



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Agronómica y de Montes

Tesis Doctoral

**INTEGRACIÓN DE VARIABLES Y CRITERIOS
TERRITORIALES COMO APOYO A LA
PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS
FORESTALES. ÁREA PILOTO: VALPARAÍSO –
CHILE CENTRAL.**

Tesis Doctoral presentada por Miguel Castillo Soto, para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba, bajo la Dirección del Doctor Francisco Rodríguez y Silva, Profesor del Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba.

El Doctorando:

Miguel Castillo Soto

El Director de la Tesis:

Profesor Doctor Francisco Rodríguez y Silva

Córdoba, 2013

TITULO: *Integración de variables y criterios territoriales como apoyo a la protección contra incendios forestales. Area piloto: Valparaíso - Chile Central*

AUTOR: *MIGUEL EDUARDO CASTILLO SOTO*

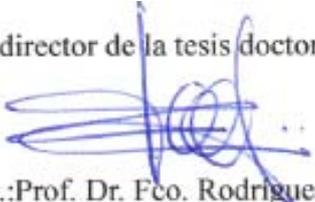
© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

Francisco Rodríguez y Silva, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba, de acuerdo al artículo 34 de las Normas Regulatoras de Doctorado de esta Universidad.

AUTORIZA a D. Miguel Eduardo Castillo Soto, Ingeniero Forestal, para la presentación del trabajo que con el título **“INTEGRACIÓN DE VARIABLES Y CRITERIOS TERRITORIALES COMO APOYO A LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES. ÁREA PILOTO: VALPARAÍSO – CHILE CENTRAL”**, ha sido realizado bajo mi dirección como Tesis para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba.

El director de la tesis doctoral



Fdo.:Prof. Dr. Fco. Rodríguez y Silva

Córdoba (España), 2013.



TÍTULO DE LA TESIS: INTEGRACIÓN DE VARIABLES Y CRITERIOS TERRITORIALES COMO APOYO A LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES. ÁREA PILOTO: VALPARAÍSO – CHILE CENTRAL.

DOCTORANDO/A: Miguel Castillo Soto

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

La tesis doctoral elaborada por don Miguel Castillo Soto, aborda un minucioso estudio de la problemática de incendios forestales en un área piloto de la V Región Metropolitana, centrándose geográficamente en la comarca de Valparaíso. Los objetivos fundamentales planteados en la presente tesis han sido los siguientes:

1. Revisar, cuantificar y cualificar los incendios forestales en Chile con énfasis en la zona central.
2. Estudiar los incendios forestales en áreas de interfaz urbano forestal de igual modo en la zona central de Chile.
3. Desarrollar un modelo matemático para la determinación, tipificación y diagnóstico de la vulnerabilidad frente a incendios forestales
4. Caracterizar la población en áreas de riesgo de incendios forestales. Desarrollando una aplicación a la comarca de Valparaíso.
5. Realizar un análisis económico de la protección en áreas críticas de incendios forestales

Los objetivos iniciales han sido alcanzados, habiéndose logrado tras la conclusión de la tesis, el disponer de un conjunto de algoritmos que ofrecen en su totalidad un conjunto de herramientas de gran utilidad para su aplicación en la determinación de prioridades de defensa en el territorio. En los estudios realizados fueron consideradas variables de gran importancia en la definición y caracterización de la problemática, tales como las comunidades de vegetación nativa, las plantaciones forestales, los vectores de expansión y ocupación territorial de la población y la frecuencia e impacto de los incendios forestales en el territorio. Por otra parte y por primera vez en Chile se inicia una investigación econométrica del efecto de los incendios forestales en términos de cuantificación de daños y perjuicios, costes de extinción, eficiencia y productividad operacional, con el fin de contar con información analítica que permita realizar los ajustes en los modelos de respuestas operacional en el combate de los incendios forestales. Es importante indicar que la filosofía que ha imperado en la investigación realizada, ha sido la de proporcionar procedimiento y métodos para ser utilizados en la gestión por las administraciones e instituciones tanto públicas como privadas con responsabilidad en la protección y defensa del paisaje forestal frente a los incendios.

Finalmente se menciona que en el contexto de los objetivos marcados en la presente tesis han sido elaborados y publicados artículos científicos, algunos de ellos en el marco de publicaciones indexadas (JRC). Se incluyen a continuación la producción científica anteriormente mencionada

a) *Publicaciones in extenso en revistas ISI:*

Castillo M, Garfias R, Julio G, González L. Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. 2012. *Interciencia* 37(11) 796-804. *Capítulo 1*
Castillo M. Identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology. 2012. *Journal of Applied Geography* 35(2012) 199-207. *Capítulo 3*
Castillo M, Molina J-R, Rodríguez y Silva F, Julio G. 2012. Fire vulnerability model in Mediterranean ecosystems of South America. *Ecological Informatics* 13 (106-113). *Capítulo 3*

b) *Libros y capítulos de libros:*

Castillo M, Julio G. Forest fires in wildland-urban interface. Analysis and proposed actions. Case study: Central Chile - South America. 2012. *Wildfire and Community: Facilitating preparedness and resilience*, Springfield, Ill., (hard) ISBN 978-0-398-08842-X (paper) ISBN 978-0-398- 08843-9 (eBook) ISBN 978-0-398-08844-6, Charles C. Thomas Publisher, Australia, 2012, In press.

Capítulos

1, 2, 3 y 4

Rodríguez y Silva.; Julio G.; **Castillo M.**; Molina J.; Herrera M.; Toral M.; Cerda C.; González L. (2010). Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p. ISBN 978-84-693-0740-3.

Capítulo 3

c) *Revistas científicas indexadas y con comité editor:*

Castillo M.; Correa L. 2012. Acciones para la disminución del peligro de incendios forestales. Estudio de caso. Provincia de Valparaíso, Chile Central. *Territorium*. 19. *En prensa. Capítulo 2*

Garfias R.; **Castillo M.**; Ruiz F.; Julio G.; Quintanilla V.; Antúnez J. 2012 Caracterización socioeconómica de la población en áreas de riesgo de incendios forestales. Estudio de caso: interfaz urbano-forestal. Provincia de Valparaíso. Chile Central. *Territorium*. 19. *En prensa.*

Capítulo 4

Castillo M.; Julio G.; Quintanilla V. 2011. Vulnerabilidad y daño potencial ocasionado por incendios en áreas de interfaz urbano-forestal. Provincia de Valparaíso. Chile Central. *Territorium*. 18.

247-254.

Capítulos

1, 2, 3

Castillo M.; Garfias R. 2010. Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. *Geographicalia*, 58. 81-103. *Capítulo 5*

Castillo M. 2010. Daños y efectos del fuego en incendios de vegetación nativa, en paisajes costeros de Chile Central. Estudio de caso: la palma chilena. *Geographicalia*, 57.

107-127.

Capítulo 2

Castillo M.; Rodríguez y Silva F.; Molina J-R. 2009. Situación de los incendios forestales de vegetación nativa en la región de Valparaíso, Chile Central. *Geographicalia*, 56. 89-110. *Capítulo 1*

Quintanilla V.; **Castillo M.** 2009. Degradación de ecosistemas de la palma más austral del mundo (*Jubaea chilensis*), acelerada por los fuegos estivales en los cordones litorales de Valparaíso y Viña del Mar (32°50'-33°02'S). Un caso sostenido de perturbación del paisaje. *Investigaciones Geográficas* 41; 41-60.

Capítulo 1

Castillo M. 2009. Análisis del riesgo y vulnerabilidad antes incendios forestales en áreas de interfaz. Provincia de Valparaíso Chile. *Territorium*, 16. 131-138.

Capítulos

4, 5

d) Presentación en eventos científicos en calidad de artículo in extenso en actas:

Rodríguez y Silva, F.; Molina J.R.; **Castillo, M.** 2012. Aproximación metodológica para la evaluación del impacto económico de los incendios forestales, mediante el uso de teledetección espacial, aplicación mediante el uso de imágenes MODIS. IV Simposio Internacional sobre Política, Planificación y Economía del Fuego. 5 - 11 de noviembre de 2012. Servicio Forestal de Estados Unidos y la Universidad de Chapingo. Ciudad de México. In extenso. En actas.

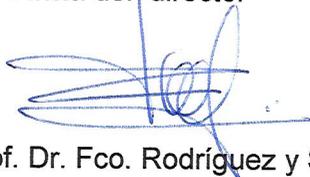
e) Presentación en eventos científicos en calidad de póster:

Castillo, M; Quintanilla, V.; Julio, G. 2009. Patrones espacio-temporales de incendios de vegetación, en la Zona Mediterránea Costera de la Quinta Región de Chile. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires. Argentina. 18-23 Octubre 2009.

