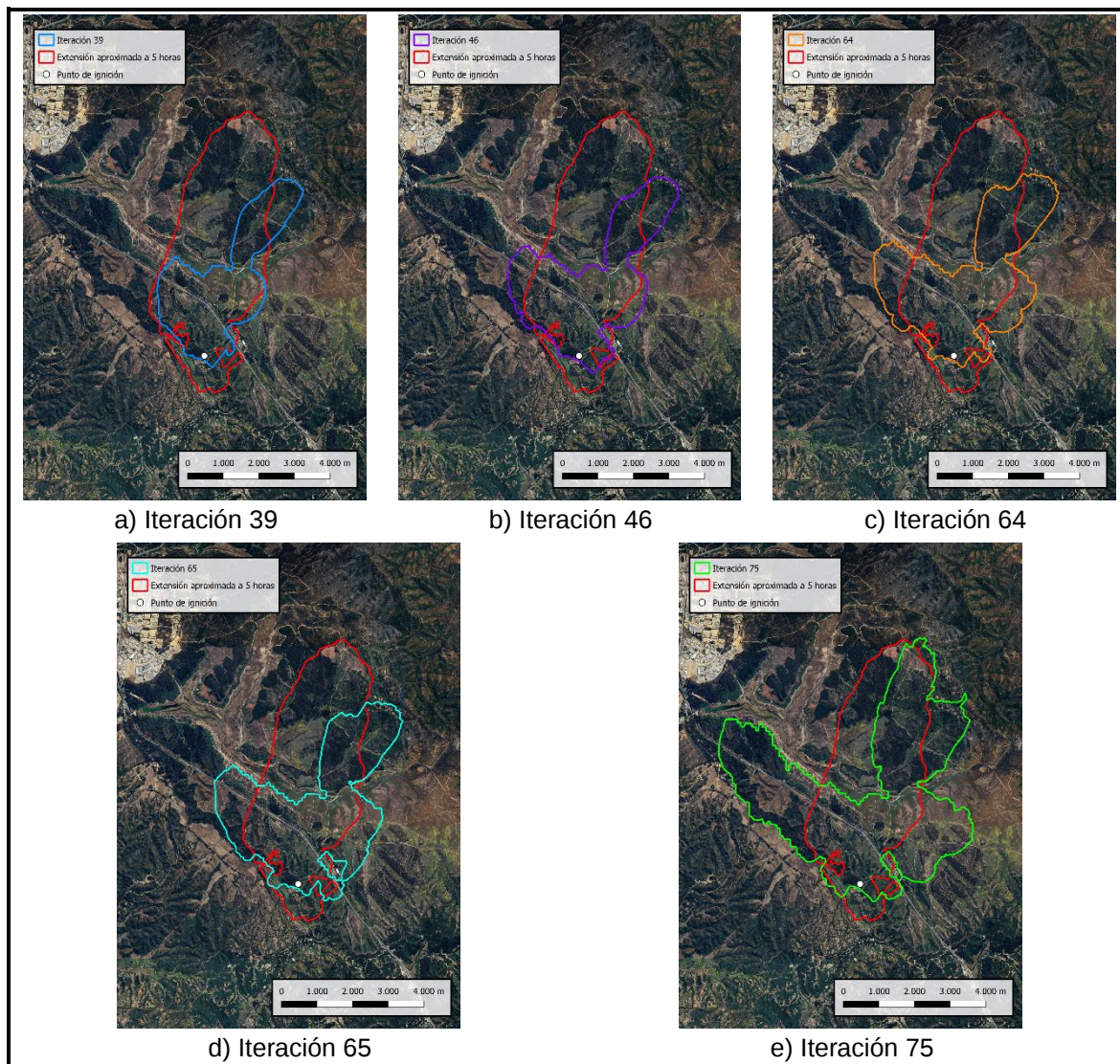


Figura 6.20: Representación cartográfica de las 5 iteraciones con un mayor valor F1 en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024.

$$F_1 = 11,7372 + 0,2328 * a + 106,7648 * b - 14,8602 * c + 12,0904 * q \\ + 1,6496 * ab - 0,0346 * ac - 0,0004 * a^2 + 2,1844 * c^2$$

Donde:

F_1 , corresponde a la Puntuación-F1.

a , corresponde al parámetro a .

b , corresponde al parámetro b .

c , corresponde al parámetro c .

Ecuación 6.8:
Relación entre los parámetros a , b , c y q y la puntuación F-1.

Con la Ecuación 5.3, se generaron gráficos de contorno para visualizar el efecto de las variaciones en los parámetros sobre la Puntuación-F1. La Figura 6.21 muestra el gráfico

obtenido para los parámetros a y b, y la Figura 6.22 muestra el gráfico obtenido para los parámetros a y c. El detalle de los valores utilizados de muestra en el Anexo 11.

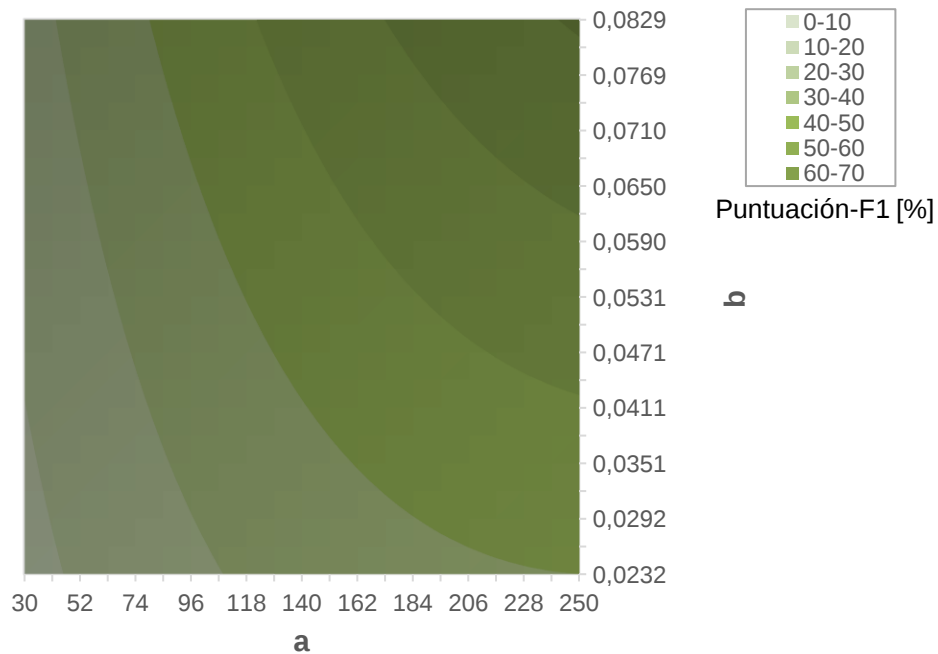


Figura 6.21: Gráfico de contorno del efecto de los parámetros a y b sobre la Puntuación-F1 de acuerdo con el análisis de regresión lineal.

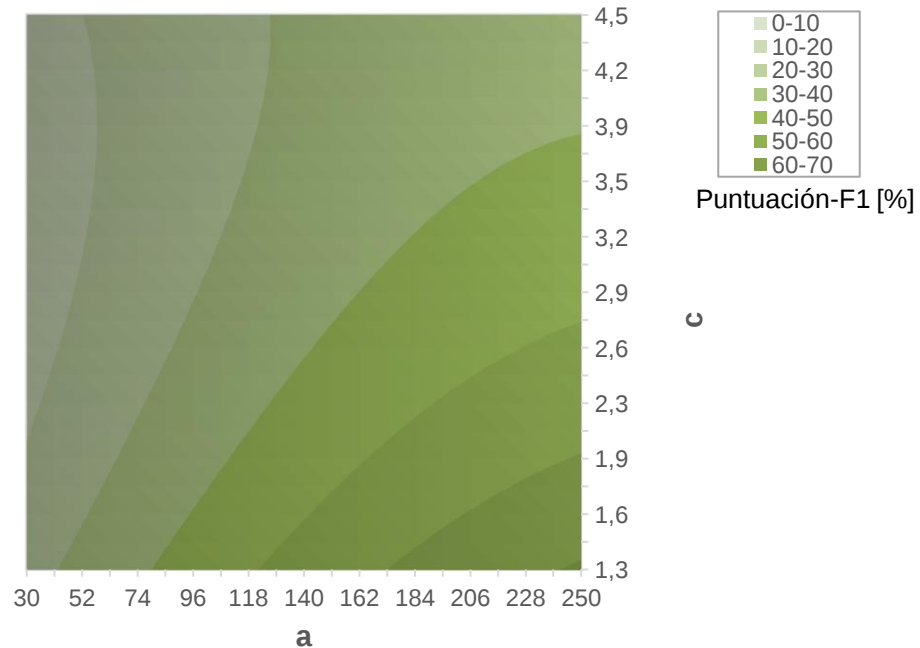


Figura 6.22: Gráfico de contorno del efecto de los parámetros a y c sobre la Puntuación-F1 de acuerdo con el análisis de regresión lineal.

6.4 Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales

Para evaluar la precisión del modelo ajustado, se realizaron dos conjuntos de simulaciones considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones que obtuvieron un mayor valor del parámetro F1 en los resultados del objetivo específico anterior. El primer conjunto corresponde a 5 simulaciones realizadas a 6 horas desde el inicio del incendio (Figura 6.23) y el segundo conjunto corresponde a 5 simulaciones realizadas a 8 horas desde el inicio del incendio (Figura 6.24). Las líneas azules, moradas, naranjas, celestes y verdes representan el resultado de las simulaciones considerando los parámetros utilizados en las iteraciones 39, 46, 64, 65 y 75, respectivamente. La línea roja, en el primer conjunto, representa la extensión del incendio a 6 horas de su inicio estimada a partir de imágenes satelitales; en el segundo conjunto, la línea roja representa la extensión del incendio a 8 horas de su inicio estimada de imágenes satelitales.

En las simulaciones a 6 horas (Figura 6.23) es posible observar que las que consideraron los parámetros de las iteraciones 64 y 65 presentan una geometría y tamaño similar. De la misma forma, las simulaciones que consideraron los parámetros de las iteraciones 39 y 46 también presentan una geometría similar, siendo la primera más pequeña. La simulación que consideró los parámetros considerados en la iteración 75 presentó un área relativamente mayor que las demás, teniendo también un crecimiento en dirección oeste más pronunciado.

En las simulaciones a 8 horas (Figura 6.24) es posible observar un patrón similar al de las simulaciones a 6 horas. Por un lado, las simulaciones que consideraron los parámetros de las iteraciones 64 y 65 presentaron una geometría y tamaño similar. En las simulaciones realizadas utilizando los parámetros considerados en las iteraciones 39, 46 y 75 es posible observar mayores diferencias en su geometría, siendo la primera de ellas la más pequeña de las cinco y la última la de mayor extensión. Junto a ello, la simulación que consideró los parámetros de la iteración 75 presentó una propagación en dirección oeste más pronunciada que el resto.

Junto a lo anterior, la Tabla 6.21 muestra los valores del parámetro F1 obtenidos para cada una de las simulaciones. La tabla se divide en dos secciones: la primera muestra los resultados para el conjunto de simulaciones realizadas a 6 horas y la segunda los del conjunto de simulaciones realizadas a 8 horas. En la tabla se puede ver que, de las simulaciones a 6 horas, la que presentó un mayor valor F1 fue la que consideró los parámetros de la iteración 75 (53,2%). En las simulaciones a 8 horas, la que presentó un mayor valor F1 fue la que consideró los parámetros de la iteración 39 (55,4%).

Tabla 6.21: Valores de F1 para las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros de las 5 iteraciones con mayor precisión.

Iteración	6 horas				8 horas			
	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1
39	1.179,50	172,13	2.903,54	43,4%	2.803,69	1.287,21	3.225,67	55,4%
46	1.334,49	442,21	2.748,54	45,6%	2.998,46	2.125,57	3.030,90	53,8%
64	1.557,95	826,16	2.525,09	48,2%	3.246,85	3.409,11	2.782,51	51,2%
65	1.631,38	950,00	2.451,66	49,0%	3.279,68	3.704,11	2.749,68	50,4%
75	2.156,56	1.865,08	1.926,47	53,2%	3.697,21	5.745,17	2.332,16	47,8%

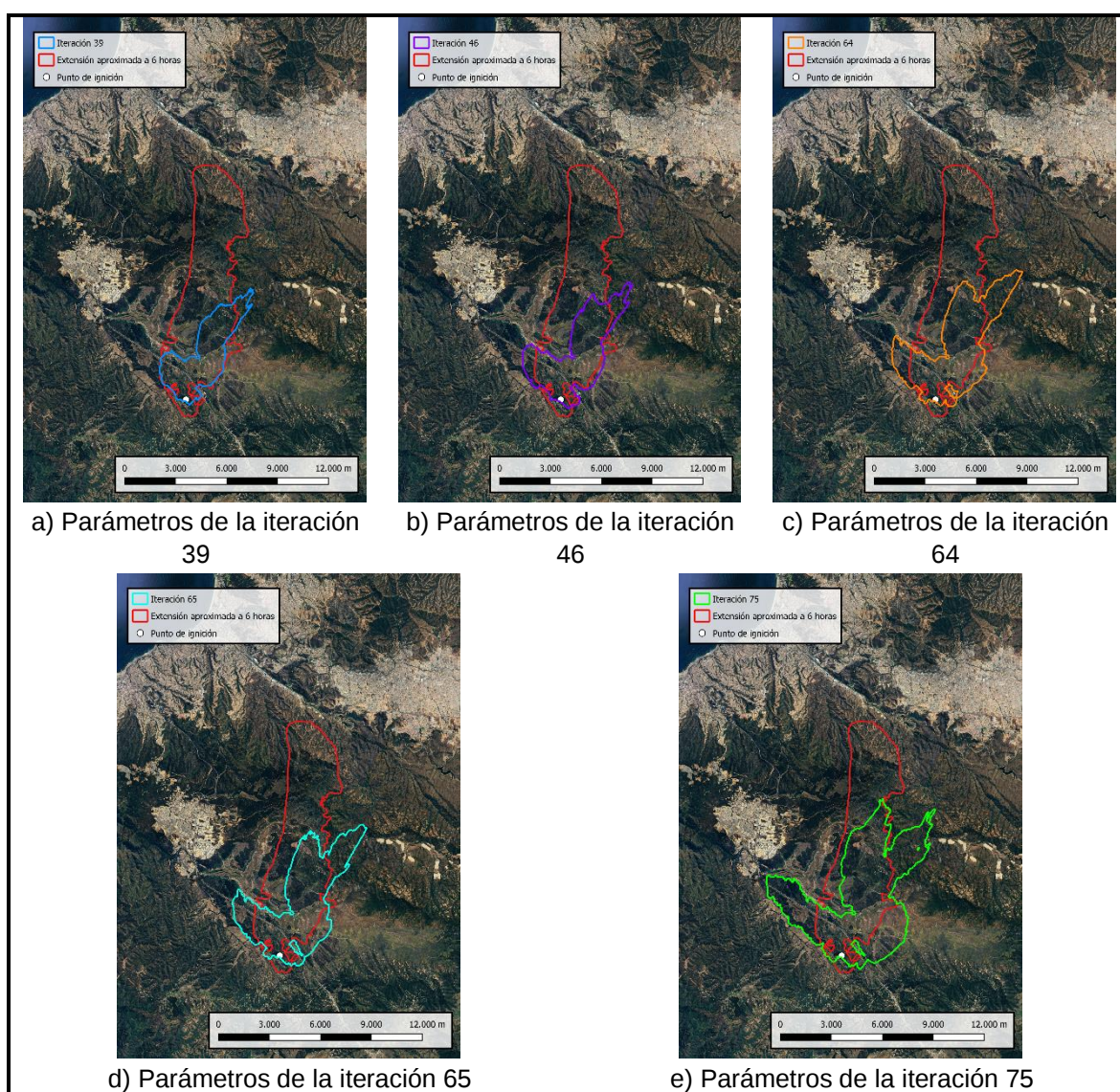


Figura 6.23: Simulaciones del avance en 6 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1.

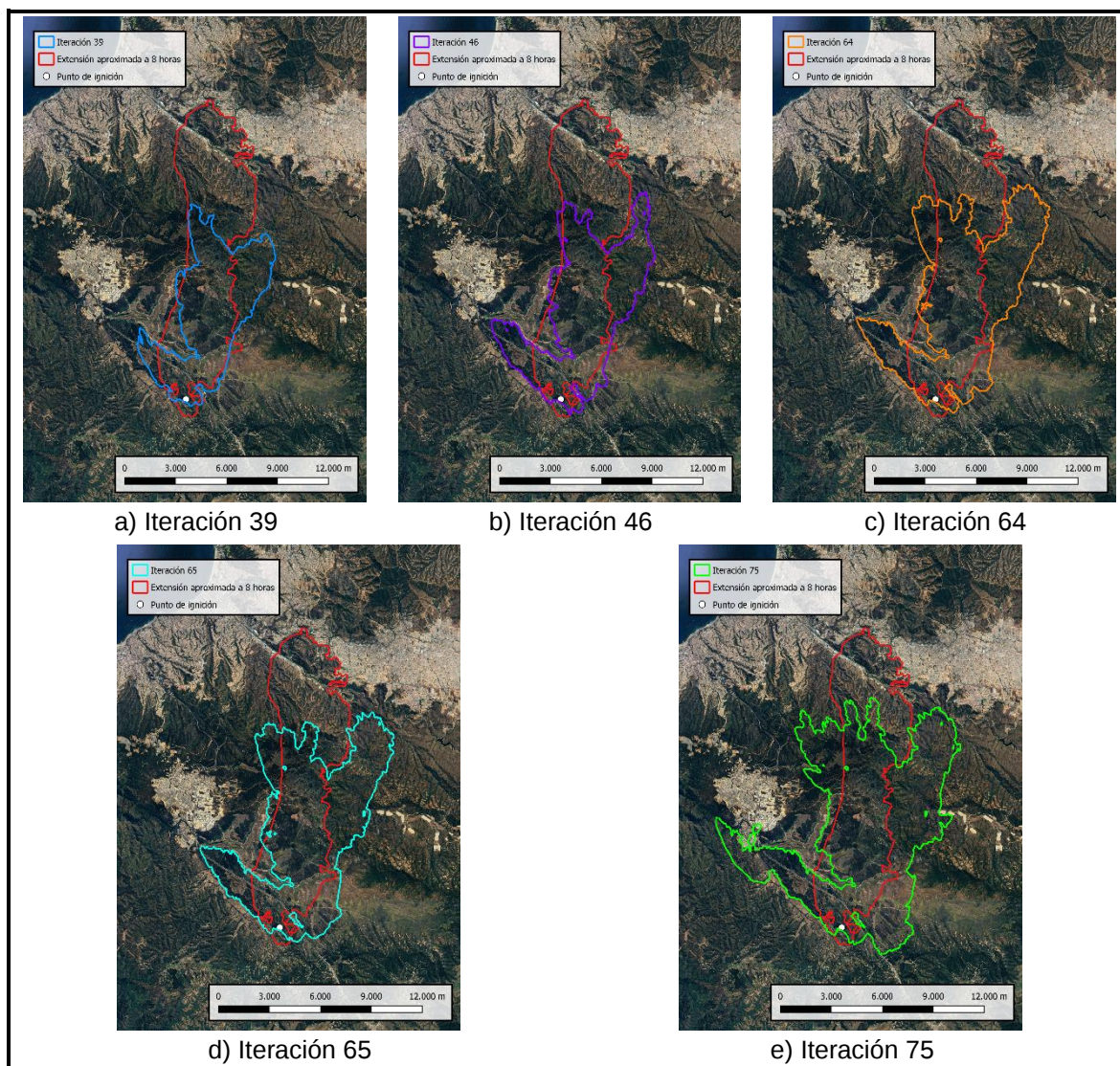


Figura 6.24: Simulaciones del avance en 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1.

En conjunto con lo anterior, se realizaron dos simulaciones adicionales, a 6 y 8 horas, considerando los parámetros originales de los modelos de combustible, con la finalidad de comparar estos resultados con los obtenidos en las 10 simulaciones anteriores. La Figura 6.25 muestra los resultados de estas simulaciones, donde las líneas rosadas representan los resultados de las simulaciones considerando los parámetros originales y las líneas rojas representan el avance estimado a 6 y 8 horas (a y b, respectivamente). En los resultados, es posible observar que la simulación a 6 horas presenta una extensión menor que la realizada a 8 horas, y ambas resultaron en una menor área que sus contrapartes considerando los parámetros de las 5 iteraciones con mejores valores F1.