Por todo ello y dado que se reúne las condiciones necesarias, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 24 de enero de 2013

Firma del director



Fdo.: Prof. Dr. Fco. Rodríguez y Silva

A Dios

A mi amada mujer, Carolina

A mis padres y abuelita, que ya descansan.

Agradecimientos

Deseo expresar un sincero agradecimiento a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), por aportar los recursos financieros para desarrollar mis estudios de Doctorado. También al personal directivo y administrativo de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile por otorgarme los permisos necesarios para poder estudiar en España, y a la Universidad de Córdoba por otorgarme las facilidades para mi estancia de estudios en el Campus de Rabanales. En particular, agradezco también al personal técnico y administrativo de la UCO que me colaboró en muchas veces que lo necesité.

Agradezco muy sinceramente al Profesor Tutor Dr. Francisco Rodríguez y Silva por permitirme ser parte del equipo de investigación en incendios a través del Proyecto SEVEIF, y con ello, su constante motivación para poder desarrollar y finalizar esta Tesis Doctoral.

También deseo expresar mi gratitud al Profesor Dr. Miguel Ángel Herrera, por todo su apoyo y consejos, que sin dudas permitieron que este trabajo se desarrollara exitosamente.

Especial agradecimiento para el Profesor Dr. Guillermo Julio de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, por su constante apoyo y revisión crítica del documento final. También agradezco enormemente al Profesor Sr. Roberto Garfias por su apoyo y amistad incondicional entregada durante estos cuatro años de esfuerzo. Agradezco además a los Profesores Dr. Manuel Toral y Dr. Luis González por el apoyo y sanos consejos en momentos que los necesité.

Deseo agradecer además, al Profesor Dr. Rafael Navarro, especialmente por nuestras amenas conversaciones de colegas, los consejos que me dio en distintas etapas de la tesis, y especialmente por su amistad. Agradezco que me haya apoyado en actividades complementarias que sin duda sirvieron para mi crecimiento profesional.

Mención especial para el Dr. Sr. Juan Ramón Molina, principalmente por su amistad y generosidad en la transmisión de conocimientos y en la posibilidad de desarrollar investigación conjunta.

Agradezco además al personal profesional, técnico y administrativo de la Unidad de Manejo del Fuego de la Corporación Nacional Forestal (Conaf) de la Región de Valparaíso, especialmente a los Sres. Luis Correa, Leonel Zamorano, Juan Atienza y Raúl Molina. También al Sr. Sergio Mendoza de Conaf Central por su apoyo en datos técnicos.

En mi estancia de doctorado conocí a personas muy valiosas, con las cuales establecí lazos de amistad. Agradezco a todos mis amigos ligados a distintos proyectos de investigación, a profesores de otras áreas, a compañeros del Programa de Doctorado, también de Magíster, y de diversos laboratorios de investigación que fui conociendo durante el transcurso de esta etapa. A todos ellos, muchas gracias por vuestro apoyo y amistad.

Desde la distancia, agradezco además el apoyo incondicional de mis hermanas Rocío y Consuelo, quienes siempre desearon que esta Tesis Doctoral finalizara exitosamente.

En la sección más relevante para mí, no puedo dejar de mencionar el apoyo incondicional de mi esposa Carolina, quien sacrificando parte de su vida y privaciones, ha estado siempre a mi lado. Todo mi amor y gratitud para ti.

INDICE DE MATERIAS

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS | 4 |
| CAPITULO 1.- LOS INCENDIOS FORESTALES EN CHILE. ÉNFASIS EN LA ZONA CENTRAL. | |
| 1.1 El problema de los incendios forestales. Referencias generales. | |
| 1.1.1 <i>Contexto mundial.</i> | 6 |
| 1.1.2 <i>Los incendios forestales en Chile.</i> | 7 |
| 1.1.2.1 <i>Contexto histórico.</i> | 7 |
| 1.1.2.2 <i>Estadísticas generales 1963-2011.</i> | 11 |
| 1.2 Análisis de los incendios en la zona central de Chile | |
| 1.2.1 <i>Síntesis general.</i> | 14 |
| 1.2.2 <i>Cifras específicas por región.</i> | 15 |
| 1.2.3 <i>Comentarios generales.</i> | 19 |
| 1.2.4 <i>Situación de los incendios forestales en vegetación nativa. Chile central.</i> | 22 |
| 1.2.5 <i>Dinámica de la causalidad.</i> | 23 |
| 1.3 Análisis de grandes incendios en la vegetación nativa de la zona central de Chile, período 1976-2010. | |
| 1.3.1 <i>Resumen.</i> | 26 |
| 1.3.2 <i>Referencias generales.</i> | 27 |
| 1.3.3 <i>Métodos utilizados.</i> | 28 |
| 1.3.4 <i>Resultados.</i> | 33 |
| 1.3.5 <i>Discusión.</i> | 38 |
| 1.3.6 <i>Opciones de restauración. Referencias.</i> | 48 |
| 1.3.7 <i>Contexto de la restauración post incendios.</i> | 50 |
| 1.3.8 <i>Etapas de la restauración.</i> | 51 |
| 1.3.9 <i>Iniciativas de restauración post incendios en Chile.</i> | 52 |
| 1.3.10 <i>Diagnóstico de la restauración en el área de estudio. Calificación y propuestas preliminares.</i> | 53 |
| 1.4 Conclusiones del capítulo | 55 |
| 1.5 Referencias | 57 |
| CAPITULO 2.- LOS INCENDIOS FORESTALES EN ÁREAS DE INTERFAZ URBANO FORESTAL. EL CASO DE CHILE. | |
| 2.1 Ocupación Urbana: Interfaz Urbano-Forestal. Referencias generales | 60 |
| 2.2 La interfaz y su relación con los incendios | 62 |
| 2.3 Situación de incendios en interfaz. Zona Centro-Sur de Chile | 67 |
| 2.3.1 <i>Estudio de caso 1: Comuna de Chiguayante. Octava Región de Chile</i> | 70 |
| 2.3.2 <i>Estudio de caso 2: Poblados de Tomé y Dichato. Octava Región de Chile</i> | 72 |
| 2.3.3 <i>Estudio de caso 3: Comuna de Valparaíso. Quinta Región de Chile</i> | 74 |

| | | |
|--|--|------------|
| 2.4 | Acciones para la disminución del peligro de incendios forestales en áreas de interfaz urbano-forestal. Zona Centro-Sur de Chile | 80 |
| 2.4.1 | <i>Propuesta de acciones.</i> | 84 |
| 2.4.1.1 | <i>Línea de acción 1: La inclusión de la población a las labores de manejo de la vegetación combustible.</i> | 84 |
| 2.4.1.2 | <i>Línea de acción 2: La concentración de labores de limpia en áreas periféricas.</i> | 85 |
| 2.4.1.3 | <i>Línea de acción 3: La construcción de cortafuegos perimetrales con maquinaria pesada.</i> | 85 |
| 2.4.1.4 | <i>Línea de acción 4: La poda, desbroce y despeje manual a base de cuadrillas del Municipio.</i> | 86 |
| 2.4.1.5 | <i>Línea de acción 5: Adaptación de barreras cortafuegos en combinación con fines estéticos y paisajísticos.</i> | 87 |
| 2.5 | Consideraciones finales | 88 |
| 2.6 | Referencias | 89 |
| | | |
| CAPITULO 3.- MODELO DE VULNERABILIDAD FRENTE A INCENDIOS FORESTALES | | |
| 3.1 | Referencias generales | 91 |
| 3.2 | Modelo de vulnerabilidad aplicado a la Región de Valparaíso. Chile | 93 |
| 3.2.1 | <i>Materiales y métodos.</i> | 93 |
| 3.2.2 | <i>Resultados.</i> | 99 |
| 3.3 | Discusión del modelo | 103 |
| 3.4 | Un caso especial: el efecto buffer en áreas de interfaz. Desarrollo de un sub-modelo específico | 106 |
| 3.4.1 | <i>Introducción.</i> | 106 |
| 3.4.2 | <i>Materiales y métodos.</i> | 107 |
| 3.4.3 | <i>Resultados.</i> | 113 |
| 3.4.4 | <i>Validación y discusión.</i> | 118 |
| 3.4.5 | <i>Conclusiones del método.</i> | 121 |
| 3.5 | Conclusiones | 122 |
| 3.5.1 | <i>Modelo de vulnerabilidad.</i> | 122 |
| 3.5.2 | <i>Método para el cálculo de áreas de influencia.</i> | 123 |
| 3.5.3 | <i>Comentarios finales.</i> | 123 |
| 3.6 | Referencias | 124 |

CAPITULO 4.- CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN EN ÁREAS DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES. ESTUDIO DE CASO: VALPARAÍSO