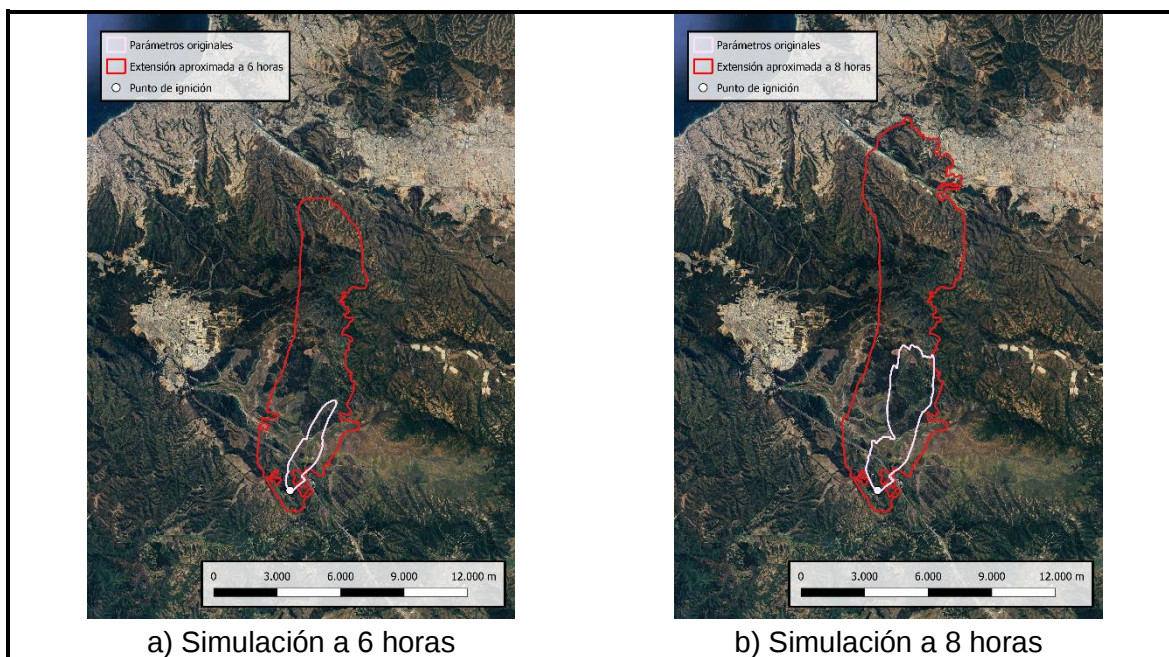


Figura 6.25: Simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros de los modelos de combustible originales.

De esta forma, la Tabla 6.22 muestra los resultados obtenidos de la Puntuación-F1 para las dos simulaciones realizadas considerando los parámetros originales de los modelos de combustible. En esta tabla, se puede observar que la simulación que obtuvo un mayor valor F1 fue la realizada a 8 horas, con un 29,6%, mientras que la realizada a 6 horas obtuvo un 14,5%.

La Figura 6.26 muestra un gráfico de barras con los resultados de todas las simulaciones del Mega Incendio de Valparaíso 2024 a 6 y 8 horas considerando tanto los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con valores de F1 más altos y los parámetros originales. Las barras azules representan las simulaciones a 6 horas y las verdes representan las simulaciones a 8 horas.

Tabla 6.22: Valores F1 para las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 con los parámetros de combustible originales.

Simulación	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1
6 horas	322,05	23,67	3.760,99	14,5%
8 horas	1.051,75	25,83	4.977,62	29,6%

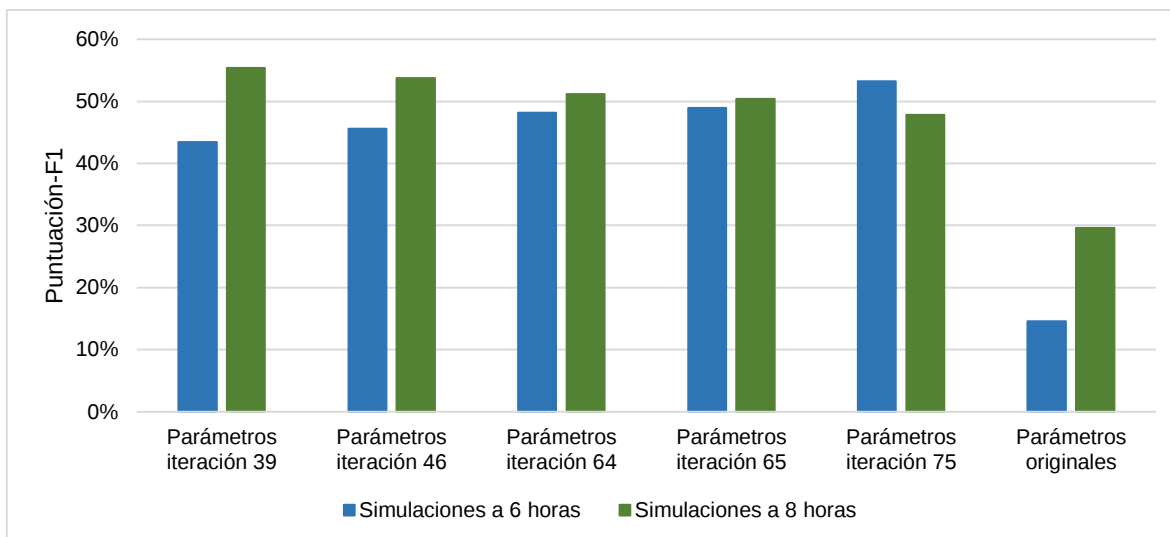


Figura 6.26: Puntuación-F1 de las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.

Por último, para un mayor análisis, se realizaron simulaciones de los escenarios de Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo considerando las 5 combinaciones de parámetros ya mostradas. Para ello, se modificaron los parámetros de los modelos de combustible que cubrían una mayor área en cada escenario (determinados previamente en la sección 6.2.2). Así, en el escenario de Lo Moscoso se modificaron los parámetros del modelo de combustible M-1 y en el escenario de Cuesta Llampaiquillo se modificaron los parámetros del modelo C-3. A falta de información más precisa sobre el avance real de estos dos incendios, se estableció un tiempo de simulación de 12 horas a partir de la información del sistema FIRMS. El cálculo de la Puntuación-F1 se realizó utilizando la información de CONAF del área final afectada por cada incendio. El escenario de La Engorda tuvo que ser excluido de este análisis debido a un error dentro de Prometheus que no permitió modificar los parámetros del modelo de combustible M-4.

La Figura 6.27 y la Figura 6.28 muestran los resultados de las simulaciones de los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo, respectivamente, considerando las combinaciones de parámetros de las iteraciones 39, 46, 64, 65 y 75. La Tabla 6.23 muestra los resultados de la Puntuación-F1 para dichas simulaciones con las 5 combinaciones de parámetros y la Tabla 6.24 muestra los resultados de la Puntuación-F1 con los parámetros originales. La Figura 6.29 y la Figura 6.30 muestran gráficos donde se comparan las puntuaciones F1 de las simulaciones considerando las 5 combinaciones y los parámetros originales.

Tabla 6.23: Valores de F1 para las simulaciones a 12 horas de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaquillo considerando los parámetros de las 5 iteraciones con mayor precisión.

Iteración	Lo Moscoso				Cuesta Llampaquillo			
	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1
39	1.033,51	11.565,94	134,95	15,0%	2.528,34	14.679,81	2,03	25,6%
46	1.030,53	12.604,70	137,92	13,9%	2.528,49	20.384,27	1,88	19,9%
64	1.034,08	13.106,99	134,38	13,5%	2.529,08	22.171,11	1,29	18,6%
65	1.035,40	12.971,88	133,06	13,6%	2.528,45	22.122,56	1,92	18,6%
75	1.033,66	14.338,13	134,80	12,5%	2.528,50	30.952,37	1,87	14,0%

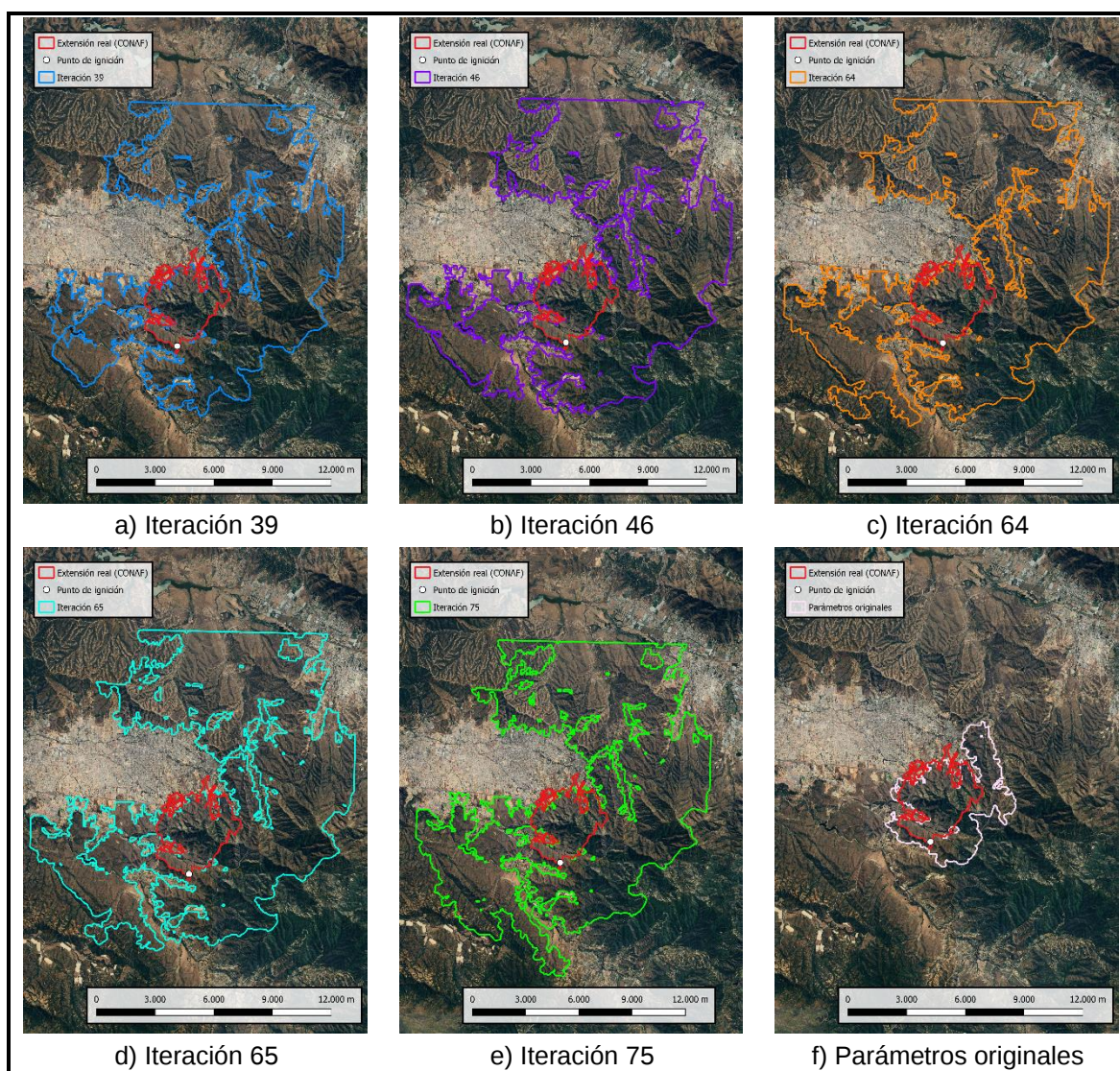


Figura 6.27: Simulaciones del avance en 12 horas del escenario Lo Moscoso considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1 y los parámetros originales.

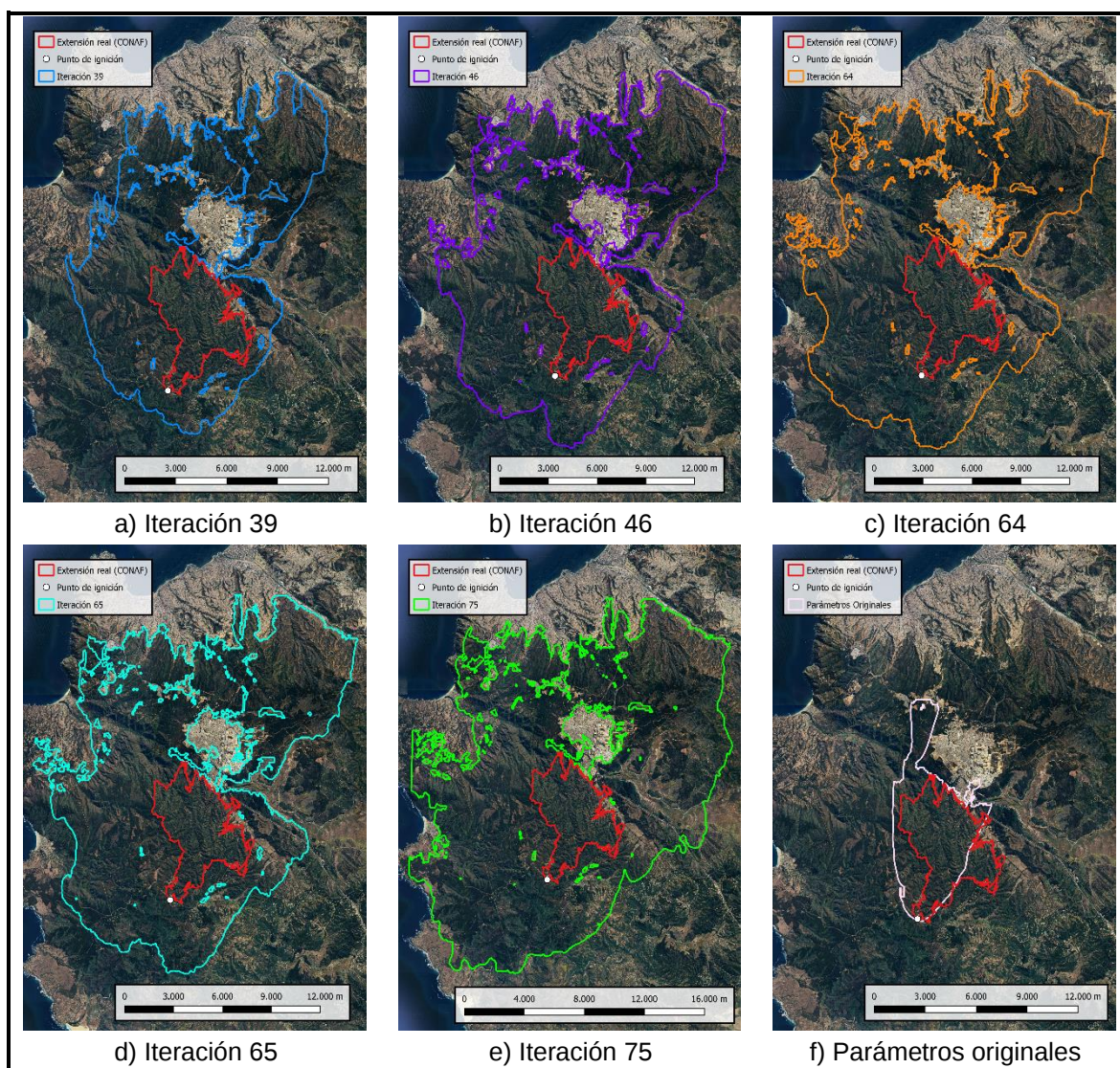


Figura 6.28: Simulaciones del avance en 12 horas del escenario Cuesta Llampaiquillo considerando los parámetros utilizados en las 5 iteraciones con mejores puntuaciones F1 y los parámetros originales.

Tabla 6.24: Valores F1 para las simulaciones a 12 horas de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo con los parámetros de combustible originales.

Simulación	TP [ha]	FP [ha]	FN [ha]	F1
Lo Moscoso	1.025,85	1.252,49	142,61	59,5%
Cuesta Llampaiquillo	2.051,90	1.730,54	478,47	65,0%

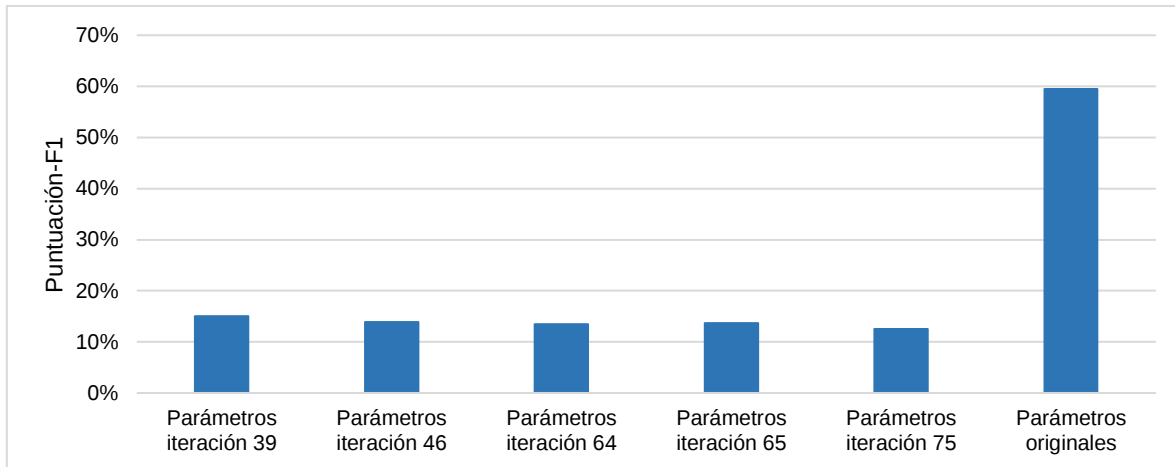


Figura 6.29: Puntuación-F1 de las simulaciones del incendio Lo Moscoso considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.

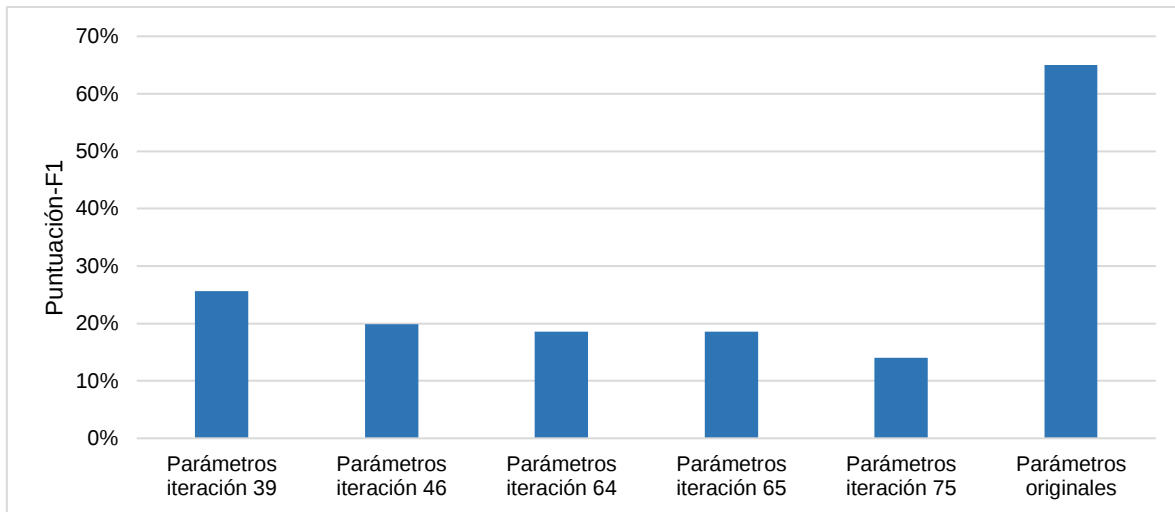


Figura 6.30: Puntuación-F1 de las simulaciones del incendio Cuesta Llampaiquillo considerando los parámetros originales y los utilizados en las 5 iteraciones con mayor precisión.

7 DISCUSIÓN

A nivel mundial existen varios modelos de propagación de incendios forestales. En el caso de este trabajo, como punto de partida se estudiaron los modelos Prometheus y FlamMap de Canadá y Estados Unidos, respectivamente. Estas herramientas utilizan modelos de combustible que representan la forma en que un incendio se comportaría en presencia de distintos tipos de vegetación. Prometheus utiliza los modelos de combustible del sistema FBP (Forestry Canada, 1992) y FlamMap utiliza los modelos del Laboratorio de Incendios Forestales del Norte y los modelos de Scott y Burgan (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005).

7.1 Selección de un modelo de propagación de incendios forestales

Para utilizar los modelos mencionados en el territorio de la región de Valparaíso, se llevó a cabo una asignación de los modelos de combustible utilizados por Prometheus y FlamMap a la vegetación presente. Estudios previos han realizado reclasificaciones similares para el estudio de incendios forestales con modelos de propagación. Hagelin y Cluzel (2016) en su trabajo llevaron a cabo una reclasificación de la vegetación presente en Suecia para hacerla coincidir con los modelos de combustible de Prometheus y FlamMap. López (2019) hizo lo propio en la Región del Maule, Chile, utilizando imágenes del satélite LANDSAT 8 por medio de 6 bandas, con las que luego realizó una clasificación supervisada para determinar la distribución de combustibles en el terreno basándose en los modelos de combustible descritos por Anderson (1982).

En el caso de este trabajo, a falta de estudios previos de este tipo en la Región de Valparaíso, la asignación se llevó a cabo basándose en las descripciones provistas tanto por los desarrolladores de los modelos de combustible (de Groot, 1993; Hirsch, 1996; Scott & Burgan, 2005) como por CONAF sobre la vegetación encontrada en la región. De esta forma, se obtuvo dos asignaciones: una para ser utilizada en el modelo Prometheus y una segunda para el modelo FlamMap.

Con las asignaciones realizadas, se llevó a cabo un estudio de precisión de ambos modelos utilizando cuatro incendios ocurridos en la Región de Valparaíso. De dicho estudio se pudo observar que las áreas de los incendios simulados con Prometheus eran siempre mayores que las entregadas por FlamMap. Este tipo de resultados fue también obtenido por Hagelin y Cluzel (2016), donde la simulación hecha con FlamMap entregó un área menor que la de Prometheus. Una posible explicación de esto puede encontrarse en la forma en que ambos modelos procesan los datos de viento. Prometheus, por un lado, genera un vector de velocidad de viento equivalente que depende de la elevación del terreno, el cual es añadido al vector que representa la velocidad y dirección de viento entregada por la estación meteorológica ingresada. FlamMap, por otro lado, considera que la velocidad y dirección de viento entregadas por la estación meteorológica son la misma en todo el dominio.

Una posible segunda explicación a la diferencia en las áreas entregadas por Prometheus y FlamMap podrían ser las variaciones existentes entre las dos asignaciones realizadas para cada modelo. Esto, ya que las asignaciones se llevaron a cabo basándose en las descripciones de los modelos de combustible, que están basados en la vegetación presente en el hemisferio norte (Canadá y Estados Unidos). Esta vegetación difiere de la encontrada en el territorio chileno, por lo que la utilización de descripciones puede producir errores que impliquen no asignar el modelo de combustible más adecuado a un tipo de vegetación.

Con esto en consideración, se observó que Prometheus mostró en general una mayor precisión de acuerdo con el parámetro F1 utilizado. También, se observaron diferencias de precisión significativas entre las simulaciones hechas a 48 y 12 horas. Esto se podría explicar al tomar en cuenta que no se tiene información precisa del avance real que tuvo cada incendio a través del tiempo. Así, las simulaciones que tuvieron una mayor precisión considerando 12 horas podrían sugerir que los incendios reales tuvieron una rápida velocidad de propagación (lo que implica alcanzar su extensión máxima en un tiempo menor), mientras que aquellas que presentaron mayor precisión a 48 horas podrían sugerir que los incendios reales tuvieron una baja velocidad de propagación (por lo que alcanzarían su extensión máxima en un tiempo mayor).

Por último, cabe destacar que se observaron diferencias de precisión dependiendo del incendio que se estaba simulando. Por ejemplo, en las simulaciones a 48 horas en Prometheus, el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024 tuvo un 71% de precisión, mientras que los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo tuvieron menos de un 40% de precisión. También, en las simulaciones a 12 horas con el mismo modelo, fueron los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo los que obtuvieron una mayor precisión (63% y 69%, respectivamente), mientras que los escenarios de La Engorda y del Mega Incendio de Valparaíso obtuvieron una menor precisión (13% y 30%, respectivamente). Estas variaciones de precisión podrían deberse, por un lado, a posibles diferencias entre los tiempos de simulación considerados y los tiempos de duración reales de cada incendio. Por otro lado, la ubicación geográfica de cada escenario también podría jugar un papel en estas variaciones, ya que cada incendio se encontraba a una distancia distinta de la estación meteorológica considerada, por lo que sus datos pueden ser más representativos para algunos incendios que para otros.

7.2 Análisis de sensibilidad

Tomando en cuenta los resultados del estudio de precisión, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo Prometheus, puesto que entregó resultados más precisos que FlamMap.

Por un lado, se estudió la sensibilidad de tres variables meteorológica: velocidad de viento, temperatura y humedad relativa. Del análisis se obtuvieron gráficas que muestran la relación entre cambios en estas variables y el área final, donde se puede observar que la sensibilidad de cada variable cambia al aumentar y disminuir sus valores. Por un lado, la gráfica de la temperatura mostró que a valores mayores la sensibilidad aumenta, mientras

que la gráfica de la humedad relativa mostró que a valores menores la sensibilidad aumenta. Esto concuerda con la realidad, ya que es en los periodos de tiempo de mayor temperatura y sequedad donde hay una mayor ocurrencia y gravedad de incendios forestales. En Chile, esto sería en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (González, 2023). Por otro lado, la gráfica de la velocidad de viento mostró que existe un rango de valores en el cual la sensibilidad es mayor (aproximadamente entre los 30 y 50 kilómetros por hora), luego del cual mayores velocidades de viento dejan de tener un efecto en el resultado final. Esto último puede explicarse debido a que a velocidades mayores a 50 km/h, el viento comienza a tener un efecto de enfriamiento, lo que impide que la velocidad de propagación de un incendio siga aumentando (M. Castillo, comunicación personal, 20 de noviembre de 2024).

De esta forma, se podría decir que la variable meteorológica de mayor importancia en los incendios forestales sería la velocidad de viento, especialmente en el rango comprendido entre los 30 y 50 kilómetros por hora. Esto ya que, si bien la temperatura y humedad presentan sensibilidades similares en ciertos rangos (temperatura mayor a 40 °C y humedad relativa menor al 20%), estos escapan de las condiciones ambientales normales encontradas en la región. De acuerdo con esto, sería de vital importancia contar con instrumentación que entregue información meteorológica de forma precisa a la hora de utilizar modelos de propagación de incendios forestales, especialmente la velocidad de viento, ya que una mala medición de esta variable en su rango más sensible podría entregar una subestimación o sobreestimación significativa al resultado de la simulación. Esto último implicaría una simulación que no represente la realidad de la forma más precisa posible, lo que puede provocar una mala toma de decisiones al gestionar los recursos de combate de incendios.

Junto a lo anterior, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible. Primeramente, en el análisis preliminar se identificaron los cuatro parámetros más sensibles: a, b, c y q. Este resultado es esperable, ya que los parámetros a, b y c se relacionan directamente con la tasa de propagación de los incendios forestales, por lo que su variación tiene grandes efectos sobre la velocidad de propagación de los incendios simulados. El parámetro q también se relaciona con la tasa de propagación, pero de manera indirecta, ya que su variación afecta al llamado “efecto de acumulación” (BE, por las siglas *Builup Effect*) el cual luego modifica la tasa de propagación, como se puede ver en el Anexo 2 (Forestry Canada, 1992).

Luego del análisis de sensibilidad preliminar, se realizó un análisis más detallado de los parámetros a, b, c y q. Del análisis se observó que los parámetros a y q presentaron un comportamiento lineal. Sin embargo, en los gráficos es posible observar que el parámetro q presentó una sensibilidad mucho menor, ya que los valores del área final varían entre las 161 y 171 hectáreas. Este resultado concuerda con el análisis de sensibilidad preliminar, ya que, de los cuatro parámetros estudiados, el parámetro q fue el que obtuvo una sensibilidad normalizada menor en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024. Por otro lado, el parámetro b presentó un comportamiento casi lineal, pero

se decidió aproximarlos a una curva polinomial de segundo grado, ya que de esa forma había una mayor correlación. El parámetro c , por otra parte, presentó un comportamiento similar a una función potencial de exponente negativo, donde mayores valores de c resultaban en menores áreas finales.

De lo anterior, cabe destacar la diferencia existente en el comportamiento del parámetro c con los parámetros a y b , ya que estos dos resultaban en mayores áreas al aumentar su valor, pero en el caso de c , esta relación fue inversa. Esto podría explicarse con la relación que cada parámetro tiene con la tasa de propagación inicial en los modelos de combustible, ya que, de acuerdo con las ecuaciones descritas por Forestry Canada (1992), un mayor valor del parámetro c implica una menor tasa de propagación inicial, mientras que valores más altos de los parámetros a y b implican mayores tasas de propagación inicial.

7.3 Ajuste de los modelos de combustible al contexto territorial de la Región de Valparaíso

Luego del análisis de sensibilidad, se realizó un estudio de ajuste de los modelos de combustible para mejorar los resultados obtenidos en el contexto de la Región de Valparaíso. El estudio se enfocó en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024, en el modelo de combustible que tenía una mayor cobertura en dicho escenario y en los parámetros más sensibles identificados anteriormente.

De los resultados de este estudio, se obtuvo cinco combinaciones distintas de parámetros que mostraron mayores valores de precisión de acuerdo con la Puntuación-F1. De estas combinaciones, es posible notar que todas utilizan valores que resultan en mayores velocidades de propagación (valores medios y altos de los parámetros a y b y valores bajos del parámetro c). Cabe destacar además que los parámetros a , b y c se relacionan directamente con la tasa de propagación de los modelos de combustible (Forestry Canada, 1992). Junto a lo anterior, se identificó también las cinco combinaciones que resultaron en valores más bajos de la Puntuación-F1. En ellas, al contrario que en el caso anterior, es posible identificar que se utilizan valores que resultan en menores velocidades de propagación (Valores bajos de los parámetros a y b y valores altos del parámetro c)

De acuerdo con Tymstra *et al.* (2010), ninguno de los modelos de combustible originales utiliza una combinación de parámetros similar a las cinco que obtuvieron mayores valores de Puntuación-F1. Esto podría ser un indicador de que la vegetación presente en el territorio de la Región de Valparaíso presenta tasas de propagación más altas que la vegetación encontrada en Canadá.

Adicionalmente, se realizó un análisis de regresión lineal para estudiar la relación entre los parámetros a , b , c y q y la Puntuación-F1. De dicho análisis, se obtuvo que los máximos valores de la Puntuación-F1 se obtenían al considerar los valores más altos de los parámetros a , b y q y el valor más bajo del parámetro c . Esto es consistente con los

resultados obtenidos en las simulaciones de todas las iteraciones, lo que ayuda a fundamentar la selección de las combinaciones de parámetros consideradas.

Por último, es importante destacar que el estudio de ajuste se llevó a cabo en solo un modelo de combustible, manteniendo el resto en sus parámetros originales. Esto es relevante, ya que los escenarios de simulación utilizan terrenos heterogéneos, donde hay más de un modelo de combustible que tiene efectos sobre la propagación del incendio modelado. De esta forma, de los resultados obtenidos, se podría decir que aquellos usos de suelo asignados al modelo de combustible C-3 (Plantaciones) probablemente presentan altas tasas de propagación.

7.4 Evaluación de la precisión del modelo ajustado para predecir la propagación de incendios forestales

La última sección del trabajo consistió en evaluar más profundamente los resultados obtenidos en la sección anterior. Para ello, se trabajó nuevamente en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024, considerando mayores tiempos de simulación para evaluar la precisión del modelo con los parámetros obtenidos anteriormente.

De los resultados, se puede ver que la Puntuación-F1 de las simulaciones a 6 horas aumenta desde la iteración 39 hasta la 75, mientras que en las simulaciones a 8 horas dicho valor disminuye. Este comportamiento podría deberse a que las combinaciones de las iteraciones puestas en orden ascendente (39, 46, 64, 65 y 75) generan tasas de propagación que también van en aumento. De esta forma, las combinaciones de parámetros con menores tasas de propagación terminan subestimando el incendio simulado en 6 horas, pero representan mejor el incendio simulado en 8 horas. Con las combinaciones de parámetros con mayores tasas de propagación ocurre que sobreestiman el incendio simulado en 8 horas, pero representan de mejor manera el incendio simulado en 6 horas.

También, para un mayor análisis, se decidió realizar simulaciones del Mega Incendio de Valparaíso 2024 utilizando los parámetros de las iteraciones 39 y 75 considerando variaciones porcentuales de la velocidad de viento registrada por la estación meteorológica (Figura 7.1). En las gráficas es posible observar que, en general, el aumento porcentual de la velocidad de viento aumenta también el valor de la Puntuación-F1. En las simulaciones a 6 horas se ve que se alcanza un valor máximo en el 40% y 20% de variación para los parámetros de las iteraciones 75 y 39, respectivamente. En las simulaciones a 8 horas el valor máximo se alcanza en el 100% de variación para ambas combinaciones de parámetros.

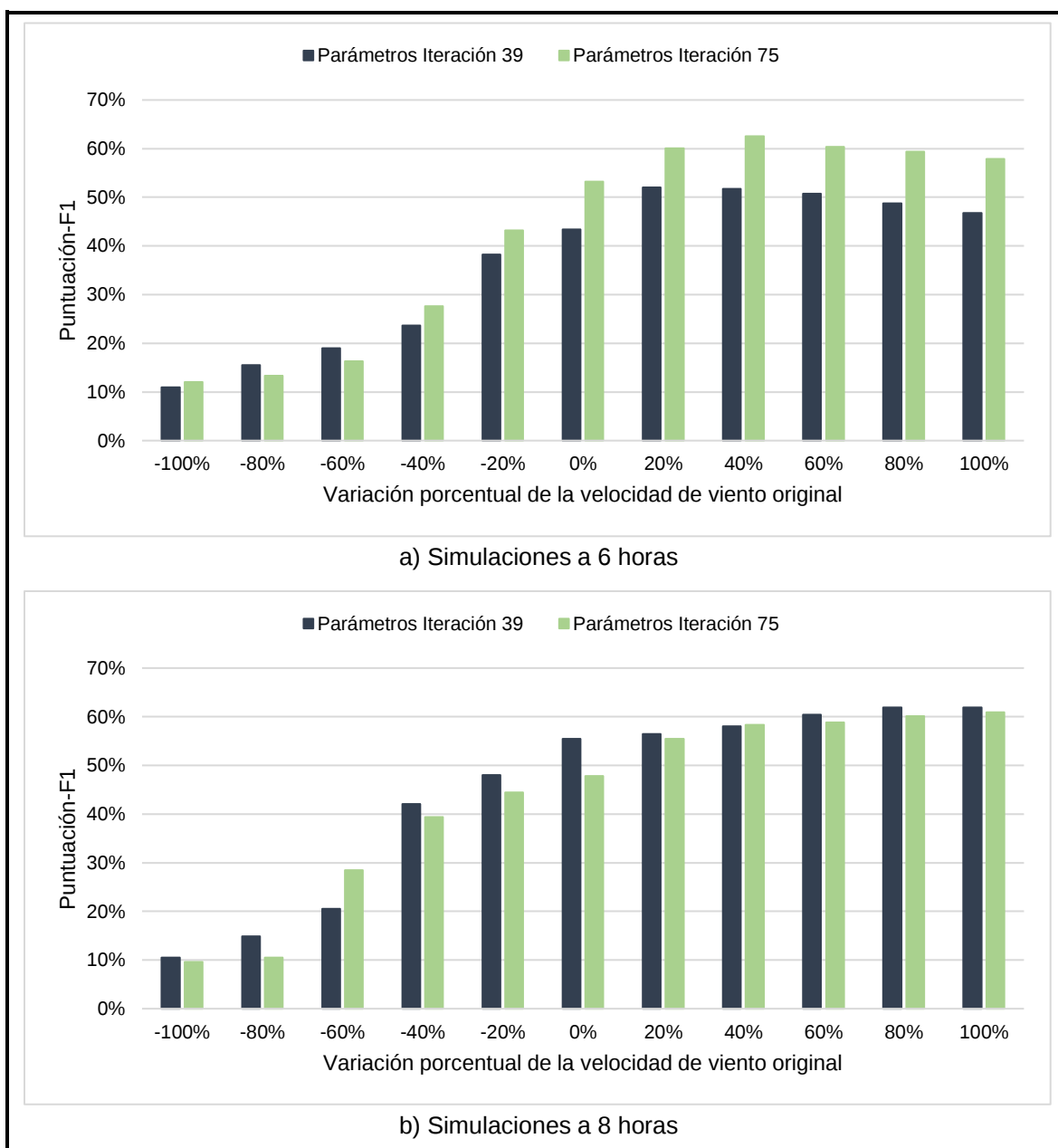


Figura 7.1: Puntuación F-1 de las simulaciones a 6 y 8 horas del Mega Incendio de Valparaíso 2024 considerando variaciones porcentuales de la velocidad de viento real y utilizando los parámetros considerados en las iteraciones 39 y 75.

Esta variación en la precisión debido a la modificación de la velocidad de viento podría ser un indicativo de que la información registrada por la estación meteorológica “Rodelillo, Ad.” no es lo suficientemente representativa de las condiciones meteorológicas que influyeron sobre el Mega Incendio de Valparaíso 2024. Esto es esperable, ya que la estación meteorológica se encuentra a varios kilómetros del punto de ignición del incendio, lo cual, sumado a la geografía presente en la región, provoca que las mediciones no sean representativas.

Por último, se evaluó la precisión con las mismas combinaciones de parámetros para los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo. De los resultados, se puede observar una sobreestimación del área afectada por cada incendio, lo cual puede deberse a que el ajuste de parámetros se realizó en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso. Para el caso del escenario Lo Moscoso, cabe destacar que la variación de parámetros se realizó en el modelo de combustible M-1 (que representaba un mayor porcentaje del terreno), mientras que las 5 combinaciones de parámetros utilizadas se determinaron en el modelo de combustible C-3 (que representaba un mayor porcentaje del terreno en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024). Por lo anterior, es esperable que los resultados obtenidos no sean los óptimos, ya que se están utilizando los parámetros determinados en un modelo de combustible distinto. Por otro lado, cabe destacar que este análisis se realizó en un tiempo de simulación de 12 horas, el cual se determinó de manera aproximada con información del sistema FIRMS. Por ello, es posible que el tiempo de simulación seleccionado no represente fielmente la duración real de los incendios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo, siendo así una de las posibles causas de la sobreestimación observada.

7.5 Observaciones finales

Los resultados obtenidos dejan en evidencia el gran efecto que las variables meteorológicas tienen sobre la predicción de la propagación de incendios forestales y, con ello, la importancia de contar con suficiente instrumentación que entregue datos fidedignos. Junto a esto, se pudo observar que hay parámetros con efectos más significativos sobre los resultados, por lo que los estudios de adaptación de modelos de combustible deberían centrarse en la determinación dichos parámetros. Además, el estudio de ajuste da indicios de que podría ser posible utilizar Prometheus para predecir incendios forestales en la Región de Valparaíso. Sin embargo, la sobreestimación observada al implementar los parámetros ajustados en los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo deja en evidencia la necesidad de contar con información más precisa con la cual realizar simulaciones y comparar resultados. Sumado a lo anterior, cabe destacar que para implementar Prometheus satisfactoriamente en la región de Valparaíso sería necesario realizar una adaptación completa de los modelos de combustible utilizados considerando más escenarios de simulación para una evaluación de precisión más robusta.

Futuros estudios de adaptación deberían enfocarse en la determinación de parámetros y modelos de combustible que representen de forma más precisa todos los tipos de vegetación presentes en la región de Valparaíso, pudiendo considerar también la experimentación y el trabajo en terreno para determinar los parámetros de manera empírica y más fidedigna.

8 CONCLUSIONES

Fue posible evaluar la precisión de los modelos FlamMap y Prometheus para predecir la propagación de incendios forestales en la Región de Valparaíso utilizando cuatro escenarios de simulación: Lo Moscoso, Cuesta Llampaiquillo, La Engorda y el Mega Incendio de Valparaíso 2024. Esto se hizo en base a una asignación de los modelos de combustible de cada modelo a los tipos de vegetación presentes en la región. De esta forma, fue posible determinar que Prometheus presentó una mayor precisión, con un promedio del 48%, 44% y 31% en las simulaciones de 48 horas, 12 horas y 12 horas con información del FIRMS, respectivamente, de acuerdo con la Puntuación-F1, frente a la precisión de 30%, 9% y 23% de FlamMap.