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1 | Marco general | 128 |
| 4.2 | Situación de la población en la interfaz de Valparaíso | 130 |
| 4.2.1 | <i>Antecedentes preliminares.</i> | 130 |
| 4.2.2 | <i>Marco conceptual: los incendios de interfaz.</i> | 131 |
| 4.2.3 | <i>Materiales y métodos.</i> | 133 |
| 4.2.4 | <i>Resultados y discusión.</i> | 136 |
| 4.2.5 | <i>Conclusiones.</i> | 143 |
| 4.3 | Referencias | 144 |
| 4.4 | Anexos | 145 |

CAPITULO 5.- ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROTECCIÓN EN ÁREAS CRÍTICAS DE INCENDIOS FORESTALES

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1 | Marco general | 150 |
| 5.2 | Área de estudio | 150 |
| 5.3 | Fase I: Análisis del riesgo y daños ocasionados por incendios, en áreas críticas de ocurrencia | 151 |
| 5.3.1 | <i>Variables del comportamiento del fuego.</i> | 152 |
| 5.3.2 | <i>Comportamiento espectral de la vegetación combustible.</i> | 158 |
| 5.3.3 | <i>Estimación del riesgo de incendios. Análisis ampliado.</i> | 163 |
| 5.3.4 | <i>Estimación de pérdidas directas e indirectas en viviendas.</i> | 171 |
| 5.3.5 | <i>Estimación de pérdidas en vegetación.</i> | 174 |
| 5.3.6 | <i>Comentarios generales.</i> | 189 |
| 5.4 | Fase II: Análisis económico de las fases presentes en el combate de incendios, aplicado a Chile | 191 |
| 5.4.1 | <i>Referencias generales.</i> | 191 |
| 5.4.2 | <i>Determinación de curvas modelo, para la estimación de tiempos en cada fase de combate en relación a la superficie afectada.</i> | 191 |
| 5.4.3 | <i>Análisis de las fases de desarrollo de incendios basada en líneas de defensa y costos de combate, y su comparación con el avance libre del fuego. Estudio de caso.</i> | 204 |
| 5.4.4 | <i>Relaciones entre el daño ocasionado por incendios, y los costos asociados a la extinción.</i> | 214 |
| 5.5 | Análisis econométrico en la eficiencia de extinción | 220 |
| 5.5.a | <i>Valor económico de los recursos naturales.</i> | 221 |
| 5.5.b | <i>Análisis del Factor de Contracción (FCS) en el contexto econométrico.</i> | 222 |
| 5.5.c | <i>Aplicación a los costos reales</i> | 223 |
| 5.5.d | <i>Análisis de productividad</i> | 225 |
| 5.5.e | <i>Segmentación de las pérdidas por tipos de vegetación</i> | 227 |
| 5.5.f | <i>Análisis técnico de la eficiencia</i> | 231 |
| 5.5.g | <i>Propuesta de modelo integrado de evaluación de eficiencia en extinción</i> | 233 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.6 | Conclusiones generales del Capítulo | 234 |
| 5.7 | Referencias | 236 |
| | CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS | 237 |
| | ANEXOS | 241 |

INDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 1

| | | |
|------------------|--|----|
| Cuadro 1.1.2.2.a | Ocurrencia, superficies afectadas y promedios anuales. Últimos 48 años. | 12 |
| Cuadro 1.3.3.a | Escala de abundancia-dominancia de Braun-Blanquet y Bolós (1958). | 30 |
| Cuadro 1.3.3.b | Grados de fidelidad para las especies encontradas en la parcela. Turner <i>et al.</i> (2001). | 31 |
| Cuadro 1.3.4.a | Ocurrencia de incendios forestales y superficies afectadas en Chile (1976-2010). | 33 |
| Cuadro 1.3.4.b | Comparación del comportamiento del fuego. Vegetación nativa quemada. Valores promedio para todos los incendios analizados. | 36 |
| Cuadro 1.3.4.c | Matriz de correlación (Pearson). | 37 |
| Cuadro 1.3.4.d | Contribución de las variables para cada factor (%). F= factores. | 38 |
| Cuadro 1.3.10.a | Calificación del impacto provocado por incendios en vegetación nativa, para cada una de las áreas test. | 54 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|--------------|---|----|
| Cuadro 2.3.a | Resumen de antecedentes recolectados en el estudio de Casas en Zonas de Interfaz. | 78 |
|--------------|---|----|

CAPÍTULO 3

| | | |
|----------------|--|-----|
| Cuadro 3.2.1.a | Ocurrencia de Incendios Forestales en la Zona de Estudio. Período 1997-2010. | 94 |
| Cuadro 3.2.1.b | Factores de entrada para el modelo de vulnerabilidad. | 96 |
| Cuadro 3.2.1.c | Valor promedio de viviendas (construcción y mobiliario), para las dos áreas de interfaz identificadas en el área de estudio. | 98 |
| Cuadro 3.2.2.a | Rangos de clasificación de Jenks para las áreas de ocurrencia de incendios forestales. | 99 |
| Cuadro 3.2.2.b | Correlaciones para el riesgo de incendios, para el área de estudio. | 100 |
| Cuadro 3.2.2.c | Valores de VP e I, de acuerdo al modelo KITRAL. | 100 |
| Cuadro 3.2.2.d | Valores de similitud calculados por el Sistema KITRAL. | 101 |
| Cuadro 3.2.2.e | Valores de la Pérdida Directa la vegetación en la Zona de Estudio. | 101 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Cuadro 3.2.2.f | Rangos de clasificación de Jenks para el valor comercial de los daños. | 102 |
| Cuadro 3.2.2.g | Correlación para el daño comercial a la vegetación. | 102 |
| Cuadro 3.2.2.h | Incendios en áreas de interfaz y su relación con la pérdida directa. | 102 |
| Cuadro 3.2.2.i | Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los datos de interfaz y sus pérdidas. | 103 |
| Cuadro 3.2.2.j | Distribución de las Pérdidas Directas de acuerdo a niveles de daño por hectárea. | 103 |
| Cuadro 3.4.4.a | Características de los incendios al interior del área de validación, mediante fuzzy-gamma. | 119 |
| Cuadro 3.4.4.b | Calificación y densidad de incendios al interior de áreas con buffer regular. | 119 |
| Cuadro 3.4.4.c | Número de incendios contabilizados por niveles de alerta en cada zona de impacto y tipo de caminos. | 120 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|----------------|---|-----|
| Cuadro 4.2.3.a | Caracterización de las cuatro áreas de interfaz urbano-forestal, presentes en las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar. | 134 |
| Cuadro 4.2.3.b | Número de encuestas realizadas en cada uno de los sectores seleccionados. | 135 |
| Cuadro 4.2.4.a | Prueba de Kolmogorov-Smirnov para cada área de Interfaz. | 137 |
| Cuadro 4.2.4.b | Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 1. | 139 |
| Cuadro 4.2.4.c | Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 2. | 139 |
| Cuadro 4.2.4.d | Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 3. | 139 |
| Cuadro 4.2.4.e | Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 4. | 139 |
| Cuadro 4.2.4.f | Tabla de contingencia de las frecuencias observadas por rango e Interfaz. | 140 |
| Cuadro 4.2.4.g | Tabla de contingencia de las frecuencias esperadas por rango e Interfaz. | 140 |
| Cuadro 4.2.4.h | Tabla de residuos estandarizados de Pearson. | 141 |

CAPÍTULO 5

| | | |
|----------------|---|-----|
| Cuadro 5.3.1.a | Valores de Intensidad del fuego, segmentados en 6 clases. | 156 |
| Cuadro 5.3.1.b | Valores de Intensidad del fuego, segmentados en 6 clases. | 157 |
| Cuadro 5.3.2.a | Secuencia de imágenes MODIS para el área bajo estudio. | 159 |
| Cuadro 5.3.2.b | Relación EVI y número de incendios. | 162 |
| Cuadro 5.3.3.a | Base de datos de incendios. Ejemplo para los primeros 18 de 1991 registros. | 164 |
| Cuadro 5.3.3.b | Prueba de comparación de muestras pareadas entre Fuzzy y SEVEIF. | 169 |
| Cuadro 5.3.3.c | Superficie estimada por categorías de impacto, para ambos métodos. | 169 |
| Cuadro 5.3.4 | Valores de pérdidas directas en viviendas, actualizados a | 173 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| | marzo de 2012. | |
| Cuadro 5.3.5.a | Nomenclatura utilizada para el registro de la vegetación afectada por el fuego. | 176 |
| Cuadro 5.3.5.b | Estadísticas de incendios para la vegetación afectada en el área de estudio. | 178 |
| Cuadro 5.3.5.c | Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. | 181 |
| Cuadro 5.3.5.d | Estadísticas de pérdidas para pino radiata, últimos 27 años (1984-1985 / 2010-2011). Pino radiata. | 182 |
| Cuadro 5.3.5.e | Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Eucalyptus. | 183 |
| Cuadro 5.3.5.f | Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Arbolado Nativo. | 185 |
| Cuadro 5.3.5.g | Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Matorral Nativo. | 187 |
| Cuadro 5.3.5.h | Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Pastizales y mezclas de matorral. | 188 |
| Cuadro 5.4.2.1.a | Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño igual o inferior a 1 ha. | 196 |
| Cuadro 5.4.2.1.b | Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño menor o igual a 1 ha. $n=34$. | 196 |
| Cuadro 5.4.2.1.c | Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. | 197 |
| Cuadro 5.4.2.1.d | Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. $n=131$. | 198 |
| Cuadro 5.4.2.1.e | Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. | 199 |
| Cuadro 5.4.2.1.f | Estimaciones estadísticas para los incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. $n=52$. | 200 |
| Cuadro 5.4.2.1.g | Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. | 201 |
| Cuadro 5.4.2.1.h | Estimaciones estadísticas para los incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. $n = 13$. | 201 |
| Cuadro 5.4.2.1.i | Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño superior a 50,00 ha. | 203 |
| Cuadro 5.4.2.1.j | Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño superior a 50 ha. $n=9$. | 203 |
| Cuadro 5.4.3.2.a | Costos de operación en recursos básicos para el combate de incendios forestales en Valparaíso – Chile. | 205 |
| Cuadro 5.4.3.2.b | Parámetros de simulación en KITRAL, necesarios para la recreación del incendio <i>Cerro La Cruz</i> . | 207 |
| Cuadro 5.4.3.2.c | Recreación incendio <i>Cerro La Cruz</i> (14 enero 2008), y análisis comparativo de su evolución con el Sistema KITRAL. | 208 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| Cuadro 5.4.3.2.d | Análisis comparativo de las pérdidas producidas en Cerro La Cruz y lo reportado por KITRAL. | 210 |
| Cuadro 5.4.3.2.e | Cálculo del FCS por etapas de desarrollo. Cerro La Cruz. | 213 |
| Cuadro 5.4.3.2.f | Clasificación de FCS de acuerdo a experiencias de incendios en España. | 214 |
| Cuadro 5.4.4.a | Parámetros y criterios definidos para el análisis de costos presentes en la base de datos de incendios. | 216 |
| Cuadro 5.4.4.b | Distribución de incendios por clase de tamaño (área quemada en hectáreas). | 216 |
| Cuadro 5.5.a | Valores de pérdida (en US\$) por clases de tamaño de incendios. | 221 |
| Cuadro 5.5.b | Costos promedio (en US\$) por clases de tamaño y relación con tipo de recursos para la extinción. | 223 |
| Cuadro 5.5.c | Análisis de costos unitarios para la extinción. | 225 |
| Cuadro 5.5.d | Análisis comparativo de la productividad en extinción | 227 |
| Cuadro 5.5.e.1 | Segmentación de las pérdidas directas de acuerdo a la proporción de superficie afectada. | 228 |
| Cuadro 5.5.e.2 | Matriz de depreciación de recursos afectados por el fuego. | 228 |
| Cuadro 5.5.f | Eficiencia técnica en las operaciones de extinción, segmentada por clases de tamaño de incendios. | 232 |
| Cuadro 5.5.g | Calificación de E_t y número de incendios para el área de estudio. | 234 |

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | | |
|----------------|--|----|
| Figura 1.3.3.a | Área de estudio. | 29 |
| Figura 1.3.4.a | Comunidades de vegetación nativa afectadas por el fuego. | 35 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|----------------|--|----|
| Figura 2.3.1.a | Áreas de interfaz, en donde se han producido graves incendios con daño a viviendas, en áreas críticas de ocurrencia. | 70 |
| Figura 2.3.2.a | Mapa de Prioridades de Protección, aplicado a la Comuna de Tomé y alrededores. | 73 |
| Figura 2.3.3.a | Área de estudio, Zona costa de Valparaíso, Quinta Región de Chile Central. | 75 |
| Figura 2.3.3.b | Zonas críticas de alta densidad de incendios forestales en interfaz urbano forestal. | 76 |
| Figura 2.3.3.c | Puntos reconocidos como de alta conflictividad en incendios de interfaz. | 77 |
| Figura 2.3.3.c | Áreas marcadas en rojo, que corresponden a los valores más alto de peligro y vulnerabilidad. | 79 |
| Figura 2.4.a | Distanciamiento horizontal y vertical que deben considerarse al momento de planificar manejar la vegetación combustible. | 81 |
| Figura 2.4.b | Izquierda: efecto combinado de transferencia de calor hacia todas las direcciones. Derecha: En ausencia de viento y terrenos planos. | 81 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Figuras 2.4.c; 2.4d | Fenómeno de radiación y convección. | 83 |
| CAPÍTULO 3 | | |
| Figura 3.2.1.a | Área de estudio. Región Central de Chile Mediterráneo. | 93 |
| Figura 3.2.1.b | Factores de entrada considerados para el desarrollo de modelo. | 95 |
| Figura 3.2.2.a | Áreas de ocurrencia de incendios forestales, para el área de estudio. | 99 |
| Figura 3.3.a | Resultado del mapa final de vulnerabilidad contra incendios forestales. | 104 |
| Figura 3.4.2.a | Área de estudio. Quinta Región de Chile. | 107 |
| Figura 3.4.2.b | Proceso de selección de incendios, localizados a distintos valores de distancia a contar de los ejes y por tipo de caminos. | 109 |
| Figura 3.4.2.c | Esquema de la metodología propuesta. | 110 |
| Figura 3.4.3.a | Efecto de la función sigmoídea Fuzzy en torno a caminos. | 116 |
| Figura 3.4.3.b | Mapa fuzzy para el área de validación de resultados. | 118 |
| CAPÍTULO 4 | | |
| Figura 4.2.4.a | Tendencias generales a la disposición a pagar por participar en la protección de áreas silvestres. | 142 |
| CAPÍTULO 5 | | |
| Figura 5.2.1 | Área de estudio. Región de Valparaíso. Chile Central. | 151 |
| Figura 5.3.1.a | Valores de Niveles de Intensidad Calórica (NIC) para dos áreas test de la Región de Valparaíso. | 158 |
| Figura 5.3.2.a | Escena MODIS (Aqua) para el año 2004. | 160 |
| Figura 5.3.3.a | Realce de las principales áreas de riesgo de incendios forestales para la zona de Valparaíso. | 167 |
| Figura 5.3.5.a | Modelos de combustibles del Sistema KITRAL. | 177 |
| Figura 5.3.6 | Grados de afectación en vegetación nativa. | 190 |
| Figura 5.4.3.2.a | Visión desde Sur a Norte, de los trabajos realizados en el incendio <i>Cerro La Cruz</i> . | 206 |
| Figura 5.4.3.2.b | Ventana del simulador de incendios forestales KITRAL. | 207 |
| Figura 5.4.3.2.c | Recreación del incendio Cerro La Cruz. | 212 |

INDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 1

| | | |
|-------------------|--|----|
| Gráfico 1.1.2.2.a | Evolución histórica de la ocurrencia de incendios en Chile. Últimos 48 años. | 13 |
| Gráfico 1.2.2.a | Estadística de incendios en la Región de Valparaíso, desde el año 1976. | 16 |
| Gráfico 1.2.2.b | Estadística de incendios en la Región Metropolitana, desde el año 1976. | 17 |
| Gráfico 1.2.2.c | Estadística de incendios en la Región de O'Higgins, desde el | 18 |