Utilizando el modelo que presentó mayor precisión (Prometheus), se realizó un análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas (velocidad de viento, temperatura y humedad relativa) y de los parámetros de los modelos de combustible. Se determinó que la velocidad de viento resultó ser la variable meteorológica con una mayor sensibilidad, llegando a un valor de 4,9 de sensibilidad normalizada en su rango más sensible. En el caso de los parámetros de los modelos de combustible, se determinó que los cuatro más sensibles corresponden a los parámetros a, b, c y q. Se observó que el parámetro b fue el que obtuvo los valores mayores de sensibilidad normalizada.

Con base en el escenario de simulación del Mega Incendio de Valparaíso 2024 y considerando los cuatro parámetros más sensibles los modelos de combustible, se realizó un estudio de ajuste del modelo de combustible C-3 al contexto de la Región de Valparaíso. Así, se determinaron combinaciones de los parámetros a, b, c y q que generaron resultados más precisos en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024, alcanzando valores de hasta 56,75% según la Puntuación-F1 (en la combinación 250, 0,0829, 1,3 y 1, para los parámetros a, b, c y q, respectivamente).

Para evaluar la precisión con los nuevos los parámetros, se aumentó el tiempo de simulación en el escenario del Mega Incendio de Valparaíso 2024. De esta forma, para la simulación de 6 horas, la mayor precisión (53,2%) se obtuvo con la combinación 250, 0,0829, 1,3 y 1 (para los parámetros a, b, c y q, respectivamente), resultando ser mayor que la precisión considerando los parámetros originales (14,5%). Para la simulación de 8 horas, la mayor precisión (55,4%) se obtuvo con la combinación 140, 0,05305, 1,3 y 1 (para los parámetros a, b, c y q, respectivamente), resultando también ser mayor que la precisión considerando los parámetros originales (29,6%). Al evaluar los parámetros en los escenarios Lo Moscoso y Cuesta Llampaiquillo se observó una sobreestimación de los incendios simulados.

El trabajo muestra que podría ser posible utilizar Prometheus para predecir incendios forestales en la Región de Valparaíso, pero para ello es recomendable realizar estudios de adaptación más profundos.

9 BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Alvarado, A., Ibargüen-Mondragón, E., & Cerón-Gómez, M. (2020). El análisis de sensibilidad local de un modelo matemático sobre resistencia antibiótica. *Eco Matemático*, 12(1), 6-13. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ecomatematico/article/view/3064/3482>

AFP. (2023). 2023, un año devastador por los incendios forestales. *France24*. <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20231227-2023-un-a%C3%B1o-devastador-por-los-incendios-forestales>

Alberta. (2023). *Prometheus*. FireGrowthModel.ca. Recuperado 9 de junio de 2024, de https://firegrowthmodel.ca/pages/prometheus_overview_e.html

Anderson, H. (1982). Aids to Determining Fuel Models For Estimating Fire Behavior. En *U.S.Department Of Agriculture* (INT-122). U.S.Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-122>

Bargali, H., Pandey, A., Bhatt, D., Sundriyal, R., & Uniyal, V. (2024). Forest fire management, funding dynamics, and research in the burning frontier: a comprehensive review. *Trees, Forests And People*, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100526>

Biblioteca Nacional de Chile. (s. f.). *Corporación Nacional Forestal*. Memoria Chilena. Recuperado 10 de junio de 2024, de <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-96609.html#:~:text=La%20fundaci%C3%B3n%20de%20CONAF%20es,calidad%20de%20Ovida%20de%20los>

Burgan, R. E., & Rothermel, R. C. (1984). BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system--FUEL subsystem. <https://doi.org/10.2737/int-qtr-167>

Calderana, C. (2024). ¿Cuál fue el incendio más letal del mundo en el siglo XXI?: El de Valparaíso se ubica en segundo lugar. *T13*. Recuperado 20 de mayo de 2024, de <https://www.t13.cl/noticia/mundo/cual-fue-incendio-mas-letal-del-mundo-siglo-xxi-valparaiso-se-ubica-segundo-6-2-2024#:~:text=Cu%C3%A1l%20es%20el%20incendio%20m%C3%A1s%20letal%20del%20siglo%20XXI&text=El%20incendio%20m%C3%A1s%20letal%20ocurri%C3%B3,tambi%C3%A9n%20hubo%20cientos%20de%20heridos>

Carrasco, J., Pais, C., Soto, F., Palacios, D., Mahaluf, R., De la Barra, F., Gilabert, H., Alfaro, G., Miranda, A., Castillo, M., & Weintraub, A. (2023). C2F K: An Open-Source Wildfire Simulator Based on Cell2Fire and the Chilean KITRAL System. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4384499>

Chávez, R., Pérez, M., Fuentes, S., Castro, G., Álvarez, L., & Castillo, M. (2024). Mega-Incendio Valparaíso Febrero 2024: Primeras imágenes satelitales revelan la magnitud y severidad del evento. En *Laboratorio de Geoinformación y Percepción Remota PUCV*.

https://www.pucv.cl/uuaa/site/docs/20240209/20240209151003/incendio_valpo_2024_v01.pdf

Christakis, G. (2021). 2018 Attica wildfires: the intersection of governance failures and climate change. HPHR. 2021; 31. DOI:10.54111/0001/EE14. <https://hphr.org/31-article-christakis/>

CONAF. (2023). Estadísticas históricas. Recuperado de <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

CONAF. (s. f.). *Programa de Protección contra Incendios Forestales: Plan estratégico 2022-2026*. Gerencia de Protección contra Incendios Forestales. Recuperado 10 de junio de 2024, de <https://www.conaf.cl/incendios/>

Corporación Nacional Forestal. (2015). *Wildfire Analyst: Funcionarios se capacitan en simulador de incendios forestales* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=E_W_6OY0hhs

Cortafuegos: Peritaje & Ingeniería. (s. f.). Incendios & Carga Combustible. <https://cortafuegos.cl/2020/10/14/incendios-carga-combustible/#:~:text=La%20carga%20combustible%20de%20un,incendio%20si%20fuese%20consumido%20totalmente.>

Corvalán, F. (2024). *Estos son los incendios forestales más devastadores en Chile desde que existe registro*. La Tercera. Recuperado 20 de mayo de 2024, de <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/estos-son-los-incendios-forestales-mas-devastadores-en-chile-desde-que-existe-registro/5EOM54EJUVCLXP6DM7KZGRGSEU/>

de Groot, W.J. 1993. *Examples of fuel types in the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System*. Forestry Canada, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/234327>

Dirección General De Aeronáutica Civil. (s. f.). *Servicios Climáticos*. Dirección Meteorológica de Chile. Recuperado 9 de junio de 2024, de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>

Environmental Defense Fund. (s. f.). What does a hotter planet mean for wildfires? <https://www.edf.org/climate/heres-how-climate-change-affects-wildfires>

Finney, M. A. (1998). *FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation (RMRS-RP-4)*. U.S. Departamento de Agricultura de EE.UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación de Rocky Mountain. <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>

Forestry Canada. 1992. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. Forestry Canada, Sede Central, Grupo de Peligro de Incendios y

Dirección de Ciencia y Desarrollo Sostenible, Ottawa. Documento Informativo ST-X-3. 64 p. <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/235421>

Generalitat Valenciana. (s. f.). *Modelos de combustible*. Prevención de Incendios Forestales y Sensibilización. Recuperado 9 de junio de 2024, de <https://cjusticia.gva.es/es/web/prevencion-de-incendios/models-de-combustible#:~:text=Los%20modelos%20de%20combustible%20forestal,y%20la%20longitud%20de%20llama>.

Global Forest Watch. (s. f.). Australia Deforestation Rates & Statistics. Recuperado 17 de abril de 2024, de <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/AUS/?category=fires>

González, E. (2024). Christian Little: El incendio que acecha al director de la Conaf. *La Tercera*, 34-36.

González, P. (2023). Estadísticas de los Incendios Forestales: Período 2016-2022. En Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34008/3/Estadistica_Incendios_Forestales.pdf

Hagelin, H., & Cluzel, M. (2016). *Applying FARSITE and Prometheus on the Västmanland Fire, Sweden (2014): Fire Growth Simulation as a Measure Against Forest Fire Spread* [Tesis de grado, Universidad de Lund]. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8881384&fileId=8881395>

Hirsch, K. G. (1996). *Canadian Forest Fire Behaviour Prediction (FBP) System: User's Guide*. Canadian Forest Service. https://www.frames.gov/documents/catalog/hirsch_1996.pdf

IDE Minagri. (s. f.). Incendio de Magnitud (Polígonos – CONAF) [Conjunto de datos]. <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/21/desastres/>

Julio, G., Castillo, E., & Pedernera, P. (1995). *Modelación de Combustibles*, en Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en control de Incendios Forestales, Santiago de Chile. 8-10 de noviembre de 1995., pag 111-127. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Manejo de Recursos Forestales.

Julio, G., Pedernera, P., & Castillo, E. (1995). *Diseño Funcional del Simulador de incendios forestales*, en Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales. Santiago de Chile: Ministerio de Agricultura, 182–204.

López, F. (2019). Simulación de propagación de un incendio forestal mediante modelación numérica (WRF-FIRE) con datos de combustibles creados con teledetección (LANDSAT 8

y MODIS). Aplicación al incendio en la Región del Maule (Chile) entre el 21 y 26 de enero del 2017. [Tesis de grado, Universidad de Concepción]. <https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2019/07/tesis-Fernanda-L%C3%B3pez.pdf>

MacCarthy, J., Richter, J., Tyukavina, S., Weisse, M., & Harris, N. (2023). The Latest Data Confirms: Forest Fires Are Getting Worse. World Resources Institute. Recuperado 10 de abril de 2024, de <https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires>

Martínez, C., Inzunza, S., Guerrero, N., & Bonet, M. (2024). Informe de Daños: Evento Incendios 02 y 03 de febrero de 2024, Viña del Mar (Región de Valparaíso). En *Centro de Investigación Para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres*. Recuperado 20 de mayo de 2024, de <https://www.cigiden.cl/informe-de-danos-evento-incendios-02-y-03-de-febrero-de-2024-vina-del-mar-region-de-valparaiso/>

Mineduc. (s. f.). Incendio Valparaíso. UNAGRID. Recuperado 16 de abril de 2024, de <https://emergenciaydesastres.mineduc.cl/incendio-valparaiso/>

Missoula Fire Sciences Laboratory. (s. f.). *FlamMap*. Recuperado 5 de junio de 2024, de <https://www.firelab.org/project/flammap>

National Museum of Australia. (2023). Black Saturday bushfires. National Museum Of Australia. <https://www.nma.gov.au/defining-moments/resources/black-saturday-bushfires>

Pais, C., Carrasco, J., Martell, D. L., Weintraub, A., & Woodruff, D. L. (2021). Cell2Fire: A Cell-Based Forest Fire Growth Model to Support Strategic Landscape Management Planning. *Frontiers In Forests And Global Change*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.692706>

Pausas, J. (2012). *Incendios forestales: Una visión desde la ecología*. Los Libros de la Catarata. <http://hdl.handle.net/10261/56575>

Richards, G. D. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, 30(6), 1163-1179. <https://doi.org/10.1002/nme.1620300606>

San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P., Liberta`, G., Oom, D., Branco, A., De Rigo, D., Suarez Moreno, M., Ferrari, D., Roglia, E., Scionti, N. and Broglia, M. (2024). Advance report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2023. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/74873. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137375>

Scott, J., & Burgan, R. (2005). *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model* (RMRS-GTR-153). United States Department of Agriculture. <https://cjusticia.gva.es/documents/162905929/169203680/Scott+y+Burgan+2005/df81fd60-a003-421a-9366-a2d210633e08>

Seli, R. C., Brittain, S., & McHugh, C. W. (2023). *FlamMap Online Help (Version 6.2)* [Disponible desde la aplicación]. <https://owfflammaphelp62.firenet.gov/index.htm?#t=What's New in FlamMap v6.0.htm>

Statista. (2024). Number of wildfires in South America in 2023, by country or territory. <https://www.statista.com/statistics/1043895/number-wildfires-south-america-country/>

Thompson, M. P., & Calkin, D. E. (2011). Uncertainty and risk in wildland fire management: A review. *Journal Of Environmental Management*, 92(8), 1895-1909. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.015>

Tymstra, C., Bryce, R. W., Wotton, B. M., Taylor, S. W., & Armitage, O. B. (2010). *Development and structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model* (NOR-X-417). Canada, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. <https://publications.gc.ca/site/eng/380448/publication.html>

Tyukavina, A., Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Stehman, S. V., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X., Wang, L., & Harris, N. L. (2022). Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019. *Frontiers In Remote Sensing*, 3, 825190. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190>

US EPA. (2024, 2 febrero). Climate Change Indicators: Wildfires. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-wildfires#ref2>

USGCRP (2017). Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment (NCA4), Volume I. U.S. Global Change Research Program. DOI: 10.7930/J0J964J6.

Valencia, J. (2024). *A 2 meses de incendios en Valparaíso: 133 cuerpos de víctimas han sido entregados a sus familias*. BioBioChile. Recuperado 20 de mayo de 2024, de <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-valparaiso/2024/04/10/a-2-meses-de-incendios-en-valparaiso-133-cuerpos-de-victimas-han-sido-entregados-a-sus-familias.shtml>

10 ANEXOS

Anexo 1: Parámetros de los modelos de combustible.

1. Parámetros del sistema FBP (Tymstra *et al.*, 2010).

Fuel type	a_{ROS}^a	b_{ROS}^a	c_{ROS}^a	BUI_0^b	q^c	Max. BE^d	CBH^e (m)	CFL^f (kg/m ²)
C-1	90	0.0649	4.50	72	0.90	1.076	2.0	0.75
C-2	110	0.0282	1.50	64	0.70	1.321	3.0	0.80
C-3	110	0.0444	3.00	62	0.75	1.261	8.0	1.15
C-4	110	0.0293	1.50	66	0.80	1.184	4.0	1.20
C-5	30	0.0697	4.00	56	0.80	1.220	18.0	1.20
C-6	30	0.0800	3.00	62	0.80	1.197	7.0	1.80
C-7	45	0.0305	2.00	106	0.85	1.134	10.0	0.50
D-1	30	0.0232	1.60	32	0.90	1.179	NA ^k	NA
M-1/M-2 ^g	C-2 110 D-1 30	C-2 0.0282 D-1 0.0232	C-2 1.50 D-1 1.60	50	0.80	1.250	6.0	0.80
M-3 ^h	M-3 120 D-1 30	M-3 0.0572 D-1 0.0232	M-3 1.40 D-1 1.60	50	0.80	1.250	6.0	0.80
M-4 ^h	M-4 100 D-1 30	M-4 0.0404 D-1 0.0232	M-4 1.48 D-1 1.60	50	0.80	1.250	6.0	0.80
O-1a ^{ij}	190	0.0310	1.40	1	1.00	1.000	NA	NA
O-1b ^{ij}	250	0.0350	1.70	1	1.00	1.000	NA	NA
S-1	75	0.0297	1.30	38	0.75	1.460	NA	NA
S-2	40	0.0438	1.70	63	0.75	1.256	NA	NA
S-3	55	0.0829	3.20	31	0.75	1.590	NA	NA

^aRate-of-spread (ROS) parameter value specific to each fuel type. a_{ROS} , b_{ROS} , and c_{ROS} parameters for M-3 and M-4 fuel types apply when the percentage of dead fir is 100%.

^b BUI = Buildup Index.

^c q = proportion of maximum rate of spread at BUI equal to 50.

^d BE = Buildup Effect.

^e CBH = crown base height.

^f CFL = crown fuel load.

^gVariable % conifer values apply for the M-1 and M2 fuel types.

^hVariable % dead fir values apply for the M-3 and M-4 fuel types.

ⁱVariable % grass cure values apply for O-1a and O-1b fuel types.

^jVariable grass fuel load values (kg/m²) apply for the O-1a and O-1b fuel types.

^kNA= not applicable.

2. Parámetros de los modelos estándar de comportamiento del fuego (Scott & Burgan, 2005).

Fuel model code	Fuel load (t/ac)					Fuel model type ^a	SAV ratio (1/ft) ^b			Fuel bed depth (ft)	Dead fuel extinction moisture (percent)	Heat content BTU/lb) ^c
	1-hr	10-hr	100-hr	Live herb	Live woody		Dead 1-hr	Live herb	Live woody			
GR1	0.10	0.00	0.00	0.30	0.00	dynamic	2200	2000	9999	0.4	15	8000
GR2	0.10	0.00	0.00	1.00	0.00	dynamic	2000	1800	9999	1.0	15	8000
GR3	0.10	0.40	0.00	1.50	0.00	dynamic	1500	1300	9999	2.0	30	8000
GR4	0.25	0.00	0.00	1.90	0.00	dynamic	2000	1800	9999	2.0	15	8000
GR5	0.40	0.00	0.00	2.50	0.00	dynamic	1800	1600	9999	1.5	40	8000
GR6	0.10	0.00	0.00	3.40	0.00	dynamic	2200	2000	9999	1.5	40	9000
GR7	1.00	0.00	0.00	5.40	0.00	dynamic	2000	1800	9999	3.0	15	8000
GR8	0.50	1.00	0.00	7.30	0.00	dynamic	1500	1300	9999	4.0	30	8000
GR9	1.00	1.00	0.00	9.00	0.00	dynamic	1800	1600	9999	5.0	40	8000
GS1	0.20	0.00	0.00	0.50	0.65	dynamic	2000	1800	1800	0.9	15	8000
GS2	0.50	0.50	0.00	0.60	1.00	dynamic	2000	1800	1800	1.5	15	8000
GS3	0.30	0.25	0.00	1.45	1.25	dynamic	1800	1600	1600	1.8	40	8000
GS4	1.90	0.30	0.10	3.40	7.10	dynamic	1800	1600	1600	2.1	40	8000
SH1	0.25	0.25	0.00	0.15	1.30	dynamic	2000	1800	1600	1.0	15	8000
SH2	1.35	2.40	0.75	0.00	3.85	N/A	2000	9999	1600	1.0	15	8000
SH3	0.45	3.00	0.00	0.00	6.20	N/A	1600	9999	1400	2.4	40	8000
SH4	0.85	1.15	0.20	0.00	2.55	N/A	2000	1800	1600	3.0	30	8000
SH5	3.60	2.10	0.00	0.00	2.90	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH6	2.90	1.45	0.00	0.00	1.40	N/A	750	9999	1600	2.0	30	8000
SH7	3.50	5.30	2.20	0.00	3.40	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH8	2.05	3.40	0.85	0.00	4.35	N/A	750	9999	1600	3.0	40	8000
SH9	4.50	2.45	0.00	1.55	7.00	dynamic	750	1800	1500	4.4	40	8000
TU1	0.20	0.90	1.50	0.20	0.90	dynamic	2000	1800	1600	0.6	20	8000
TU2	0.95	1.80	1.25	0.00	0.20	N/A	2000	9999	1600	1.0	30	8000
TU3	1.10	0.15	0.25	0.65	1.10	dynamic	1800	1600	1400	1.3	30	8000
TU4	4.50	0.00	0.00	0.00	2.00	N/A	2300	9999	2000	0.5	12	8000
TU5	4.00	4.00	3.00	0.00	3.00	N/A	1500	9999	750	1.0	25	8000
TL1	1.00	2.20	3.60	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	30	8000
TL2	1.40	2.30	2.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	25	8000
TL3	0.50	2.20	2.80	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	20	8000
TL4	0.50	1.50	4.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL5	1.15	2.50	4.40	0.00	0.00	N/A	2000	9999	1600	0.6	25	8000
TL6	2.40	1.20	1.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	25	8000
TL7	0.30	1.40	8.10	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL8	5.80	1.40	1.10	0.00	0.00	N/A	1800	9999	9999	0.3	35	8000
TL9	6.65	3.30	4.15	0.00	0.00	N/A	1800	9999	1600	0.6	35	8000
SB1	1.50	3.00	11.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB2	4.50	4.25	4.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB3	5.50	2.75	3.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.2	25	8000
SB4	5.25	3.50	5.25	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	2.7	25	8000

^a Fuel model type does not apply to fuel models without live herbaceous load.

^b The value 9999 was assigned in cases where there is no load in a particular fuel class or category

^c The same heat content value was applied to both live and dead fuel categories.

3. Parámetros de los modelos de combustible de Chile (Julio *et al.*, 1995b). VPL = Velocidad de Propagación Lineal.

CLAVE MODELOS	DESCRIPCION DE MODELOS DE COMBUSTIBLES	FACTOR VPL (metros/seg) *
PCH1	Pastizales Mesomórficos Densos	0,018880
PCH2	Pastizales Mesomórficos Ralos	0,016027
PCH3	Pastizales Higromórficos Densos	0,010235
PCH4	Pastizales Higromórficos Ralos	0,008690
PCH5	Chacarera, Viñedos y Frutales	0,001009
MT01	Matorrales y Arbustos Mesomórficos Densos	0,007603
MT02	Matorrales y Arbustos Mesomórficos Medios y Ralos	0,008147
MT03	Matorrales y Arbustos Higromórficos Densos	0,001672
MT04	Matorrales y Arbustos Higromórficos Medios y Ralos	0,004886
MT05	Formaciones con predominancia de Chusquea spp	0,010321
MT06	Formaciones con predominancia de Ulex spp	0,009234
MT07	Renovales Nativos diferentes al Tipo Siempreverde	0,001787
MT08	Renovales Nativos del Tipo Siempreverde	0,004342
BN01	Formaciones con predominancia de Alerzales	0,002249
BN02	Formaciones con predominancia de Araucaria	0,001441
BN03	Arbolado Nativo Denso	0,000979
BN04	Arbolado Nativo de Densidad Media	0,001556
BN05	Arbolado Nativo de Densidad Baja	0,002365
PL01	Plantaciones Coníferas Nuevas (0-3) sin Manejo	0,013174
PL02	Plantaciones Coníferas Jóvenes (4-11) sin Manejo	0,005973
PL03	Plantaciones Coníferas Adultas (12-17) sin Manejo	0,002481
PL04	Plantaciones Coníferas Mayores (>17) sin Manejo	0,002712
PL05	Plantaciones Coníferas Jóvenes (4-11) con Manejo	0,006516
PL06	Plantaciones Coníferas Adultas (12-17) con Manejo	0,003255
PL07	Plantaciones Coníferas Mayores (>17) sin Manejo	0,002596
PL08	Plantaciones Eucaliptos Nuevas (0-3)	0,009777
PL09	Plantaciones Eucaliptos Jóvenes (4-10)	0,005429
PL10	Plantaciones Eucalipto Adultas (>10)	0,003799
PL11	Plantaciones Latifoliadas y Mixtas	0,001325
DX01	Desechos Explotación a Tala Rasa de Plantaciones	0,002134
DX02	Desechos Explotación a Tala Rasa de Bosque Nativo	0,001903

* Valores en Terrenos Plano, sin Viento y Contenido de Humedad de 15 % para las Partículas Finas y Muertas (1 - 10 Horas Tiempo de Retardación).

MODELO DE COMBUSTIBLE	COMBUSTIBLE DISPONIBLE (Kg/m ²)	PODER CALORICO SUPERIOR (Kilocal/Kg)	RESISTENCIA AL CONTROL (*) (m/hombre/hora)
PCH1	0,918	3328	58
PCH2	0,617	3928	74
PCH3	0,684	3928	86
PCH4	0,527	3928	110
PCH5	0,649	3800	88
MT01	2,923	4693	9
MT02	1,910	4693	66
MT03	3,308	4572	10
MT04	1,383	4572	52
MT05	3,029	5000	34
MT06	3,529	5087	7
MT07	3,189	4500	15
MT08	1,903	4500	50
BN01	2,624	4600	42
BN02	2,310	4550	43
BN03	3,544	4452	26
BN04	2,164	4452	39
BN05	1,954	4452	46
PL01	0,838	4399	70
PL02	3,019	4870	32
PL03	3,333	4870	22
PL04	3,249	4870	18
PL05	4,087	4870	36
PL06	3,714	4870	44
PL07	4,063	4870	48
PL08	0,905	4372	62
PL09	3,164	4816	37
PL10	2,742	4816	30
PL11	2,464	4684	41
DX01	8,250	4746	8
DX02	7,125	4652	9

(*) Basado en el Rendimiento de Cuadrillas Terrestres en la Construcción de Líneas, de 50 a 120 cm de Ancho, en Terrenos Planos y con Herramientas Manuales.

Anexo 2: Ecuaciones del sistema FBP relacionadas a las tasas de propagación (Forestry Canada, 1992)

1. Tasa de propagación de frente (*Head fire rate of spread / Rate of spread*)

$$ROS = a \times \left[1 - e^{(-b \times ISI)} \right]^c \times CF$$

Donde:

a, b y c = Constantes de los modelos de combustible

ISI = Índice de propagación inicial (*Initial Spread Index*)

CF = Coeficiente de curado del césped (*Grass curing coefficient*)

2. Tasa de propagación hacia atrás (*Back fire rate of spread*)

$$BROS = a \times \left(1 - e^{-b \times BISI} \right)^c \times BE$$

Donde:

a, b y c = Constantes de los modelos de combustible

BISI = Índice de propagación inicial asociado a la tasa de propagación hacia atrás

BE = Efecto de acumulación (*Buildup Effect*)

3. Tasa de propagación de flanco (*Flank fire rate of spread*)

$$FRS = \frac{ROS + BROS}{LB \times 2}$$

Donde:

a, b y c = Constantes de los modelos de combustible

ROS = Tasa de propagación de frente

BROS = Tasa de propagación hacia atrás

LB = Relación longitud/ancho (*Length-to-breadth ratio*)

4. Efecto de acumulación ("Buildup Effect")

$$\mathbf{BE} = e \left[50 \times \ln(q) \times \left(\frac{1}{\mathbf{BUI}} - \frac{1}{\mathbf{BUI}_0} \right) \right]$$

Donde:

BUI = Índice de acumulación ("Buildup Index")

BUI₀ = Índice de acumulación promedio del modelo de combustible

q = Proporción de la tasa de propagación máxima posible que se alcanza en un BUI estándar

Anexo 3: Información meteorológica incendio Lo Moscoso

Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del viento [km/h]	Dirección del viento [°]	Precipitaciones [mm]	Cobertura de nubes [%]
17-11-2016	15	32	20	12.964	180	0	0
17-11-2016	16	33.8	11	12.964	180	0	0
17-11-2016	17	34.2	9	27.78	210	0	0
17-11-2016	18	33.1	17	33.336	180	0	0
17-11-2016	19	32.3	15	31.484	180	0	0
17-11-2016	20	32.1	13	25.928	180	0	0
17-11-2016	21	30.6	12	35.188	180	0	0
17-11-2016	22	29.7	15	27.78	180	0	0
17-11-2016	23	27.1	21	24.076	180	0	37.5
18-11-2016	0	20.9	42	7.408	193	0	0
18-11-2016	1	18.8	50	7.408	211	0	0
18-11-2016	2	15.3	66	7.408	182	0	0
18-11-2016	3	14	75	3.704	207	0	0
18-11-2016	4	13.1	81	3.704	212	0	0
18-11-2016	5	12.4	91	3.704	219	0	0
18-11-2016	6	11.4	88	5.556	91	0	0
18-11-2016	7	11.7	85	3.704	283	0	0
18-11-2016	8	11.3	95	5.556	288	0	0
18-11-2016	9	11.9	98	11.112	312	0	0
18-11-2016	10	12.3	98	14.816	325	0	0
18-11-2016	11	12.6	97	14.816	338	0	0
18-11-2016	12	13.3	92	18.52	360	0	100
18-11-2016	13	14.3	87	22.224	360	0	100
18-11-2016	14	14.7	86	25.928	360	0	100
18-11-2016	15	14.7	86	29.632	330	0	100
18-11-2016	16	14.7	87	33.336	330	0	100
18-11-2016	17	14.6	89	33.336	340	0	100
18-11-2016	18	15.1	84	29.632	330	0	100
18-11-2016	19	15.8	80	25.928	330	0	100
18-11-2016	20	16.6	73	25.928	340	0	62.5
18-11-2016	21	15.9	77	22.224	330	0	37.5
18-11-2016	22	15.3	78	18.52	330	0	12.5
18-11-2016	23	14.5	78	11.112	330	0	37.5
19-11-2016	0	12.8	84	3.704	330	0	0
19-11-2016	1	12.4	86	1.852	315	0	0
19-11-2016	2	11.5	93	0	0	0	0
19-11-2016	3	11.3	93	1.852	74	0	0
19-11-2016	4	10.9	94	1.852	53	0	0
19-11-2016	5	11.4	94	1.852	29	0	0
19-11-2016	6	10.9	97	0	0	0	0
19-11-2016	7	11.1	98	3.704	338	0	0
19-11-2016	8	11.1	98	3.704	6	0	0
19-11-2016	9	11.8	98	5.556	4	0	0
19-11-2016	10	12	99	5.556	2	0	0
19-11-2016	11	12.3	99	7.408	356	0	0
19-11-2016	12	12.9	99	11.112	350	0	100
19-11-2016	13	14.7	86	12.964	360	0	100
19-11-2016	14	15.5	79	12.964	330	0	100
19-11-2016	15	16.5	70	14.816	340	0	87.5

Anexo 4: Información meteorológica incendio Cuesta LLampaquillo

Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del viento [km/h]	Dirección del viento [°]	Precipitaciones [mm]	Cobertura de nubes [%]
15-11-2019	11	18.5	48.1	5.556	147	0	0
15-11-2019	12	21.8	39	5.556	180	0	37.5
15-11-2019	13	26.2	28	16.668	190	0	12.5
15-11-2019	14	27.1	24	20.372	190	0	0
15-11-2019	15	29	20	25.928	190	0	0
15-11-2019	16	30	25	29.632	190	0	0
15-11-2019	17	30.6	27	29.632	190	0	0
15-11-2019	18	28.1	31	31.484	190	0	0
15-11-2019	19	30.1	26	29.632	190	0	0
15-11-2019	20	29	30	38.892	200	0	0
15-11-2019	21	25.2	41	42.596	190	0	0
15-11-2019	22	23.8	46	37.04	180	0	0
15-11-2019	23	21.7	52	37.04	180	0	0
16-11-2019	0	18.8	62.5	9.26	143	0	0
16-11-2019	1	17.9	66.6	14.816	158	0	0
16-11-2019	2	17.5	68	12.964	157	0	0
16-11-2019	3	17.3	68.5	3.704	131	0	0
16-11-2019	4	18.4	62.5	5.556	141	0	0
16-11-2019	5	18.8	57.5	7.408	143	0	0
16-11-2019	6	19.2	52.7	11.112	150	0	0
16-11-2019	7	18.5	56.4	5.556	106	0	0
16-11-2019	8	17	66.2	3.704	137	0	0
16-11-2019	9	17.1	67.7	5.556	147	0	0
16-11-2019	10	17	69.2	5.556	163	0	0
16-11-2019	11	19.8	61.6	5.556	158	0	0
16-11-2019	12	21.8	56	18.52	190	0	0
16-11-2019	13	23.5	51	12.964	190	0	0
16-11-2019	14	27	36	16.668	210	0	0
16-11-2019	15	25.9	40	22.224	200	0	0
16-11-2019	16	25.9	41	22.224	180	0	0
16-11-2019	17	24.2	46	27.78	200	0	0
16-11-2019	18	23.8	47	27.78	180	0	0
16-11-2019	19	24.9	36	27.78	180	0	0
16-11-2019	20	23.9	26	27.78	190	0	0
16-11-2019	21	24.2	20	27.78	180	0	0
16-11-2019	22	21.8	24	18.52	180	0	0
16-11-2019	23	19	38	14.816	200	0	0
17-11-2019	0	13.8	73.7	9.26	140	0	0
17-11-2019	1	12.7	75.7	9.26	149	0	0
17-11-2019	2	11.7	80.4	11.112	152	0	0
17-11-2019	3	11.5	77.1	7.408	155	0	0
17-11-2019	4	11.9	67.7	11.112	157	0	0
17-11-2019	5	11.9	66.1	9.26	148	0	0
17-11-2019	6	11.4	71.2	11.112	152	0	0
17-11-2019	7	11	70.3	3.704	153	0	0
17-11-2019	8	10.7	71.7	7.408	160	0	0
17-11-2019	9	9.7	75	1.852	38	0	0
17-11-2019	10	8.7	83.6	1.852	82	0	0
17-11-2019	11	11.8	66.3	3.704	149	0	0

Anexo 5: Información meteorológica Incendio La Engorda

Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del viento [km/h]	Dirección del viento [°]	Precipitaciones [mm]	Cobertura de nubes [%]
14-01-2021	20	22.1	46	11.112	210	0	0
14-01-2021	21	21.2	44	16.668	180	0	0
14-01-2021	22	19.2	49	24.076	160	0	0
14-01-2021	23	17.4	58	27.78	170	0	0
15-01-2021	0	14.8	64	14.816	160	0	0
15-01-2021	1	13.8	60	7.408	163	0	0
15-01-2021	2	12.8	71	11.112	163	0	0
15-01-2021	3	12.7	73	9.26	157	0	0
15-01-2021	4	12.3	72	1.852	147	0	0
15-01-2021	5	13.4	55	3.704	151	0	0
15-01-2021	6	13.3	52	1.852	163	0	0
15-01-2021	7	13.3	45	1.852	63	0	0
15-01-2021	8	13.2	46	3.704	160	0	0
15-01-2021	9	12.6	52	1.852	68	0	0
15-01-2021	10	14.3	47	3.704	148	0	0
15-01-2021	11	15.3	45	3.704	156	0	0
15-01-2021	12	18.1	40	12.964	170	0	0
15-01-2021	13	21.6	35	14.816	200	0	0
15-01-2021	14	24.1	30	20.372	190	0	0
15-01-2021	15	25.9	23.4	24.076	200	0	0
15-01-2021	16	27.6	22	22.224	180	0	0
15-01-2021	17	26.7	25.5	33.336	180	0	0
15-01-2021	18	26.7	29.6	29.632	200	0	0
15-01-2021	19	24.6	40	46.3	200	0	0
15-01-2021	20	23.3	44.5	37.04	180	0	0
15-01-2021	21	21.1	49	46.3	180	0	0
15-01-2021	22	19.7	45.3	37.04	190	0	0
15-01-2021	23	18.1	51	33.336	160	0	0
16-01-2021	0	15.4	58	9.26	152	0	0
16-01-2021	1	13.9	71	9.26	139	0	0
16-01-2021	2	13.2	77	12.964	162	0	0
16-01-2021	3	12.5	77	3.704	157	0	0
16-01-2021	4	11.5	81	1.852	140	0	0
16-01-2021	5	10.6	86	0	0	0	0
16-01-2021	6	9.8	92	0	0	0	0
16-01-2021	7	10.6	87	3.704	170	0	0
16-01-2021	8	10.3	87	0	0	0	0
16-01-2021	9	10.4	85	0	0	0	0
16-01-2021	10	10.4	85	0	0	0	0
16-01-2021	11	13.2	72	0	0	0	0
16-01-2021	12	17.7	54	9.26	160	0	0
16-01-2021	13	16.6	62	9.26	280	0	0
16-01-2021	14	16.7	62	9.26	280	0	0
16-01-2021	15	16.8	63	14.816	340	0	0
16-01-2021	16	19	57	12.964	350	0	0
16-01-2021	17	21.4	46	11.112	220	0	0
16-01-2021	18	23	45	9.26	220	0	0
16-01-2021	19	26.1	32	12.964	220	0	0
16-01-2021	20	26.4	31	22.224	180	0	0
16-01-2021	21	22.9	35	24.076	160	0	0

Anexo 6: Información meteorológica Mega Incendio Valparaíso 2024

Fecha	Hora	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]	Velocidad del viento [km/h]	Dirección del viento [°]	Precipitaciones [mm]	Cobertura de nubes [%]
02-02-2024	12	31.3	30	25.928	160	0	0
02-02-2024	13	32.5	28	22.224	200	0	0
02-02-2024	14	31.8	31	22.224	210	0	0
02-02-2024	15	31.6	32	24.076	190	0	0
02-02-2024	16	30.2	37	33.336	210	0	0
02-02-2024	17	29.4	38	35.188	210	0	0
02-02-2024	18	26.8	42	48.152	190	0	0
02-02-2024	19	25.6	35	24.076	165	0	0
02-02-2024	20	24.9	33	14.816	152	0	0
02-02-2024	21	22.5	45.9	11.112	157	0	0
02-02-2024	22	21.5	50	11.112	160	0	0
02-02-2024	23	21.2	48.3	7.408	158	0	0
03-02-2024	0	21.9	45.7	7.408	157	0	0
03-02-2024	1	21.6	47.4	3.704	141	0	0
03-02-2024	2	21.1	51	3.704	144	0	0
03-02-2024	3	21.3	52.6	3.704	148	0	0
03-02-2024	4	21.7	51	7.408	165	0	0
03-02-2024	5	21.2	51.9	5.556	148	0	0
03-02-2024	6	21.5	50.9	5.556	148	0	0
03-02-2024	7	20.9	53.1	5.556	153	0	0
03-02-2024	8	21.1	55.2	3.704	171	0	0
03-02-2024	9	22.6	51	14.816	160	0	0
03-02-2024	10	26.2	40	16.668	190	0	0
03-02-2024	11	29.2	33	18.52	200	0	0
03-02-2024	12	30.7	32	20.372	200	0	0
03-02-2024	13	30.5	35	29.632	170	0	0
03-02-2024	14	32.1	29	31.484	210	0	0
03-02-2024	15	31.1	28	33.336	190	0	0
03-02-2024	16	29.8	32	33.336	180	0	0
03-02-2024	17	27.4	36	35.188	180	0	0
03-02-2024	18	26.2	37	33.336	170	0	0
03-02-2024	19	25.1	40	33.336	170	0	0
03-02-2024	20	22	43	25.928	190	0	0
03-02-2024	21	19.8	51.4	11.112	171	0	0
03-02-2024	22	17.5	61.3	3.704	131	0	0
03-02-2024	23	16	69.8	7.408	113	0	0
04-02-2024	0	16	71.5	0	0	0	0
04-02-2024	1	15.2	80.5	3.704	310	0	0
04-02-2024	2	15.2	85.6	5.556	316	0	0
04-02-2024	3	14.5	89.9	5.556	318	0	0
04-02-2024	4	13.8	91.5	3.704	285	0	0
04-02-2024	5	13.7	93.4	3.704	268	0	0
04-02-2024	6	13.8	95.7	7.408	338	0	0
04-02-2024	7	13.8	96.6	7.408	332	0	0
04-02-2024	8	13.9	96.4	12.964	333	0	0
04-02-2024	9	14.1	96	12.964	350	0	0
04-02-2024	10	14.7	94	12.964	360	0	0
04-02-2024	11	15	95	18.52	10	0	0
04-02-2024	12	16.4	86	18.52	10	0	100

Anexo 7: Resultados del análisis de sensibilidad de las variables meteorológicas

Viento [km/h]	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion logística)	Error	Derivada [ha/(km/h)]	Sensibilidad normalizada
10	23,89	5,36	343,25	-	-
20	74,33	41,59	1071,60	12,55	3,20
30	261,42	256,34	25,89	25,97	2,79
32	365,87	353,29	158,47	54,70	4,90
34	485,44	475,12	106,52	66,73	4,62
36	629,72	620,21	90,29	76,80	4,28
38	785,15	782,34	7,91	82,72	3,34
40	905,36	951,09	2091,78	82,98	3,42
42	1094,73	1114,26	381,21	77,52	3,27
44	1246,30	1261,16	220,87	67,72	2,69
46	1399,27	1385,15	199,45	55,77	2,32
48	1528,07	1484,24	1921,23	43,72	1,48
50	1587,74	1560,02	768,17	19,56	0,47
60	1708,33	1718,91	112,01	9,23	0,28
70	1748,99	1744,58	19,44	1,47	0,06
80	1736,94	1748,35	130,08	0,22	-0,03
90	1736,26	1748,90	159,76	0,03	-0,05
100	1717,10	1748,97	1015,84	-	-
Suma error			8823,76		

Temperatura [°C]	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion exponencial)	Error	Derivada [ha/°C]	Sensibilidad normalizada
5	17,49	14,38	9,67	-	-
10	22,58	23,78	1,43	2,49	0,88
15	37,45	39,32	3,50	4,12	1,39
20	57,33	65,02	59,03	6,82	2,27
25	102,63	107,52	23,91	11,28	2,81
30	172,79	177,80	25,12	15,70	2,71
32	211,91	217,43	30,43	22,02	3,20
34	257,54	265,88	69,67	25,53	3,40
35	289,14	294,02	23,82	29,63	4,45
36	331,03	325,14	34,75	34,53	4,41
38	410,71	397,60	171,84	40,27	4,32
40	517,66	486,22	988,64	49,24	4,34
42	635,53	594,58	1676,55	60,22	3,70
44	741,52	727,09	208,23	69,82	3,23
45	798,68	804,05	28,83	81,02	4,81
46	912,38	889,14	540,24	94,42	5,28
48	1113,09	1087,30	664,85	110,12	4,03
50	1286,18	1329,63	1887,97	-	-
Suma error			6448,47		