| | | |
|------------------------|---|-----|
| | año 1976. | |
| Gráfico 1.2.2.d | Estadística de incendios en la Región del Maule, desde el año 1976. | 19 |
| Gráfico 1.2.3.a | Porcentajes de ocurrencia respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011. | 20 |
| Gráfico 1.2.3.b | Porcentajes de ocurrencia respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011. | 21 |
| Gráfico 1.2.3.c | Porcentajes de vegetación nativa afectada por incendios forestales. Cifras respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011. | 23 |
| Gráfico 1.2.5.a | Síntesis de la causalidad de incendios en Chile. | 24 |
| Gráfico 1.3.4.a | Número de grandes incendios y superficie quemada (vegetación nativa). | 34 |
| Gráficos 1.3.4.a-b | (a) Izquierda: correlación entre el número de parches (NP) y la forma de paisaje (LSI) ($P < 0,05$). (b) Derecha: análisis de residuos entre estos dos factores ($P < 0,05$). | 37 |
| Gráfico 1.3.4.c | Carga factorial para el total de varianza explicada. | 38 |
| CAPÍTULO 3 | | |
| Gráfico 3.4.2.a | Función sigmoídea monótonamente decreciente para la modelación de densidad de incendios en torno a caminos. | 111 |
| Gráfico 3.4.3.a | Variación del número de incendios en función de distancias. | 113 |
| Gráfico 3.4.3.b | Valores fuzzy de membresía respectos a carreteras. | 114 |
| Gráfico 3.4.3.c | Valores fuzzy de membresía respectos a caminos urbanos en áreas de interfaz. | 114 |
| Gráfico 3.4.3.d | Valores fuzzy de membresía respectos a caminos rurales. | 114 |
| Gráfico 3.4.3.e | Histograma de valores Fuzzy, en donde se muestran los valores de corte para el proceso de reclasificación. | 117 |
| CAPÍTULO 4 | | |
| Gráfico 4.2.4.a | Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m ² ” para la Interfaz 1 | 137 |
| Gráfico 4.2.4.b | Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m ² ” para la Interfaz 2. | 137 |
| Gráfico 4.2.4.c | Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m ² ” para la Interfaz 3. | 138 |
| Gráfico 4.2.4.d | Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m ² ” para la Interfaz 4. | 138 |
| CAPÍTULO 5 | | |
| Gráficos 5.3.1.a, b, c | Valores mínimos y máximos para los parámetros de comportamiento del fuego. | 156 |
| Gráficos 5.3.2.a, b, c | Valores mínimos y máximos para los parámetros de comportamiento del fuego. | 157 |
| Gráfico 5.3.2.a | Tendencia de valores EVI antes y después de incendios. | 161 |
| Gráfico 5.3.2.b | Comparación de los valores EVI (MODIS Aqua), en función de la cantidad de incendios conflictivos. | 162 |
| Gráfico 5.3.3.a | Comportamiento espacial del nivel de impacto en el área de estudio, clasificado por número de incendios. | 165 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Gráfico 5.3.3.b | Tendencias del número de incendios localizados en áreas de impacto. | 166 |
| Gráfico 5.3.3.c | Tendencia de la zona de impacto “baja”, para las categorías de tamaño y número de incendios en alerta roja. | 167 |
| Gráfico 5.3.3.d | Tendencia de la zona de impacto “alta” (izquierda), y “media” (derecha). | 168 |
| Gráfico 5.3.3.e | Tendencias en el número de incendios considerado para los distintos niveles de alerta de incendios. | 170 |
| Gráfico 5.3.3.f | Relación SEVEIF versus Fuzzy para la modelación del riesgo considerando el número de incendios en alerta roja. | 170 |
| Gráfico 5.3.5.a | Relación Nº de incendios, y pérdidas, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Pino radiata. | 181 |
| Gráfico 5.3.5.b | Relación Nº de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Eucalyptus. | 183 |
| Gráfico 5.3.5.c | Relación Nº de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Arbolado Nativo. | 185 |
| Gráfico 5.3.5.d | Relación Nº de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Matorral Nativo. | 187 |
| Gráfico 5.3.5.e | Relación Nº de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Pastizales y mezclas de Matorral. | 189 |
| Gráfico 5.4.2.1.a | Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño igual o inferior a 1 ha. | 195 |
| Gráfico 5.4.2.1.b | Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño menor o igual a 1 hectárea. | 196 |
| Gráfico 5.4.2.1.c | Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. | 197 |
| Gráfico 5.4.2.1.d | Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. | 198 |
| Gráfico 5.4.2.1.e | Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. | 199 |
| Gráfico 5.4.2.1.f | Modelo ajustado a los datos, para incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. | 200 |
| Gráfico 5.4.2.1.g | Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. | 201 |
| Gráfico 5.4.2.1.h | Modelo ajustado a los datos, para incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. | 202 |
| Gráfico 5.4.2.1.i | Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño superior a 50,00 ha. | 203 |
| Gráfico 5.4.2.1.j | Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño mayor a 50,00 ha. | 204 |
| Gráfico 5.4.3.2.a | Relación de áreas quemadas entre escenario real y simulado. | 211 |
| Gráfico 5.4.3.2.b | Relación de velocidades de avance del fuego entre escenario real y simulado. | 211 |
| Gráfico 5.4.4.a | Relación existente entre Daño Directo y Primer ataque. | 218 |
| Gráfico 5.4.4.b | Relación existente entre Daño Directo y Total de Superficie Afectada. | 219 |
| Gráfico 5.4.4.c | Relación existente entre Daño Directo y Superficie Afectada. | 220 |

INDICE DE FOTOS

CAPÍTULO 2

| | | |
|--------------|---|-----|
| Foto 2.3.1.a | Consecuencias Incendio en febrero 1999 en la zona de estudio. Fuente: fotografía aérea cedida por la Municipalidad Chiguayante. Citado en Jiménez (2006). | 71 |
| Foto 2.4.a | Área afectada por un grave incendio de interfaz, en la Región de Valparaíso. Incendio ocurrido en 2008. | 82 |
| Foto 2.4.b | Cerro densamente poblado con altas pendientes y en presencia de material vegetal altamente inflamable. | 82 |
| Foto 2.4.1.a | Participación activa de las comunidades en las labores de manejo y reducción de combustibles. | 84 |
| Foto 2.4.1.b | Faenas de limpieza de combustibles en áreas periféricas de interfaz. | 85 |
| Foto 2.4.1.c | Labores de despeje con maquinaria pesada. | 86 |
| Foto 2.4.1.d | Trabajo de una cuadrilla efectuando labores de poda y despeje de vegetación densa. | 87 |
| Foto 2.4.1.e | Trabajos de revegetación y siembra directa en laderas. | 88 |
| Foto 5.5.e | Niveles NIF para bosque nativo en Chile Central. | 231 |

Producción científica período Programa y Tesis Doctoral (2009-2012)

Parte de los resultados expuestos en esta tesis de investigación, han sido publicados en los siguientes medios de difusión científica:

a) Publicaciones in extenso en revistas ISI:

| | | |
|------|--|------------|
| 2012 | Castillo M. Identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology. <i>Journal of Applied Geography</i> 35(2012) 199-207. IF.3.082; Q1 | Capítulo 3 |
| 2012 | Castillo M. , Molina J-R, Rodríguez y Silva F, Julio G. Fire vulnerability model in Mediterranean ecosystems of South America. <i>Ecological Informatics</i> 13 (106-113). IF.1.432; Q2 | Capítulo 3 |
| 2012 | Castillo M. , Garfias R, Julio G, González L. Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. <i>Interciencia</i> 37(11) 796-804. | Capítulo 1 |

b) Libros y capítulos de libros:

| | | |
|------|---|-----------------------|
| 2012 | Castillo M. , Julio G. Forest fires in wildland-urban interface. Analysis and proposed actions. Case study: Central Chile - South America, <i>Wildfire and Community: Facilitating preparedness and resilience</i> , Springfield, Ill., (hard) ISBN 978-0-398-08842-X (paper) ISBN 978-0-398-08843-9 (eBook) ISBN 978-0-398-08844-6, Charles C. Thomas Publisher, Australia, 2012, In press. | Capítulos 1, 2, 3 y 4 |
| 2010 | Rodríguez y Silva.; Julio G.; Castillo M. ; Molina J.; Herrera M.; Toral M.; Cerda C.; González L. (2010). Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p. ISBN 978-84-693-0740-3. | Capítulo 3 |

c) Revistas científicas indexadas y con comité editor:

| | | |
|------|--|-------------------|
| 2012 | Castillo M. ; Correa L. Acciones para la disminución del peligro de incendios forestales. Estudio de caso. Provincia de Valparaíso, Chile Central. <i>Territorium</i> . 19 (95-100). | Capítulo 2 |
| 2012 | Garfias R.; Castillo M. ; Ruiz F.; Julio G.; Quintanilla V.; Antúnez J. Caracterización socioeconómica de la población en áreas de riesgo de incendios forestales. Estudio de caso: interfaz urbano-forestal. Provincia de Valparaíso. Chile Central. <i>Territorium</i> . 19. (101-109). | Capítulo 4 |
| 2011 | Castillo M. ; Julio G.; Quintanilla V. Vulnerabilidad y daño potencial ocasionado por incendios en áreas de interfaz urbano-forestal. Provincia de Valparaíso. Chile Central. <i>Territorium</i> . 18. (247-254). | Capítulos 1, 2, 3 |
| 2010 | Castillo M. ; Garfias R. Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. <i>Geographicalia</i> , 58. (81-103). | Capítulo 5 |
| 2010 | Castillo M. Daños y efectos del fuego en incendios de vegetación nativa, en paisajes costeros de Chile Central. Estudio de caso: la palma chilena. <i>Geographicalia</i> , 57. (107-127). | Capítulo 2 |
| 2009 | Castillo M. ; Rodríguez y Silva F.; Molina J-R. Situación de los incendios forestales de vegetación nativa en la región de Valparaíso, Chile Central. <i>Geographicalia</i> , 56. (89-110). | Capítulo 1 |
| 2009 | Quintanilla V.; Castillo M. Degradación de ecosistemas de la palma más austral del mundo (<i>Jubaea chilensis</i>), acelerada por los fuegos estivales en los cordones litorales de Valparaíso y Viña del Mar (32°50' -33°02'S). Un caso sostenido de perturbación del paisaje. <i>Investigaciones Geográficas</i> 41; (41-60). | Capítulo 1 |
| 2009 | Castillo M. Análisis del riesgo y vulnerabilidad antes incendios forestales en áreas de interfaz. Provincia de Valparaíso Chile. <i>Territorium</i> , 16. (131-138). | Capítulos 4, 5 |