Humedad Relativa [%]	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion exponencial)	Error	Derivada [ha/%]	Sensibilidad normalizada
0	4507,15	4911,60	163582,57	-	-
2	3664,45	4177,03	262731,67	-339,82	-0,17
4	3273,43	3552,32	77774,56	-289,00	-0,26
6	2818,94	3021,04	40842,13	-245,78	-0,44
8	2447,40	2569,21	14838,40	-209,02	-0,54
10	2162,36	2184,96	511,05	-177,76	-0,72
12	1824,93	1858,18	1105,75	-151,17	-0,99
14	1557,89	1580,28	501,34	-128,56	-1,08
16	1343,27	1343,93	0,44	-109,34	-1,20
18	1156,43	1142,94	182,09	-92,98	-1,32
20	1005,13	972,00	1097,80	-59,21	-1,16
30	455,71	432,40	543,40	-38,98	-2,65
40	198,69	192,36	40,11	-17,34	-3,59
50	99,23	85,57	186,60	-7,71	-3,81
60	47,28	38,07	84,80	-3,43	-4,66
70	25,74	16,93	77,57	-1,53	-4,93
80	11,05	7,53	12,39	-0,68	-8,10
90	3,37	3,35	0,00	-0,30	-13,85
100	0,67	1,49	0,68	-	-
Suma error			564113,33		

Anexo 8: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos de combustible

Parámetro: a	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion lineal)	Error	Derivada [ha/a]	Sensibilidad normalizada
30	68,05	67,02	1,05	-	-
50	92,72	90,58	4,59	1,18	0,66
70	116,76	114,14	6,85	1,18	0,72
90	140,79	137,70	9,56	1,18	0,73
110	162,39	161,26	1,28	1,18	0,69
130	181,60	184,81	10,31	1,18	0,81
150	207,83	208,37	0,30	1,18	0,71
170	220,99	231,93	119,66	1,18	0,66
190	242,14	255,49	178,16	1,18	1,25
210	284,75	279,05	32,58	1,18	1,21
230	307,82	302,60	27,21	1,18	0,91
250	333,21	326,16	49,68	-	-
Suma error			441,22		

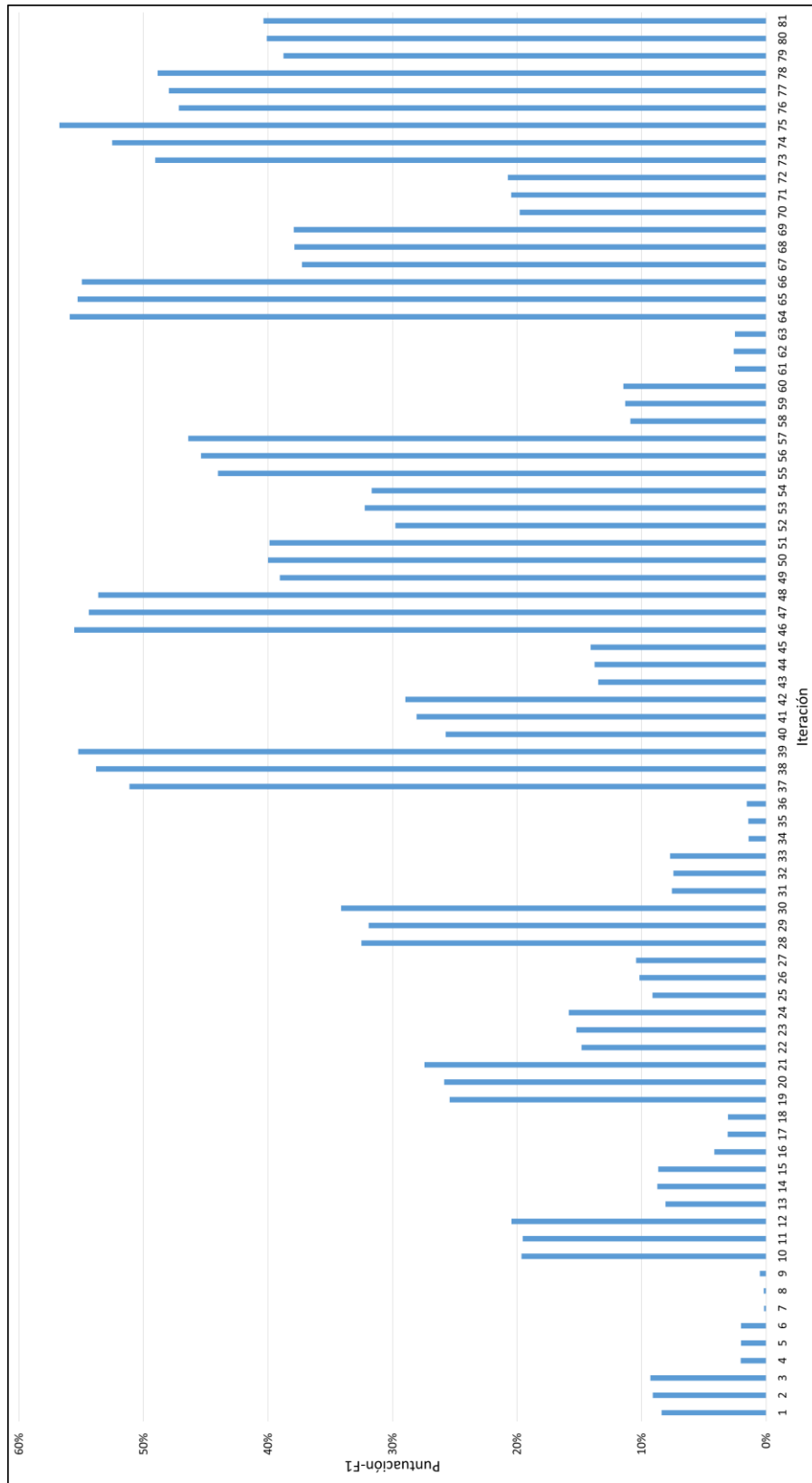
Parámetro: b	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion polinómica)	Error	Derivada [ha/b]	Sensibilidad normalizada
0,02	36,51	39,71	10,21	-	-
0,025	68,64	63,30	28,59	4819,10	1,85
0,03	87,40	87,90	0,25	5022,40	1,48
0,035	111,87	113,52	2,73	5225,70	1,63
0,04	139,35	140,16	0,66	5429,00	1,61
0,045	167,84	167,81	0,00	5632,30	1,55
0,05	197,32	196,48	0,70	5835,60	1,44
0,055	224,66	226,17	2,27	6038,90	1,48
0,06	257,84	256,87	0,93	6242,20	1,74
0,065	299,26	288,59	113,92	6445,50	1,12
0,07	309,31	321,33	144,41	6648,80	1,08
0,075	347,18	355,08	62,39	6852,10	2,09
0,08	406,06	389,85	263,02	7055,40	1,38
0,085	416,97	425,63	74,94	7258,70	1,19
0,09	464,61	462,43	4,73	-	-
Suma error			709,77		

Parámetro: c	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion potencial)	Error	Derivada [ha/c]	Sensibilidad normalizada
1,25	513,47	553,96	1638,86	-	-
1,5	407,98	426,04	326,24	-425,45	-1,21
1,75	348,91	341,23	58,93	-289,00	-1,29
2	279,26	281,54	5,21	-207,23	-1,35
2,25	254,72	237,62	292,56	-154,74	-1,10
2,5	217,14	204,17	168,23	-119,27	-1,48
2,75	190,42	177,99	154,54	-94,29	-1,58
3	162,39	157,03	28,73	-76,11	-1,72
3,25	143,77	139,93	14,71	-62,52	-1,71
3,5	124,65	125,77	1,26	-52,12	-1,70
3,75	113,54	113,87	0,11	-44,00	-1,57
4	100,84	103,77	8,59	-37,56	-1,65
4,25	92,76	95,09	5,42	-32,38	-1,85
4,5	80,59	87,58	48,79	-	-
Suma error			2752,17		

Parámetro: q	Área [ha] (Simulada)	Área [ha] (funcion lineal)	Error	Derivada [ha/q]	Sensibilidad normalizada
0,7	163,33	161,60	3,02	-	-
0,72	160,98	162,56	2,50	48,44	-0,06
0,74	162,82	163,53	0,51	48,44	0,45
0,76	164,92	164,50	0,18	48,44	0,22
0,78	164,71	165,47	0,58	48,44	0,16
0,8	166,26	166,44	0,03	48,44	0,50
0,82	168,90	167,41	2,22	48,44	0,08
0,84	166,91	168,38	2,15	48,44	0,29
0,86	171,20	169,35	3,45	48,44	0,42
0,88	170,22	170,31	0,01	48,44	-0,08
0,9	170,60	171,28	0,47	-	-
Suma error			15,13		

Anexo 9: Resultados del estudio de adaptación del modelo de combustible C-3

Iteración	Valores de los parámetros utilizados				Área total [ha]	TP [ha]	FN [ha]	FP [ha]	F1
	a	b	c	q					
1	30	0,0232	1,3	0,75	86,90	74,34	1610,86	12,55	8,39%
2	30	0,0232	1,3	0,875	93,53	80,87	1604,34	12,66	9,09%
3	30	0,0232	1,3	1	95,32	82,66	1602,54	12,66	9,29%
4	30	0,0232	2,9	0,75	29,90	17,41	1667,80	12,49	2,03%
5	30	0,0232	2,9	0,875	29,83	17,33	1667,87	12,49	2,02%
6	30	0,0232	2,9	1	29,76	17,26	1667,94	12,49	2,01%
7	30	0,0232	4,5	0,75	13,89	1,40	1683,80	12,48	0,17%
8	30	0,0232	4,5	0,875	14,15	1,67	1683,54	12,48	0,20%
9	30	0,0232	4,5	1	16,73	4,25	1680,96	12,48	0,50%
10	30	0,05305	1,3	0,75	197,98	184,90	1500,30	13,08	19,64%
11	30	0,05305	1,3	0,875	197,10	183,88	1501,32	13,22	19,54%
12	30	0,05305	1,3	1	206,86	193,54	1491,66	13,32	20,46%
13	30	0,05305	2,9	0,75	84,10	71,44	1613,77	12,66	8,07%
14	30	0,05305	2,9	0,875	90,11	77,44	1607,77	12,67	8,72%
15	30	0,05305	2,9	1	89,49	76,84	1608,37	12,65	8,66%
16	30	0,05305	4,5	0,75	48,48	35,97	1649,24	12,52	4,15%
17	30	0,05305	4,5	0,875	39,19	26,67	1658,53	12,52	3,09%
18	30	0,05305	4,5	1	38,97	26,45	1658,75	12,52	3,07%
19	30	0,0829	1,3	0,75	260,74	247,18	1438,03	13,56	25,40%
20	30	0,0829	1,3	0,875	265,97	252,23	1432,97	13,74	25,85%
21	30	0,0829	1,3	1	284,24	270,25	1414,95	13,99	27,44%
22	30	0,0829	2,9	0,75	148,87	136,01	1549,20	12,86	14,83%
23	30	0,0829	2,9	0,875	153,06	140,12	1545,09	12,94	15,24%
24	30	0,0829	2,9	1	159,13	146,04	1539,16	13,09	15,84%
25	30	0,0829	4,5	0,75	93,79	81,19	1604,01	12,59	9,13%
26	30	0,0829	4,5	0,875	103,59	90,95	1594,25	12,64	10,17%
27	30	0,0829	4,5	1	106,15	93,51	1591,70	12,64	10,44%
28	140	0,0232	1,3	0,75	345,22	329,90	1355,31	15,32	32,50%
29	140	0,0232	1,3	0,875	338,83	323,02	1362,18	15,80	31,92%
30	140	0,0232	1,3	1	368,79	350,43	1334,78	18,36	34,12%
31	140	0,0232	2,9	0,75	79,49	66,81	1618,39	12,68	7,57%
32	140	0,0232	2,9	0,875	78,31	65,72	1619,49	12,59	7,45%
33	140	0,0232	2,9	1	80,66	68,06	1617,15	12,60	7,71%
34	140	0,0232	4,5	0,75	24,43	11,94	1673,27	12,49	1,40%
35	140	0,0232	4,5	0,875	24,76	12,27	1672,94	12,49	1,43%
36	140	0,0232	4,5	1	25,87	13,38	1671,83	12,49	1,56%
37	140	0,05305	1,3	0,75	762,87	625,99	1059,22	136,88	51,14%
38	140	0,05305	1,3	0,875	814,16	672,56	1012,64	141,60	53,82%
39	140	0,05305	1,3	1	870,12	705,89	979,32	164,23	55,25%
40	140	0,05305	2,9	0,75	266,65	251,03	1434,17	15,62	25,72%
41	140	0,05305	2,9	0,875	293,28	277,61	1407,59	15,67	28,06%
42	140	0,05305	2,9	1	303,68	288,05	1397,15	15,63	28,97%
43	140	0,05305	4,5	0,75	136,32	122,83	1562,37	13,48	13,49%
44	140	0,05305	4,5	0,875	139,28	125,75	1559,45	13,53	13,79%
45	140	0,05305	4,5	1	142,57	128,87	1556,34	13,71	14,10%
46	140	0,0829	1,3	0,75	1107,52	775,76	909,45	331,76	55,56%
47	140	0,0829	1,3	0,875	1184,25	780,26	904,94	403,99	54,38%
48	140	0,0829	1,3	1	1369,96	819,20	866,00	550,75	53,63%
49	140	0,0829	2,9	0,75	511,74	428,94	1256,27	82,80	39,05%
50	140	0,0829	2,9	0,875	539,26	444,84	1240,37	94,43	39,99%
51	140	0,0829	2,9	1	534,60	442,67	1242,53	91,93	39,88%
52	140	0,0829	4,5	0,75	313,56	297,65	1387,56	15,92	29,78%
53	140	0,0829	4,5	0,875	355,77	328,83	1356,37	26,94	32,22%
54	140	0,0829	4,5	1	343,04	321,22	1363,98	21,82	31,67%
55	250	0,0232	1,3	0,75	602,93	503,67	1181,54	99,26	44,02%
56	250	0,0232	1,3	0,875	648,63	529,56	1155,65	119,07	45,38%
57	250	0,0232	1,3	1	661,94	544,59	1140,61	117,35	46,40%
58	250	0,0232	2,9	0,75	110,83	97,96	1587,24	12,87	10,91%
59	250	0,0232	2,9	0,875	114,80	101,90	1583,31	12,90	11,32%
60	250	0,0232	2,9	1	116,18	103,26	1581,95	12,93	11,46%
61	250	0,0232	4,5	0,75	33,99	21,48	1663,73	12,51	2,50%
62	250	0,0232	4,5	0,875	34,90	22,38	1662,82	12,51	2,60%
63	250	0,0232	4,5	1	33,99	21,47	1663,73	12,52	2,50%
64	250	0,05305	1,3	0,75	1315,58	839,06	846,15	476,52	55,92%
65	250	0,05305	1,3	0,875	1414,98	857,05	828,16	557,94	55,29%
66	250	0,05305	1,3	1	1421,95	853,55	831,66	568,40	54,94%
67	250	0,05305	2,9	0,75	482,02	403,99	1281,22	78,03	37,28%
68	250	0,05305	2,9	0,875	499,71	413,75	1271,45	85,96	37,87%
69	250	0,05305	2,9	1	500,87	414,73	1270,48	86,14	37,94%
70	250	0,05305	4,5	0,75	202,39	186,69	1498,51	15,70	19,78%
71	250	0,05305	4,5	0,875	209,64	193,98	1491,23	15,66	20,47%
72	250	0,05305	4,5	1	211,90	196,83	1488,38	15,08	20,75%
73	250	0,0829	1,3	0,75	2039,54	913,62	771,58	1125,91	49,06%
74	250	0,0829	1,3	0,875	2165,12	1011,01	674,20	1154,11	52,52%
75	250	0,0829	1,3	1	2320,79	1136,68	548,53	1184,11	56,75%
76	250	0,0829	2,9	0,75	748,07	573,71	1111,49	174,36	47,16%
77	250	0,0829	2,9	0,875	778,20	590,66	1094,54	187,54	47,96%
78	250	0,0829	2,9	1	798,55	606,90	1078,30	191,65	48,87%
79	250	0,0829	4,5	0,75	533,20	429,89	1255,32	103,31	38,76%
80	250	0,0829	4,5	0,875	569,65	452,10	1233,10	117,55	40,10%
81	250	0,0829	4,5	1	582,24	457,54	1227,67	124,70	40,36%



Anexo 10: Análisis de regresión lineal de los parámetros a, b, c y q

1. Parametrización de los valores considerados

Iteración	a	b	c	q	A	B	C	Q	F1
1	30	0,0232	1,3	0,75	-1	-1	-1	-1	8,39
2	30	0,0232	1,3	0,875	-1	-1	-1	0	9,09
3	30	0,0232	1,3	1	-1	-1	-1	1	9,29
4	30	0,0232	2,9	0,75	-1	-1	0	-1	2,03
5	30	0,0232	2,9	0,875	-1	-1	0	0	2,02
6	30	0,0232	2,9	1	-1	-1	0	1	2,01
7	30	0,0232	4,5	0,75	-1	-1	1	-1	0,17
8	30	0,0232	4,5	0,875	-1	-1	1	0	20,96
9	30	0,0232	4,5	1	-1	-1	1	1	50,96
10	30	0,05305	1,3	0,75	-1	0	-1	-1	19,64
11	30	0,05305	1,3	0,875	-1	0	-1	0	19,54
12	30	0,05305	1,3	1	-1	0	-1	1	20,46
13	30	0,05305	2,9	0,75	-1	0	0	-1	8,07
14	30	0,05305	2,9	0,875	-1	0	0	0	8,72
15	30	0,05305	2,9	1	-1	0	0	1	8,66
16	30	0,05305	4,5	0,75	-1	0	1	-1	4,15
17	30	0,05305	4,5	0,875	-1	0	1	0	3,09
18	30	0,05305	4,5	1	-1	0	1	1	3,07
19	30	0,0829	1,3	0,75	-1	1	-1	-1	25,41
20	30	0,0829	1,3	0,875	-1	1	-1	0	25,85
21	30	0,0829	1,3	1	-1	1	-1	1	27,44
22	30	0,0829	2,9	0,75	-1	1	0	-1	14,83
23	30	0,0829	2,9	0,875	-1	1	0	0	15,24
24	30	0,0829	2,9	1	-1	1	0	1	15,84
25	30	0,0829	4,5	0,75	-1	1	1	-1	9,13
26	30	0,0829	4,5	0,875	-1	1	1	0	10,18
27	30	0,0829	4,5	1	-1	1	1	1	10,44
28	140	0,0232	1,3	0,75	0	-1	-1	-1	32,51
29	140	0,0232	1,3	0,875	0	-1	-1	0	31,92
30	140	0,0232	1,3	1	0	-1	-1	1	34,12
31	140	0,0232	2,9	0,75	0	-1	0	-1	7,58
32	140	0,0232	2,9	0,875	0	-1	0	0	7,45
33	140	0,0232	2,9	1	0	-1	0	1	7,71
34	140	0,0232	4,5	0,75	0	-1	1	-1	1,41
35	140	0,0232	4,5	0,875	0	-1	1	0	1,43
36	140	0,0232	4,5	1	0	-1	1	1	1,56
37	140	0,05305	1,3	0,75	0	0	-1	-1	51,14
38	140	0,05305	1,3	0,875	0	0	-1	0	53,82
39	140	0,05305	1,3	1	0	0	-1	1	55,25
40	140	0,05305	2,9	0,75	0	0	0	-1	25,72
41	140	0,05305	2,9	0,875	0	0	0	0	28,06
42	140	0,05305	2,9	1	0	0	0	1	28,98
43	140	0,05305	4,5	0,75	0	0	1	-1	13,50
44	140	0,05305	4,5	0,875	0	0	1	0	13,80
45	140	0,05305	4,5	1	0	0	1	1	14,10
46	140	0,0829	1,3	0,75	0	1	-1	-1	55,56
47	140	0,0829	1,3	0,875	0	1	-1	0	54,38
48	140	0,0829	1,3	1	0	1	-1	1	53,63
49	140	0,0829	2,9	0,75	0	1	0	-1	39,05
50	140	0,0829	2,9	0,875	0	1	0	0	39,99
51	140	0,0829	2,9	1	0	1	0	1	39,88
52	140	0,0829	4,5	0,75	0	1	1	-1	29,78
53	140	0,0829	4,5	0,875	0	1	1	0	32,22
54	140	0,0829	4,5	1	0	1	1	1	31,68
55	250	0,0232	1,3	0,75	1	-1	-1	-1	44,02
56	250	0,0232	1,3	0,875	1	-1	-1	0	45,38
57	250	0,0232	1,3	1	1	-1	-1	1	46,41
58	250	0,0232	2,9	0,75	1	-1	0	-1	10,91
59	250	0,0232	2,9	0,875	1	-1	0	0	11,32
60	250	0,0232	2,9	1	1	-1	0	1	11,46
61	250	0,0232	4,5	0,75	1	-1	1	-1	2,51
62	250	0,0232	4,5	0,875	1	-1	1	0	2,61
63	250	0,0232	4,5	1	1	-1	1	1	2,51
64	250	0,05305	1,3	0,75	1	0	-1	-1	55,92
65	250	0,05305	1,3	0,875	1	0	-1	0	55,30
66	250	0,05305	1,3	1	1	0	-1	1	54,94
67	250	0,05305	2,9	0,75	1	0	0	-1	37,28
68	250	0,05305	2,9	0,875	1	0	0	0	37,88
69	250	0,05305	2,9	1	1	0	0	1	37,94
70	250	0,05305	4,5	0,75	1	0	1	-1	19,78
71	250	0,05305	4,5	0,875	1	0	1	0	20,48
72	250	0,05305	4,5	1	1	0	1	1	20,75
73	250	0,0829	1,3	0,75	1	1	-1	-1	49,06
74	250	0,0829	1,3	0,875	1	1	-1	0	52,52
75	250	0,0829	1,3	1	1	1	-1	1	56,75
76	250	0,0829	2,9	0,75	1	1	0	-1	47,16
77	250	0,0829	2,9	0,875	1	1	0	0	47,96
78	250	0,0829	2,9	1	1	1	0	1	48,88
79	250	0,0829	4,5	0,75	1	1	1	-1	38,76
80	250	0,0829	4,5	0,875	1	1	1	0	40,11
81	250	0,0829	4,5	1	1	1	1	1	40,36