d) Presentación en eventos científicos en calidad de artículo in extenso en actas:

| | |
|------|---|
| 2012 | Rodríguez y Silva, F.; Molina J.R.; Castillo, M. Aproximación metodológica para la evaluación del impacto económico de los incendios forestales, mediante el uso de teledetección espacial, aplicación mediante el uso de imágenes MODIS. IV Simposio Internacional sobre Política, Planificación y Economía del Fuego. 5 - 11 de noviembre de 2012. Servicio Forestal de Estados Unidos y la Universidad de Chapingo. Ciudad de México. In extenso. En actas. |
|------|---|

e) Presentación en eventos científicos en calidad de póster:

| | |
|------|---|
| 2009 | Castillo, M. ; Quintanilla, V.; Julio, G. (2009). Patrones espacio-temporales de incendios de vegetación, en la Zona Mediterránea Costera de la Quinta Región de Chile. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires. Argentina. 18-23 Octubre 2009. |
|------|---|

INTRODUCCIÓN

En un contexto Sudamericano, Chile es un país privilegiado por disponer de una gran variedad de recursos naturales, entre ellos los renovables. Si sólo se examina la cobertura arbórea, la existencia de más de 15,7 millones de hectáreas de formaciones forestales repartidas entre bosques naturales y plantaciones artificiales de tradición productiva, pone de manifiesto la necesidad de una permanente preocupación nacional por el uso sustentable y protección de este recurso frente a agentes de disturbio, como ocurre actualmente con la presencia de incendios forestales.

Chile es un país permanentemente afectado por incendios desde épocas ancestrales cuando el hombre utilizaba el fuego para expandir terrenos para la agricultura y ganadería. En los tiempos presentes, el desarrollo humano y el crecimiento sostenido de la población hacia nuevos territorios, han ocasionado una presión antrópica sobre los espacios naturales que se ve reflejado, entre otros aspectos, en la ocurrencia y propagación descontrolada del fuego.

En los últimos 40 años el estudio de los incendios forestales ha sido ampliamente abordado, con especial énfasis a partir del año 1986 cuando se implementaron mejores mecanismos para el registro de información territorial. No obstante los avances de tipo técnico, normativo, político e institucional que indudablemente han mejorado sustantivamente la protección contra incendios forestales en Chile, se considera que no han sido suficientes como para detener la tendencia al alza en el número, superficie, y gravedad de los incendios, particularmente aquellos que afectan permanentemente a áreas de interfaz urbano-forestal y zonas de especial valor ecológico.

Con todos estos antecedentes, la presente tesis doctoral pretende analizar el problema de los incendios forestales centrado en la zona mediterránea de la costa de Chile Central, donde justamente se han concentrado los mayores daños ocasionados por el fuego, especialmente en áreas sensibles desde el punto de vista ecológico y social.

Se trata de una investigación que intenta abordar algunos aspectos por vez primera, y profundizar en otros que ya han sido abordados en estudios anteriores. Se parte de la premisa que todo primer estudio es mejorable en la medida que se dispongan de

mayores y mejores antecedentes para ello. La estructura de esta tesis se compone de distintos temas, todos ellos orientados al estudio de los daños y efectos del fuego en sus distintos componentes, comenzando por una caracterización de tipo ambiental-paisajística, hasta un primer análisis económico de las actividades vinculadas a la defensa y combate contra incendios forestales.

El capítulo 1 analiza el problema desde un punto de vista histórico, considerando estadísticas a partir del año 1963 en donde es posible encontrar las primeras referencias sobre ocurrencia de incendios y años más tarde, sobre las causas que los originaron. Este análisis permite entonces focalizar el problema en la Zona Central de Chile, y establecer discusiones generales respecto a la situación del fuego en bosques naturales y modificados, así como también un análisis de la dinámica de la causalidad, considerando las referencias estadísticas proporcionadas por la Corporación Nacional Forestal de Chile. El capítulo aborda en su última parte el estudio de grandes episodios de fuego que han afectado a paisajes vegetales nativos de Chile, fruto de diversas campañas de terreno y análisis de datos históricos, que finalmente permitieron elaborar un primer diagnóstico a una escala territorial mucho más amplia, del real problema ocasionado por incendios, y sus posibilidades de restauración. Proporciona las bases para entender el proceso de degradación de paisajes vegetales, como también su dinámica espacial y temporal.

El capítulo 2 estudia el problema en áreas de interfaz urbano-forestal, como una necesidad de investigación frente a los cuantiosos daños económicos, sociales y ambientales que se han reportado en los últimos años, incluso cobrando vidas humanas. El impacto nacional de esta realidad, motivó la ejecución de innumerables iniciativas incorporadas a los actuales programas de protección y defensa contra incendios, como también en la ejecución de proyectos locales de investigación, entre ellos, el desarrollo reciente de un modelo territorial de vulnerabilidad contra incendios forestales, el cual se explica detalladamente en el capítulo 3.

El estudio de la interfaz aborda tres áreas particularmente críticas: dos de ellas se localizan en la Octava Región de Chile, mientras que la tercera se ubica en la Región de Valparaíso. En ellas se caracterizan los principales aspectos vinculados al riesgo y peligro potencial producto de la propagación del fuego, al que se ven enfrentados los

distintos asentamientos humanos que se encuentran localizados en sectores de conocida vulnerabilidad y daño potencial. Posteriormente, a modo de análisis general, se exponen y discuten las principales acciones factibles de realizar para disminuir el peligro contra incendios en áreas de interfaz. Se proponen cinco líneas temáticas, respaldadas con sus consideraciones técnicas para su implementación.

El capítulo 3 expone un modelo de vulnerabilidad territorial contra incendios forestales, fruto de la ejecución de un proyecto de colaboración institucional entre España y Chile ejecutado entre los años 2009 y 2010, y cuyos principales resultados fueron publicados en distintos medios de difusión. En esta investigación se discute en detalle las principales variables y factores que concurren en la determinación del riesgo, peligro y daño potencial que puedan presentarse frente a la posibilidad de inicio de un incendio forestal. Se trata de un proyecto innovador por cuanto incluye de manera más detallada los factores de orden económico y ambiental susceptibles de ser afectados por la acción del fuego. Mediante análisis estadístico de los datos, y con el apoyo del simulador de expansión de incendios forestales del Sistema KITRAL, fue posible valorar y construir a escala local, una primera cartografía de vulnerabilidad.

En el mismo capítulo se discute la pertinencia de aplicar áreas de influencia – tradicionalmente conocidas en análisis territorial, como “buffer” – considerando el efecto potencial del riesgo en función de la cercanía a caminos, centros poblados y la localización espacial de incendios ocurridos en el pasado. Para ello se comparan los resultados tradicionalmente utilizados en los análisis SIG, con una nueva propuesta de modelo territorial. Los resultados son validados, concluyéndose que es posible modelar de mejor manera el efecto del riesgo, incluso a menores costos para la gestión y asignación de recursos para la protección.

El capítulo 4 caracteriza la población que se encuentra localizada en áreas de alta ocurrencia de incendios, con énfasis en la interfaz urbano-forestal de Valparaíso. Mediante un recorrido de distintos puntos críticos de la población en riesgo, se diseña y aplica una encuesta de percepción de la población, y se realizan los análisis estadísticos para identificar las principales tendencias, y con ello, comprender de mejor forma el componente social que se ve directamente involucrado en los incendios de interfaz. Se

trata del primer estudio de percepción, documentado y respaldado por una investigación en Chile.

Finalmente el capítulo 5 desarrolla un análisis económico de la protección en áreas críticas de incendios forestales, considerando las variables del comportamiento del fuego apoyada por información de satélite, más una estimación de las pérdidas directas e indirectas a distintas escalas geográficas, con énfasis en la vegetación combustible y en el tipo de viviendas susceptibles a ser afectadas por un incendio. Para tal propósito se utilizaron las tablas de tasaciones y valores actualizados emitidos por los organismos del Estado de Chile, como también por empresas forestales para el caso de las plantaciones comercialmente productivas.

En forma adicional, se analizan las principales fases involucradas en las tareas de combate de incendios forestales, considerando para ello una base de datos histórica superior a los 10.500 eventos, recopilada para el período 1999-2011. La información se analiza desde el punto de vista espacial, temporal y económico, con el propósito de establecer, entre otros objetivos, umbrales en tiempos de respuesta al control frente al avance del fuego, y las estimaciones de gastos y daños que se derivan del análisis de pérdidas directas e indirectas para estos incendios. Se construyen funciones de estimación de daños y se analiza la relación económica existente entre la disponibilidad de recursos para el combate, los tiempos de operación y sus efectos en el avance del fuego y la superficie final afectada, entre otros aspectos.

JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Existen referencias en Chile respecto a estudios relacionados a los efectos del fuego en paisajes vegetales, en ecosistemas y su relación con la actividad humana. También ha sido posible encontrar muchos trabajos y estadísticas relacionadas al empleo de medios físicos para la detección y combate de incendios, como también en el registro de información e innovación tecnológica, especialmente en los últimos 20 años. Sin embargo, no existen suficientes estudios que aborden con mayor nivel de detalle el real problema que se produce en áreas de alta vulnerabilidad contra incendios, especialmente en sectores de interfaz. También existe una carencia de información referida a la

relación existente entre incendios y territorio bajo riesgo, especialmente en la definición de áreas de defensa y protección, como también en la correspondencia entre la dinámica de la propagación del fuego y los umbrales de tiempos necesarios para su control en función de las características del incendio y de los recursos disponibles. Estos aspectos, destacan como principales en este documento, y que por sí mismos, justifican su estudio a base de una tesis doctoral.

Como hipótesis central, se plantea que los estudios basados únicamente en el diagnóstico clásico de los problemas relativos a la ocurrencia y propagación del fuego y sus efectos derivados, no son suficientes como para mejorar el actual estándar de investigación en la materia. Por ello se hace ineludible proponer nuevos métodos de estudio orientados a cuantificar de mejor manera los efectos económicos y territoriales, porque constituyen la base esencial para apoyar de una manera más efectiva las nuevas directrices políticas que se desean impulsar para modernizar la actual ley de protección contra incendios forestales en Chile.

El objetivo general de esta tesis doctoral es estudiar el problema de los incendios forestales en la Zona Mediterránea de Chile Central, con énfasis en la Comuna de Valparaíso. Para tal propósito se establecieron como objetivos específicos: la realización de un diagnóstico histórico de las estadísticas de incendios y su relación con fuegos en áreas de vegetación nativa, el estudio y caracterización de incendios en áreas de interfaz urbano-forestal, el planteamiento y discusión de un modelo territorial de vulnerabilidad territorial, la caracterización socioeconómica de la población inserta en áreas de alto riesgo de incendios, y finalmente, un análisis económico de la protección en áreas críticas de ocurrencia.

CAPÍTULO 1

LOS INCENDIOS FORESTALES EN CHILE. ÉNFASIS EN LA ZONA CENTRAL

CAPÍTULO 1: LOS INCENDIOS FORESTALES EN CHILE. ÉNFASIS EN LA ZONA CENTRAL.

1.1 El problema de los incendios forestales. Referencias generales.

1.1.1 Contexto mundial

La presencia del fuego en las actividades humanas se hace presente en prácticamente todos los ecosistemas en donde coexisten las áreas rurales y un entorno con sectores urbanos o con mayor densidad de población. En este ámbito, son innumerables los casos en que el fuego, provocado por el hombre o por agentes naturales, ha arrasado extensas superficies de vegetación, destruyendo a su paso a centros poblados y, también, la pérdida de muchas vidas humanas.

La gran cantidad de datos generada por la acumulación de registros de incendios, dio como resultado, la necesidad de instaurar sistemas de acopio y estadísticas básicas respecto a ocurrencia y daños ocasionados por incendios forestales. No obstante, si se comparan las experiencias e infraestructura de datos en distintos países, es posible encontrar enormes diferencias en cuanto a actualización de información. Por ejemplo, en una importante cantidad de países de África, Asia, Oceanía y Latinoamérica, no se dispone de registros sobre la cantidad de incendios y las superficies afectadas. También, en otros casos, los antecedentes disponibles poseen baja confiabilidad, lo cual hace muy complicado ilustrar procesos de larga data para entender la evolución de este fenómeno en el tiempo.

El problema de los incendios forestales se presenta de una manera muy variable entre un país y otro, por las diferencias en las condiciones climáticas, vegetacionales, topográficas, uso de la tierra, niveles culturales y comportamiento de las poblaciones humanas, existentes entre las distintas regiones del mundo. Ello lleva a que el riesgo de ocurrencia de incendios y la peligrosidad de la propagación del fuego difieran en forma notable. Incluso, al analizar cada país por separado, internamente se pueden observar diferencias geográficas significativas en cuanto a la magnitud y características del problema y, también entre un año y otro debido a las fluctuaciones del clima (Julio, 2007).

En general, existe un consenso respecto a que la forma y la efectividad con que se aborda el control de los incendios forestales presenta también grandes variaciones entre los países. Son muchos los factores que repercuten en la existencia de estas diferencias. En primer lugar, las capacidades económicas que poseen las naciones industrializadas son muy superiores a las de los países en vías de desarrollo en la implementación de los programas de manejo del fuego, en el nivel de conocimiento sobre el problema y en la creación y aplicación de tecnologías y esquemas organizativos eficientes. Cualquiera que sea la realidad de cada nación, el planteamiento de políticas para la protección de los recursos naturales – entre ellos los forestales – debe considerar como materia prioritaria, los mecanismos de valoración de los recursos forestales y la necesidad de protegerlos.

La combinación de los aspectos antes expuestos, referidos a la variabilidad natural del problema de los incendios forestales, y a las condiciones existentes para lograr una efectiva protección de sus recursos naturales renovables, conducen a concluir que cada país debe encontrar su propio modelo de manejo del fuego, que requiere ajustarse a los factores que prevalecen en la ocurrencia y propagación de los incendios, y a las capacidades y limitaciones que se posean para establecer sistemas eficaces de prevención y combate.

1.1.2 Los incendios forestales en Chile.

1.1.2.1 Contexto histórico

Existen evidencias sobre la ocurrencia de incendios forestales en Chile desde hace unos 10.000 años, como consecuencia de fenómenos naturales y también por efecto de quemaduras efectuadas por los indígenas. Al respecto, Julio (2007) efectúa una completa reseña histórica, en la cual describe los principales hitos y procesos por los cuales el territorio ha experimentado cambios a raíz del uso del fuego producto del desarrollo humano y la creciente demanda por bienes y servicios.

La extensa vegetación nativa que cubría el país con anterioridad al descubrimiento de América, coexistía con las actividades agrícolas y ganaderas que ya efectuaban en aquella época los indígenas que habitaban las latitudes centro y sur. A base de diversos

testimonios escritos, concluye que hasta antes del período de la Conquista y Colonización Española (1541-1810), los impactos al bosque nativo habían sido mínimos, producto que se acotaban a los efectos generados exclusivamente por actividades de subsistencia. No obstante en el período de colonización, como consecuencia de la instauración del modelo cultural y de producción agropecuaria europeo, junto con el uso del fuego para apaciguar la resistencia territorial de los mapuches, ocasionaron que extensas superficies de bosque inexplorados fueran literalmente arrasados, para dar paso a la presencia de paisajes con extensas superficies de terrenos destinados a la ganadería y agricultura. Como ejemplo de lo anterior, puede citarse el deterioro y retroceso de formaciones vegetales nativas producto de la creciente demanda de madera destinada para construcciones y una floreciente industria de embarcaciones, con exportaciones por la costa del Pacífico.

Respecto a lo anterior, Castillo (2006) en un estudio sobre el efecto del fuego en el cambio del paisaje vegetal en la zona mediterránea costera de la V Región, en el período 1986 – 2004, determinó que no se experimentaron cambios significativos, aún incluso con la alta frecuencia de incendios forestales registrados. Con ello comprobó que la alteración en la estructura de la vegetación se manifiesta evidentemente en una escala muchísimo mayor de tiempo, presumiblemente con bastante antelación a la ocupación del área para un uso agrícola y urbano, y más recientemente por la introducción de plantaciones forestales con fines productivos.

Ya en el período inicial de la República (1810-1850), Julio (2007) cita a diversos autores que relatan los cambios en los sistemas de vida en Chile que se instauraron producto de los procesos de expansión del territorio y el aumento de la conectividad entre los primeros grandes centros poblados que se originaron, a medida que aumentaba el intercambio de bienes y servicios entre regiones.