2. Ajuste lineal considerando 14 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	b*c	b*q	c*q	a2	b2	c2	q2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	0	-1	0	1	1	0	1	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	1	0	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	0	0	-1	1	0	1	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	1	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	0	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	0	1	1	0	1	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	0	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	0	-1	0	1	1	0	1	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	1	0	1	1	0	1	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	1	0	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	1	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	1	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	1	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	1	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	1	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	1	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	1	0	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1	0	1	1	0	1	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	0	-1	0	1	1	0	1	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	0	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	1	1	0	1	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	0	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	1	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	0	0	-1	1	0	1	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	1	0	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	0	-1	0	1	1	0	1	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,909472799
Coefficiente de determinación R ²	0,827140772
R ² ajustado	0,790473663
Error típico	8,423343189
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	14	22407,82923	1600,559231	22,55811257	7,57004E-20
Residuos	66	4682,878892	70,95271049		
Total	80	27090,70812			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	26,30917037	2,807781063	9,370093244	9,61819E-14	20,7032546	31,91508614	20,7032546	31,91508614
a	10,81994815	1,146271819	9,43925164	7,26253E-14	8,53134262	13,10855368	8,53134262	13,10855368
b	10,08057037	1,146271819	8,794223327	1,00972E-12	7,791964842	12,3691759	7,791964842	12,3691759
c	-11,26374815	1,146271819	-9,826419843	1,51704E-14	-13,55235368	-8,97514262	-13,55235368	-8,97514262
q	1,511303704	1,146271819	1,318451417	0,19190974	-0,777301825	3,799909232	-0,777301825	3,799909232
a*b	5,416433333	1,403890532	3,858159316	0,000262114	2,61347545	8,219391217	2,61347545	8,219391217
a*c	-6,096422222	1,403890532	-4,342519652	4,95706E-05	-8,899380106	-3,293464339	-8,899380106	-3,293464339
a*q	-1,159755556	1,403890532	-0,826101131	0,411723107	-3,962713439	1,643202328	-3,962713439	1,643202328
b*c	0,529722222	1,403890532	0,37732445	0,707143118	-2,273235661	3,332680106	-2,273235661	3,332680106
b*q	-1,120588889	1,403890532	-0,798202469	0,427615793	-3,923546772	1,682368995	-3,923546772	1,682368995
c*q	1,1	1,403890532	0,783536875	0,436114729	-1,702957883	3,902957883	-1,702957883	3,902957883
a2	-5,163311111	1,98540103	-2,60063888	0,011472727	-9,127292165	-1,199330058	-9,127292165	-1,199330058
b2	-1,486111111	1,98540103	-0,748519361	0,456806175	-5,450092165	2,477869942	-5,450092165	2,477869942
c2	5,592177778	1,98540103	2,816648976	0,006394059	1,628196724	9,556158831	1,628196724	9,556158831
q2	0,109466667	1,98540103	0,055135796	0,956196845	-3,854514387	4,07344772	-3,854514387	4,07344772

3. Ajuste lineal considerando 13 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	b*c	b*q	c*q	a2	b2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	0	-1	0	1	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	0	0	-1	1	0	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	0	1	1	0	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	0	-1	0	1	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	1	0	1	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1	0	1	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	0	-1	0	1	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	1	1	0	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	0	0	-1	1	0	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	0	-1	0	1	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,909468422
Coefficiente de determinación R ²	0,82713281
R ² ajustado	0,793591415
Error típico	8,360438631
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	13	22407,61354	1723,66258	24,66005987	1,48657E-20
Residuos	67	4683,094585	69,89693411		
Total	80	27090,70812			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	26,38214815	2,457737941	10,73432106	3,35979E-16	21,47648269	31,28781361	21,47648269	31,28781361
a	10,81994815	1,137711593	9,510273267	4,70726E-14	8,549066304	13,09082999	8,549066304	13,09082999
b	10,08057037	1,137711593	8,860391714	6,80758E-13	7,809688526	12,35145221	7,809688526	12,35145221
c	-11,26374815	1,137711593	-9,900354552	9,60473E-15	-13,53462999	-8,992866304	-13,53462999	-8,992866304
q	1,511303704	1,137711593	1,328371543	0,188562509	-0,75957814	3,782185548	-0,75957814	3,782185548
a*b	5,416433333	1,393406439	3,887188392	0,000235254	2,635182441	8,197684225	2,635182441	8,197684225
a*c	-6,096422222	1,393406439	-4,375193091	4,34341E-05	-8,877673114	-3,31517133	-8,877673114	-3,31517133
a*q	-1,159755556	1,393406439	-0,832316777	0,40818709	-3,941006447	1,621495336	-3,941006447	1,621495336
b*c	0,529722222	1,393406439	0,380163467	0,705026597	-2,25152867	3,310973114	-2,25152867	3,310973114
b*q	-1,120588889	1,393406439	-0,804208204	0,424121086	-3,901839781	1,660662003	-3,901839781	1,660662003
c*q	1,1	1,393406439	0,789432264	0,432644288	-1,681250892	3,881250892	-1,681250892	3,881250892
a2	-5,163311111	1,970574283	-2,620206279	0,010861402	-9,096593843	-1,230028379	-9,096593843	-1,230028379
b2	-1,486111111	1,970574283	-0,754151276	0,453400819	-5,419393843	2,447171621	-5,419393843	2,447171621
c2	5,592177778	1,970574283	2,837841651	0,006004562	1,658895046	9,525460509	1,658895046	9,525460509

4. Ajuste lineal considerando 12 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	b*q	c*q	a2	b2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	1	0	1	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	1	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	0	0	1	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	1	1	0	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	0	-1	1	0	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	1	0	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	1	0	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	-1	1	0	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	1	1	0	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	0	0	1	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	-1	0	1	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	1	0	1	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	0	0	1	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	0	1	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	0	1	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	0	1	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	-1	0	0	1	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	1	-1	0	1	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	-1	1	0	1	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	-1	1	0	1	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	1	-1	0	1	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	1	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	-1	-1	0	1	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	1	0	1	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	0	0	1	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	0	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	0	0	1	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	-1	0	1	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,909263395
Coefficiente de determinación R ²	0,826759922
R ² ajustado	0,796188144
Error típico	8,307682826
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	12	22397,51173	1866,459311	27,04323933	2,9805E-21
Residuos	68	4693,196388	69,01759394		
Total	80	27090,70812			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	26,38214815	2,442229192	10,80248661	2,11922E-16	21,50875567	31,25554062	21,50875567	31,25554062
a	10,81994815	1,130532437	9,570665814	3,18104E-14	8,564005794	13,0758905	8,564005794	13,0758905
b	10,08057037	1,130532437	8,916657354	4,77343E-13	7,824628016	12,33651272	7,824628016	12,33651272
c	-11,26374815	1,130532437	-9,96322421	6,34886E-15	-13,5196905	-9,007805794	-13,5196905	-9,007805794
q	1,511303704	1,130532437	1,336807025	0,185741005	-0,744638651	3,767246058	-0,744638651	3,767246058
a*b	5,416433333	1,384613804	3,911872983	0,000214132	2,653479505	8,179387162	2,653479505	8,179387162
a*c	-6,096422222	1,384613804	-4,40297663	3,87003E-05	-8,859376051	-3,333468394	-8,859376051	-3,333468394
a*q	-1,159755556	1,384613804	-0,837602191	0,405188509	-3,922709384	1,603198273	-3,922709384	1,603198273
b*q	-1,120588889	1,384613804	-0,809315121	0,42115677	-3,883542718	1,64236494	-3,883542718	1,64236494
c*q	1,1	1,384613804	0,794445351	0,429700164	-1,662953829	3,862953829	-1,662953829	3,862953829
a2	-5,163311111	1,958139621	-2,636845226	0,010360148	-9,070717888	-1,255904334	-9,070717888	-1,255904334
b2	-1,486111111	1,958139621	-0,75894032	0,450511023	-5,393517888	2,421295666	-5,393517888	2,421295666
c2	5,592177778	1,958139621	2,855862635	0,005687179	1,684771001	9,499584554	1,684771001	9,499584554

5. Ajuste lineal considerando 11 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	b*q	c*q	a2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	0	0	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	1	0	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	0	0	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	1	1	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	0	-1	1	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	1	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	1	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	-1	1	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	1	1	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	0	0	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	-1	0	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	1	0	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	0	0	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	0	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	0	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	1	-1	0	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	-1	1	0	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	-1	1	0	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	1	-1	0	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	-1	-1	0	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	1	0	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	0	0	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	1	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	1	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	0	0	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	-1	0	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	47,96
78	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,908456108
Coefficiente de determinación R ²	0,825292501
R ² ajustado	0,797440581
Error típico	8,282117859
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	11	22357,75826	2032,523478	29,63144004	7,01938E-22
Residuos	69	4732,94986	68,59347624		
Total	80	27090,70812			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	25,39140741	2,057708726	12,33965094	3,98142E-19	21,28639082	29,496424	21,28639082	29,496424
a	10,81994815	1,127053486	9,600208228	2,43991E-14	8,571537964	13,06835833	8,571537964	13,06835833
b	10,08057037	1,127053486	8,944180997	3,77046E-13	7,832160186	12,32898055	7,832160186	12,32898055
c	-11,26374815	1,127053486	-9,99397836	4,78346E-15	-13,51215833	-9,015337964	-13,51215833	-9,015337964
q	1,511303704	1,127053486	1,340933436	0,184339811	-0,73710648	3,759713888	-0,73710648	3,759713888
a*b	5,416433333	1,380352977	3,923948023	0,000203337	2,662704492	8,170162175	2,662704492	8,170162175
a*c	-6,096422222	1,380352977	-4,416567592	3,62723E-05	-8,850151064	-3,34269338	-8,850151064	-3,34269338
a*q	-1,159755556	1,380352977	-0,840187673	0,403705124	-3,913484397	1,593973286	-3,913484397	1,593973286
b*q	-1,120588889	1,380352977	-0,811813288	0,419690588	-3,874317731	1,633139953	-3,874317731	1,633139953
c*q	1,1	1,380352977	0,796897619	0,428244098	-1,653728842	3,853728842	-1,653728842	3,853728842
a2	-5,163311111	1,9521139	-2,644984553	0,010107529	-9,057671786	-1,268950436	-9,057671786	-1,268950436
c2	5,592177778	1,9521139	2,864678017	0,005526798	1,697817103	9,486538453	1,697817103	9,486538453

6. Ajuste lineal considerando 10 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	c*q	a2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	0	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	0	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	0	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	0	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	1	1	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	0	1	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	-1	1	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	1	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	0	1	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	-1	1	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	0	1	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	1	1	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	0	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	0	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	0	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	0	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	0	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	-1	0	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	1	0	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	1	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	-1	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	1	0	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	-1	0	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	0	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	0	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	0	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	0	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	1	1	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	0	1	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	-1	1	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	0	1	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	-1	1	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	0	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	0	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,907537225
Coefficiente de determinación R ²	0,823623815
R ² ajustado	0,798427217
Error típico	8,261922779
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	10	22312,55236	2231,255236	32,68789766	1,63623E-22
Residuos	70	4778,155761	68,25936801		
Total	80	27090,70812			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	25,39140741	2,052691218	12,36981344	2,77873E-19	21,29744386	29,48537095	21,29744386	29,48537095
a	10,81994815	1,124305284	9,623674554	1,92057E-14	8,577591966	13,06230433	8,577591966	13,06230433
b	10,08057037	1,124305284	8,966043759	3,05152E-13	7,838214188	12,32292655	7,838214188	12,32292655
c	-11,26374815	1,124305284	-10,0184072	3,70195E-15	-13,50610433	-9,021391966	-13,50610433	-9,021391966
q	1,511303704	1,124305284	1,344211155	0,183220433	-0,731052479	3,753659886	-0,731052479	3,753659886
a*b	5,416433333	1,37698713	3,933539549	0,000194724	2,670119099	8,162747568	2,670119099	8,162747568
a*c	-6,096422222	1,37698713	-4,427363256	3,43423E-05	-8,842736456	-3,350107988	-8,842736456	-3,350107988
a*q	-1,159755556	1,37698713	-0,842241391	0,402521302	-3,90606979	1,586558679	-3,90606979	1,586558679
c*q	1,1	1,37698713	0,79884552	0,427082167	-1,646314234	3,846314234	-1,646314234	3,846314234
a2	-5,163311111	1,947353874	-2,651449836	0,009905283	-9,047185948	-1,279436274	-9,047185948	-1,279436274
c2	5,592177778	1,947353874	2,87168031	0,005398404	1,708302941	9,476052614	1,708302941	9,476052614

7. Ajuste lineal considerando 9 grados de libertad

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a*q	a2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	0	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	0	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	-1	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	0	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	1	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	0	1	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	-1	1	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	1	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	-1	1	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	1	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	0	1	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	-1	1	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	0	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	0	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	-1	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	0	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	0	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	0	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	0	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	0	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	0	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	0	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	0	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	0	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	0	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	0	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	-1	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	0	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	0	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	-1	1	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	0	1	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	1	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	-1	1	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	0	1	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	1	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	-1	1	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	0	1	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	1	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	0	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	0	1	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	0	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,906650916
Coefficiente de determinación R ²	0,822015883
R ² ajustado	0,799454516
Error típico	8,240842772
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	9	22268,99236	2474,332484	36,43466664	3,57053E-23
Residuos	71	4821,715761	67,91148959		
Total	80	27090,70812			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	25,39140741	2,047453848	12,40145532	1,93049E-19	21,30890039	29,47391443	21,30890039	29,47391443
a	10,81994815	1,121436658	9,648291834	1,50572E-14	8,583866962	13,05602933	8,583866962	13,05602933
b	10,08057037	1,121436658	8,988978825	2,46022E-13	7,844489184	12,31665156	7,844489184	12,31665156
c	-11,26374815	1,121436658	-10,0440342	2,8532E-15	-13,49982933	-9,027666962	-13,49982933	-9,027666962
q	1,511303704	1,121436658	1,347649636	0,182055768	-0,724777483	3,74738489	-0,724777483	3,74738489
a*b	5,416433333	1,373473795	3,94360151	0,000186186	2,677804368	8,155062298	2,677804368	8,155062298
a*c	-6,096422222	1,373473795	-4,438688414	3,24554E-05	-8,835051187	-3,357793257	-8,835051187	-3,357793257
a*q	-1,159755556	1,373473795	-0,844395837	0,401284512	-3,898384521	1,578873409	-3,898384521	1,578873409
a2	-5,163311111	1,942385269	-2,658232223	0,009698827	-9,036317336	-1,290304886	-9,036317336	-1,290304886
c2	5,592177778	1,942385269	2,879026045	0,005267904	1,719171553	9,465184002	1,719171553	9,465184002

8. Ajuste lineal considerando 8 grados de libertad (mejor correlación obtenida)

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a2	c2	F1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	8,39
2	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	9,09
3	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	9,29
4	-1	-1	0	-1	1	0	1	0	2,03
5	-1	-1	0	0	1	0	1	0	2,02
6	-1	-1	0	1	1	0	1	0	2,01
7	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0,17
8	-1	-1	1	0	1	-1	1	1	20,96
9	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	50,96
10	-1	0	-1	-1	0	1	1	1	19,64
11	-1	0	-1	0	0	1	1	1	19,54
12	-1	0	-1	1	0	1	1	1	20,46
13	-1	0	0	-1	0	0	1	0	8,07
14	-1	0	0	0	0	0	1	0	8,72
15	-1	0	0	1	0	0	1	0	8,66
16	-1	0	1	-1	0	-1	1	1	4,15
17	-1	0	1	0	0	-1	1	1	3,09
18	-1	0	1	1	0	-1	1	1	3,07
19	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	25,41
20	-1	1	-1	0	-1	1	1	1	25,85
21	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	27,44
22	-1	1	0	-1	-1	0	1	0	14,83
23	-1	1	0	0	-1	0	1	0	15,24
24	-1	1	0	1	-1	0	1	0	15,84
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	9,13
26	-1	1	1	0	-1	-1	1	1	10,18
27	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	10,44
28	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	32,51
29	0	-1	-1	0	0	0	0	1	31,92
30	0	-1	-1	1	0	0	0	1	34,12
31	0	-1	0	-1	0	0	0	0	7,58
32	0	-1	0	0	0	0	0	0	7,45
33	0	-1	0	1	0	0	0	0	7,71
34	0	-1	1	-1	0	0	0	1	1,41
35	0	-1	1	0	0	0	0	1	1,43
36	0	-1	1	1	0	0	0	1	1,56
37	0	0	-1	-1	0	0	0	1	51,14
38	0	0	-1	0	0	0	0	1	53,82
39	0	0	-1	1	0	0	0	1	55,25
40	0	0	0	-1	0	0	0	0	25,72
41	0	0	0	0	0	0	0	0	28,06
42	0	0	0	1	0	0	0	0	28,98
43	0	0	1	-1	0	0	0	1	13,50
44	0	0	1	0	0	0	0	1	13,80
45	0	0	1	1	0	0	0	1	14,10
46	0	1	-1	-1	0	0	0	1	55,56
47	0	1	-1	0	0	0	0	1	54,38
48	0	1	-1	1	0	0	0	1	53,63
49	0	1	0	-1	0	0	0	0	39,05
50	0	1	0	0	0	0	0	0	39,99
51	0	1	0	1	0	0	0	0	39,88
52	0	1	1	-1	0	0	0	1	29,78
53	0	1	1	0	0	0	0	1	32,22
54	0	1	1	1	0	0	0	1	31,68
55	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	44,02
56	1	-1	-1	0	-1	-1	1	1	45,38
57	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	46,41
58	1	-1	0	-1	-1	0	1	0	10,91
59	1	-1	0	0	-1	0	1	0	11,32
60	1	-1	0	1	-1	0	1	0	11,46
61	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2,51
62	1	-1	1	0	-1	1	1	1	2,61
63	1	-1	1	1	-1	1	1	1	2,51
64	1	0	-1	-1	0	-1	1	1	55,92
65	1	0	-1	0	0	-1	1	1	55,30
66	1	0	-1	1	0	-1	1	1	54,94
67	1	0	0	-1	0	0	1	0	37,28
68	1	0	0	0	0	0	1	0	37,88
69	1	0	0	1	0	0	1	0	37,94
70	1	0	1	-1	0	1	1	1	19,78
71	1	0	1	0	0	1	1	1	20,48
72	1	0	1	1	0	1	1	1	20,75
73	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	49,06
74	1	1	-1	0	1	-1	1	1	52,52
75	1	1	-1	1	1	-1	1	1	56,75
76	1	1	0	-1	1	0	1	0	47,16
77	1	1	0	0	1	0	1	0	47,96
78	1	1	0	1	1	0	1	0	48,88
79	1	1	1	-1	1	1	1	1	38,76
80	1	1	1	0	1	1	1	1	40,11
81	1	1	1	1	1	1	1	1	40,36

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,905664679
Coefficiente de determinación R ²	0,820228511
R ² ajustado	0,800253901
Error típico	8,224402162
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	8	22220,57117	2777,571397	41,06355586	7,5926E-24
Residuos	72	4870,136947	67,64079093		
Total	80	27090,70812			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	25,39140741	2,043369145	12,42624587	1,37974E-19	21,31802546	29,46478935	21,31802546	29,46478935
a	10,81994815	1,119199374	9,667578804	1,2084E-14	8,588864972	13,05103132	8,588864972	13,05103132
b	10,08057037	1,119199374	9,006947825	2,02743E-13	7,849487194	12,31165355	7,849487194	12,31165355
c	-11,26374815	1,119199374	-10,06411226	2,25292E-15	-13,49483132	-9,032664972	-13,49483132	-9,032664972
q	1,511303704	1,119199374	1,350343592	0,181135178	-0,719779473	3,74238688	-0,719779473	3,74238688
a*b	5,416433333	1,370733694	3,951484784	0,000179365	2,683925655	8,148941011	2,683925655	8,148941011
a*c	-6,096422222	1,370733694	-4,447561368	3,09499E-05	-8,8289299	-3,363914544	-8,8289299	-3,363914544
a2	-5,163311111	1,93851018	-2,663546039	0,009534387	-9,027660529	-1,298961694	-9,027660529	-1,298961694
c2	5,592177778	1,93851018	2,884781228	0,005163852	1,72782836	9,456527195	1,72782836	9,456527195

9. Ajuste lineal con 8 grados de libertad utilizando los valores originales

Iteración	a	b	c	q	a*b	a*c	a2	c2	F1
1	30	0,0232	1,3	0,75	0,696	39	900	1,69	8,39
2	30	0,0232	1,3	0,875	0,696	39	900	1,69	9,09
3	30	0,0232	1,3	1	0,696	39	900	1,69	9,29
4	30	0,0232	2,9	0,75	0,696	87	900	8,41	2,03
5	30	0,0232	2,9	0,875	0,696	87	900	8,41	2,02
6	30	0,0232	2,9	1	0,696	87	900	8,41	2,01
7	30	0,0232	4,5	0,75	0,696	135	900	20,25	0,17
8	30	0,0232	4,5	0,875	0,696	135	900	20,25	20,96
9	30	0,0232	4,5	1	0,696	135	900	20,25	50,96
10	30	0,05305	1,3	0,75	1,5915	39	900	1,69	19,64
11	30	0,05305	1,3	0,875	1,5915	39	900	1,69	19,54
12	30	0,05305	1,3	1	1,5915	39	900	1,69	20,46
13	30	0,05305	2,9	0,75	1,5915	87	900	8,41	8,07
14	30	0,05305	2,9	0,875	1,5915	87	900	8,41	8,72
15	30	0,05305	2,9	1	1,5915	87	900	8,41	8,66
16	30	0,05305	4,5	0,75	1,5915	135	900	20,25	4,15
17	30	0,05305	4,5	0,875	1,5915	135	900	20,25	3,09
18	30	0,05305	4,5	1	1,5915	135	900	20,25	3,07
19	30	0,0829	1,3	0,75	2,487	39	900	1,69	25,41
20	30	0,0829	1,3	0,875	2,487	39	900	1,69	25,85
21	30	0,0829	1,3	1	2,487	39	900	1,69	27,44
22	30	0,0829	2,9	0,75	2,487	87	900	8,41	14,83
23	30	0,0829	2,9	0,875	2,487	87	900	8,41	15,24
24	30	0,0829	2,9	1	2,487	87	900	8,41	15,84
25	30	0,0829	4,5	0,75	2,487	135	900	20,25	9,13
26	30	0,0829	4,5	0,875	2,487	135	900	20,25	10,18
27	30	0,0829	4,5	1	2,487	135	900	20,25	10,44
28	140	0,0232	1,3	0,75	3,248	182	19600	1,69	32,51
29	140	0,0232	1,3	0,875	3,248	182	19600	1,69	31,92
30	140	0,0232	1,3	1	3,248	182	19600	1,69	34,12
31	140	0,0232	2,9	0,75	3,248	406	19600	8,41	7,58
32	140	0,0232	2,9	0,875	3,248	406	19600	8,41	7,45
33	140	0,0232	2,9	1	3,248	406	19600	8,41	7,71
34	140	0,0232	4,5	0,75	3,248	630	19600	20,25	1,41
35	140	0,0232	4,5	0,875	3,248	630	19600	20,25	1,43
36	140	0,0232	4,5	1	3,248	630	19600	20,25	1,56
37	140	0,05305	1,3	0,75	7,427	182	19600	1,69	51,14
38	140	0,05305	1,3	0,875	7,427	182	19600	1,69	53,82
39	140	0,05305	1,3	1	7,427	182	19600	1,69	55,25
40	140	0,05305	2,9	0,75	7,427	406	19600	8,41	25,72
41	140	0,05305	2,9	0,875	7,427	406	19600	8,41	28,06
42	140	0,05305	2,9	1	7,427	406	19600	8,41	28,98
43	140	0,05305	4,5	0,75	7,427	630	19600	20,25	13,50
44	140	0,05305	4,5	0,875	7,427	630	19600	20,25	13,80
45	140	0,05305	4,5	1	7,427	630	19600	20,25	14,10
46	140	0,0829	1,3	0,75	11,606	182	19600	1,69	55,56
47	140	0,0829	1,3	0,875	11,606	182	19600	1,69	54,38
48	140	0,0829	1,3	1	11,606	182	19600	1,69	53,63
49	140	0,0829	2,9	0,75	11,606	406	19600	8,41	39,05
50	140	0,0829	2,9	0,875	11,606	406	19600	8,41	39,99
51	140	0,0829	2,9	1	11,606	406	19600	8,41	39,88
52	140	0,0829	4,5	0,75	11,606	630	19600	20,25	29,78
53	140	0,0829	4,5	0,875	11,606	630	19600	20,25	32,22
54	140	0,0829	4,5	1	11,606	630	19600	20,25	31,68
55	250	0,0232	1,3	0,75	5,8	325	62500	1,69	44,02
56	250	0,0232	1,3	0,875	5,8	325	62500	1,69	45,38
57	250	0,0232	1,3	1	5,8	325	62500	1,69	46,41
58	250	0,0232	2,9	0,75	5,8	725	62500	8,41	10,91
59	250	0,0232	2,9	0,875	5,8	725	62500	8,41	11,32
60	250	0,0232	2,9	1	5,8	725	62500	8,41	11,46
61	250	0,0232	4,5	0,75	5,8	1125	62500	20,25	2,51
62	250	0,0232	4,5	0,875	5,8	1125	62500	20,25	2,61
63	250	0,0232	4,5	1	5,8	1125	62500	20,25	2,51
64	250	0,05305	1,3	0,75	13,2625	325	62500	1,69	55,92
65	250	0,05305	1,3	0,875	13,2625	325	62500	1,69	55,30
66	250	0,05305	1,3	1	13,2625	325	62500	1,69	54,94
67	250	0,05305	2,9	0,75	13,2625	725	62500	8,41	37,28
68	250	0,05305	2,9	0,875	13,2625	725	62500	8,41	37,88
69	250	0,05305	2,9	1	13,2625	725	62500	8,41	37,94
70	250	0,05305	4,5	0,75	13,2625	1125	62500	20,25	19,78
71	250	0,05305	4,5	0,875	13,2625	1125	62500	20,25	20,48
72	250	0,05305	4,5	1	13,2625	1125	62500	20,25	20,75
73	250	0,0829	1,3	0,75	20,725	325	62500	1,69	49,06
74	250	0,0829	1,3	0,875	20,725	325	62500	1,69	52,52
75	250	0,0829	1,3	1	20,725	325	62500	1,69	56,75
76	250	0,0829	2,9	0,75	20,725	725	62500	8,41	47,16
77	250	0,0829	2,9	0,875	20,725	725	62500	8,41	47,96
78	250	0,0829	2,9	1	20,725	725	62500	8,41	48,88
79	250	0,0829	4,5	0,75	20,725	1125	62500	20,25	38,76
80	250	0,0829	4,5	0,875	20,725	1125	62500	20,25	40,11
81	250	0,0829	4,5	1	20,725	1125	62500	20,25	40,36

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,905664679
Coefficiente de determinación R ²	0,820228511
R ² ajustado	0,800253901
Error típico	8,224402162
Observaciones	81

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	8	22220,57117	2777,571397	41,06355586	7,5926E-24
Residuos	72	4870,136947	67,64079093		
Total	80	27090,70812			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	11,73724122	11,00473672	1,066562656	0,289732746	-10,20030049	33,67478294	-10,20030049	33,67478294
a	0,230786333	0,055824311	4,134154603	9,51092E-05	0,119502602	0,342070063	0,119502602	0,342070063
b	106,7647553	69,43756557	1,537564781	0,128538382	-31,65650182	245,1860124	-31,65650182	245,1860124
c	-14,8601936	4,579005175	-3,245288668	0,001781458	-23,98827359	-5,732113615	-23,98827359	-5,732113615
q	12,09042963	8,953594994	1,350343592	0,181135178	-5,758235782	29,93909504	-5,758235782	29,93909504
a*b	1,649591391	0,417461152	3,951484784	0,000179365	0,817397794	2,481784989	0,817397794	2,481784989
a*c	-0,034638763	0,00778826	-4,447561368	3,09499E-05	-0,050164374	-0,019113151	-0,050164374	-0,019113151
a2	-0,00042672	0,000160207	-2,663546039	0,009534387	-0,000746088	-0,000107352	-0,000746088	-0,000107352
c2	2,184444444	0,757230539	2,884781228	0,005163852	0,674932953	3,693955936	0,674932953	3,693955936

Anexo 11: Valores utilizados en los gráficos de contorno de los parámetros a, b y c

	30	41	52	63	74	85	96	107	118	129	a										195	206	217	228	239	250
0.0232	17.0	19.1	21.2	23.1	24.9	26.6	28.3	29.8	31.2	32.5	33.7	34.8	35.8	36.7	37.5	38.1	38.7	39.2	39.6	39.8	38.1	38.7	39.2	39.6	39.8	40.0
0.0262	17.5	19.7	21.7	23.7	25.6	27.4	29.0	30.6	32.1	33.4	34.7	35.8	36.9	37.8	38.7	39.4	40.1	40.6	41.0	41.3	39.4	40.1	40.6	41.0	41.3	41.6
0.0292	17.9	20.2	22.3	24.4	26.3	28.1	29.8	31.5	33.0	34.4	35.7	36.9	38.0	39.0	39.9	40.7	41.4	42.0	42.5	42.8	40.7	41.4	42.0	42.5	42.8	43.1
0.0322	18.4	20.7	22.9	25.0	27.0	28.8	30.6	32.3	33.9	35.3	36.7	38.0	39.1	40.2	41.1	42.0	42.7	43.4	43.9	44.3	42.0	42.7	43.4	43.9	44.3	44.7
0.0351	18.9	21.2	23.5	25.6	27.7	29.6	31.4	33.1	34.8	36.3	37.7	39.0	40.2	41.3	42.4	43.3	44.1	44.7	45.3	45.8	43.3	44.1	44.7	45.3	45.8	46.2
0.0381	19.3	21.7	24.0	26.2	28.3	30.3	32.2	34.0	35.7	37.2	38.7	40.1	41.4	42.5	43.6	44.5	45.4	46.1	46.8	47.3	44.5	45.4	46.1	46.8	47.3	47.8
0.0411	19.8	22.3	24.6	26.9	29.0	31.1	33.0	34.8	36.6	38.2	39.7	41.1	42.5	43.7	44.8	45.8	46.7	47.5	48.2	48.8	45.8	46.7	47.5	48.2	48.8	49.3
0.0441	20.3	22.8	25.2	27.5	29.7	31.8	33.8	35.7	37.5	39.2	40.7	42.2	43.6	44.9	46.0	47.1	48.1	48.9	49.7	50.3	47.1	48.1	48.9	49.7	50.3	50.9
0.0471	20.7	23.3	25.8	28.1	30.4	32.5	34.6	36.5	38.4	40.1	41.7	43.3	44.7	46.0	47.2	48.4	49.4	50.3	51.1	51.8	48.4	49.4	50.3	51.1	51.8	52.4
0.0501	21.2	23.8	26.3	28.8	31.1	33.3	35.4	37.4	39.3	41.1	42.8	44.3	45.8	47.2	48.5	49.6	50.7	51.7	52.5	53.3	49.6	50.7	51.7	52.5	53.3	54.0
0.0531	21.7	24.4	26.9	29.4	31.8	34.0	36.2	38.2	40.2	42.0	43.8	45.4	46.9	48.4	49.7	50.9	52.0	53.1	54.0	54.8	50.9	52.0	53.1	54.0	54.8	55.5
0.0560	22.1	24.9	27.5	30.0	32.4	34.7	37.0	39.1	41.1	43.0	44.8	46.5	48.1	49.5	50.9	52.2	53.4	54.5	55.4	56.3	52.2	53.4	54.5	55.4	56.3	57.1
0.0590	22.6	25.4	28.1	30.6	33.1	35.5	37.7	39.9	42.0	43.9	45.8	47.5	49.2	50.7	52.1	53.5	54.7	55.8	56.9	57.8	53.5	54.7	55.8	56.9	57.8	58.6
0.0620	23.1	25.9	28.6	31.3	33.8	36.2	38.5	40.8	42.9	44.9	46.8	48.6	50.3	51.9	53.4	54.8	56.0	57.2	58.3	59.3	54.8	56.0	57.2	58.3	59.3	60.2
0.0650	23.5	26.4	29.2	31.9	34.5	37.0	39.3	41.6	43.8	45.8	47.8	49.6	51.4	53.1	54.6	56.0	57.4	58.6	59.8	60.8	56.0	57.4	58.6	59.8	60.8	61.7
0.0680	24.0	27.0	29.8	32.5	35.2	37.7	40.1	42.4	44.7	46.8	48.8	50.7	52.5	54.2	55.8	57.3	58.7	60.0	61.2	62.3	57.3	58.7	60.0	61.2	62.3	63.3
0.0710	24.5	27.5	30.4	33.2	35.8	38.4	40.9	43.3	45.6	47.7	49.8	51.8	53.6	55.4	57.0	58.6	60.0	61.4	62.6	63.8	58.6	60.0	61.4	62.6	63.8	64.8
0.0739	24.9	28.0	30.9	33.8	36.5	39.2	41.7	44.1	46.5	48.7	50.8	52.8	54.8	56.6	58.3	59.9	61.4	62.8	64.1	65.3	59.9	61.4	62.8	64.1	65.3	66.4
0.0769	25.4	28.5	31.5	34.4	37.2	39.9	42.5	45.0	47.4	49.6	51.8	53.9	55.9	57.7	59.5	61.2	62.7	64.2	65.5	66.8	61.2	62.7	64.2	65.5	66.8	67.9
0.0799	25.9	29.0	32.1	35.0	37.9	40.6	43.3	45.8	48.3	50.6	52.8	55.0	57.0	58.9	60.7	62.4	64.0	65.6	67.0	68.3	62.4	64.0	65.6	67.0	68.3	69.5
0.0829	26.3	29.6	32.7	35.7	38.6	41.4	44.1	46.7	49.2	51.6	53.8	56.0	58.1	60.1	61.9	63.7	65.4	66.9	68.4	69.8	63.7	65.4	66.9	68.4	69.8	71.0

	30	41	52	63	74	85	96	107	118	129	a										151	162	173	184	195	206	217	228	239	250
1.3	26.3	29.6	32.7	35.7	38.6	41.4	44.1	46.7	49.2	51.6	53.8	56.0	58.1	60.1	61.9	63.7	65.4	66.9	68.4	69.8	71.0									
1.5	24.8	27.9	31.0	33.9	36.8	39.5	42.1	44.7	47.1	49.4	51.7	53.8	55.8	57.7	59.5	61.2	62.8	64.3	65.7	67.0	68.2									
1.6	23.3	26.4	29.4	32.3	35.0	37.7	40.3	42.8	45.1	47.4	49.6	51.6	53.6	55.4	57.2	58.8	60.4	61.8	63.2	64.4	65.5									
1.8	21.9	25.0	27.9	30.7	33.4	36.1	38.6	41.0	43.3	45.5	47.6	49.6	51.5	53.3	55.0	56.6	58.1	59.4	60.7	61.9	62.9									
1.9	20.7	23.7	26.5	29.3	32.0	34.5	37.0	39.3	41.6	43.7	45.8	47.7	49.5	51.3	52.9	54.4	55.8	57.2	58.4	59.5	60.5									
2.1	19.6	22.5	25.3	28.0	30.6	33.1	35.5	37.8	39.9	42.0	44.0	45.9	47.7	49.3	50.9	52.4	53.7	55.0	56.1	57.2	58.1									
2.3	18.5	21.4	24.1	26.8	29.3	31.8	34.1	36.3	38.4	40.5	42.4	44.2	45.9	47.5	49.0	50.4	51.7	52.9	54.0	55.0	55.9									
2.4	17.6	20.4	23.1	25.7	28.2	30.5	32.8	35.0	37.0	39.0	40.9	42.6	44.3	45.8	47.3	48.6	49.8	51.0	52.0	52.9	53.8									
2.6	16.8	19.6	22.2	24.7	27.1	29.4	31.7	33.8	35.8	37.7	39.5	41.2	42.7	44.2	45.6	46.9	48.1	49.1	50.1	51.0	51.8									
2.7	16.2	18.8	21.4	23.8	26.2	28.5	30.6	32.6	34.6	36.4	38.2	39.8	41.3	42.8	44.1	45.3	46.4	47.4	48.3	49.1	49.8									
2.9	15.6	18.2	20.7	23.1	25.4	27.6	29.7	31.6	33.5	35.3	37.0	38.6	40.0	41.4	42.7	43.8	44.9	45.8	46.7	47.4	48.1									
3.1	15.1	17.7	20.1	22.4	24.7	26.8	28.8	30.8	32.6	34.3	35.9	37.4	38.8	40.1	41.3	42.4	43.4	44.3	45.1	45.8	46.4									
3.2	14.8	17.3	19.6	21.9	24.1	26.2	28.1	30.0	31.7	33.4	35.0	36.4	37.8	39.0	40.1	41.2	42.1	42.9	43.7	44.3	44.8									
3.4	14.5	17.0	19.3	21.5	23.6	25.6	27.5	29.3	31.0	32.6	34.1	35.5	36.8	38.0	39.0	40.0	40.9	41.7	42.3	42.9	43.4									
3.5	14.4	16.8	19.0	21.2	23.2	25.2	27.0	28.8	30.4	31.9	33.4	34.7	35.9	37.0	38.1	39.0	39.8	40.5	41.1	41.6	42.0									
3.7	14.4	16.7	18.9	21.0	23.0	24.9	26.6	28.3	29.9	31.4	32.7	34.0	35.2	36.2	37.2	38.1	38.8	39.5	40.0	40.4	40.8									
3.9	14.5	16.7	18.9	20.9	22.8	24.7	26.4	28.0	29.5	30.9	32.2	33.4	34.5	35.5	36.4	37.2	37.9	38.5	39.0	39.4	39.7									
4.0	14.7	16.9	19.0	20.9	22.8	24.6	26.2	27.8	29.2	30.6	31.8	33.0	34.0	35.0	35.8	36.5	37.2	37.7	38.1	38.4	38.6									
4.2	15.0	17.1	19.2	21.1	22.9	24.6	26.2	27.7	29.1	30.4	31.6	32.6	33.6	34.5	35.3	35.9	36.5	37.0	37.3	37.6	37.7									
4.3	15.5	17.5	19.5	21.3	23.1	24.7	26.2	27.7	29.0	30.2	31.4	32.4	33.3	34.1	34.8	35.5	36.0	36.4	36.7	36.9	37.0									
4.5	16.0	18.0	19.9	21.7	23.4	25.0	26.4	27.8	29.1	30.2	31.3	32.3	33.1	33.9	34.5	35.1	35.5	35.9	36.1	36.3	36.3									