En un contexto global, de acuerdo a antecedentes de la FAO, se estima que el territorio continental de Chile primitivamente estaba cubierto en un 54% por bosques, esto es, unas 40 millones de hectáreas y que, en el curso de 400 años hasta mediados del siglo XX, el país ya había perdido la mitad de su superficie forestal. Sin embargo, se considera que la mayor parte de esa pérdida realmente se produjo con posterioridad a 1850. Las cifras antes mencionadas coinciden con los resultados del último Catastro

Nacional de Vegetación Nativa (CONAF/CONAMA, 1999); éste indica que la superficie actual cubierta de vegetación que debe ser protegida de los incendios forestales corresponde al 55% del territorio continental, dentro de las cuales unas 15 millones corresponden a bosques nativos y plantaciones forestales.

Con posterioridad a 1850, en el período de colonización del sur y la Patagonia (fines de 1950), el escenario país reporta una de las mayores destrucciones de bosque, principalmente atribuibles a la permisividad en esos años de las autoridades para ampliar los terrenos agrícolas, y que paradójicamente en muchos casos dieron paso a la formación de extensas superficies degradadas por la erosión y en la nula posibilidad de ser reconvertidas para la instalación de nuevos cultivos. Es así que se reportan en prácticamente todo el sur de Chile, innumerables testimonios de grandes incendios, que finalmente llevaron a la necesidad de instaurar en el año 1872, el primer Reglamento General de Corta, como una forma de expresar el malestar de la sociedad y poner en tema de discusión la necesidad de evitar la destrucción desmesurada de bosques en una idiosincrasia calificada por diversos autores como lamentable, al impedir el desarrollo armónico del país y la utilización equilibrada de sus recursos, debido al interés de los agricultores por obtener una producción rápida y muy remunerativa en el menor tiempo posible.

Con posterioridad a 1950 comienzan las primeras iniciativas por formular una política forestal, apoyado esencialmente por la FAO entre 1952 y 1970. En este período destaca la creación de la Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile, y del Instituto Forestal en 1961. Respecto a la primera, cabe indicar que incorporó por primera vez en Latinoamérica una cátedra universitaria sobre protección contra incendios forestales (Julio, 2007).

Paralelamente, existía la necesidad de implementar sistemas de almacenamiento y registro respecto a datos de incendios forestales, dado que las cifras históricas presentaban en muchos casos, enormes incertidumbres en la precisión de los mismos, especialmente respecto a superficies quemadas y composición de la vegetación afectada. Surgen de esta manera el desarrollo de las primeras iniciativas en orden a instaurar un sistema básico de estadísticas, junto con esfuerzos paralelos en intentar reglamentar aspectos sobre el uso del fuego en espacios rurales en concordancia al

fomento de las actividades forestales y madereras. Se insta a la creación de una efectiva campaña de prevención contra incendios, el otorgamiento de facilidades para la importación de equipos de protección, junto con asegurar a la población una afluencia permanente de productos forestales y propender a la protección de las cuencas hidrográficas, que influyen en la conservación de las aguas y en el mantenimiento de las condiciones de navegabilidad de los ríos. Sin embargo, estos planes no podrían todavía ser aplicados con la intensidad requerida a todos los bosques como era de desear, por no disponerse de los fondos suficientes y de las leyes necesarias para llevar a cabo esta labor. Mientras tanto se estaban aplicando los principios generales sobre protección a los bosques fiscales, especialmente a las Reservas Forestales y Parques Nacionales y que, de acuerdo con la reglamentación, los Intendentes y Gobernadores, Cuerpos de Carabineros y Fuerzas Armadas, tenían la obligación de cooperar en la extinción de incendios de bosques.

Con posterioridad se fortalece la institucionalidad en protección, gracias a la creación de diversos organismos del estado, entre ellos el Departamento Forestal del Ministerio de Agricultura, que tuvo entre otros propósitos la creación de una campaña sistemática de prevención y combate de incendios de bosques, y la participación activa con representantes del Ejército, Carabineros, Fuerza Aérea, Dirección de Turismo, Instituto Forestal, Corporación Chilena de la Madera y Dirección de Tierras y Bienes Nacionales

Julio (2007), describe en su estudio los hechos significativos que marcaron la evolución de los sistemas de protección en Chile. Explica que en 1959 se elabora el primer proyecto sobre prevención y combate de incendios forestales, a cargo del Departamento Forestal de la Dirección de Agricultura y Pesca del Ministerio de Agricultura, para luego en 1962 pasar a la creación de la Policía Forestal cuyo rol primordial de esos años era el hacer cumplir las normas establecidas en la Ley de Bosques, y conseguir además la formación del primer sistema nacional de brigadas para el combate de incendios forestales.

Posteriormente en 1967 se formula el Plan Nacional de Protección contra incendios forestales, a través del Departamento Forestal y la Oficina de Planificación Agrícola, ambas divisiones, dependientes del Ministerio de Agricultura. Se constituyó así la primera organización especializada y técnicamente mejor equipada para hacer frente al

problema de los incendios forestales con cobertura en prácticamente todo el país. En este plan se incluyeron diversos proyectos específicos que establecían las referencias para el diseño, implementación y puesta en marcha, con metas y plazos, de proyectos relativos a Campañas de Prevención, Pronósticos de Incendios, Sistemas de Detección y Radiocomunicaciones, Organización y Operación de Unidades de Combate, Investigación y Capacitación, entre otros.

En los años siguientes, tanto el sistema estatal de protección contra incendios forestales como los planes y programas privados liderados por las grandes empresas que poseen patrimonio de plantaciones madereras han experimentado importantes mejoras en los procesos de organización y en el sostenido aumento de la dotación física de recursos para el combate. No obstante los logros obtenidos en los últimos años, aún queda presente la carencia en materia de investigación y generación del conocimiento, en muchas áreas de la gestión en manejo del fuego. En este ámbito, las universidades y los centros de investigación juegan un rol esencial como apoyo al sistema nacional público y privado.

1.1.2.2 Estadísticas generales. Período 1963 – 2011.

El análisis estadístico de los incendios forestales en Chile es posible hacerlo escalonadamente en el tiempo conforme los sistemas de almacenamiento de información fueron perfeccionándose, hasta disponer actualmente de bases de datos más fiables en cuanto al contenido y localización de los incendios, aspectos que hace poco más de 20 años atrás se realizaba mediante mapas y cartas locales en donde se registraban los datos básicos de cada siniestro. Por tal razón, en este capítulo se abordan las principales cifras que intentan resumir la historia de incendios desde el año 1963 en adelante.

En los últimos 48 años (1963-2011), se constata la ocurrencia de 197.093 incendios forestales en todo Chile, los que afectaron 2.178.853 hectáreas, tal como se puede observar en el Cuadro 1.1.2.2.a elaborado sobre la base de antecedentes disponibles en la Corporación Nacional Forestal (Sistema Estadístico de Manejo del Fuego), Instituto Forestal (Boletines de Estadísticas Forestales Anuales), Policía Forestal de Carabineros

de Chile (Memorias Anuales), Empresas Forestales (Informes Anuales de Programas de Manejo del Fuego) y Universidad de Chile (Laboratorio de Incendios Forestales).

Cuadro 1.1.2.2.a.

Ocurrencia, superficies afectadas y promedios anuales. Últimos 48 años.

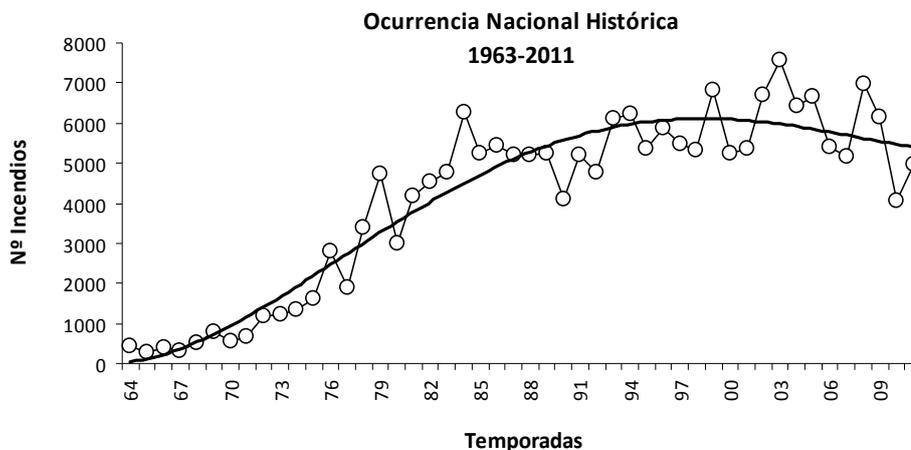
| Temporada | Nº de incendios | Hectáreas quemadas | Sup. Prom. (ha) | Temporada | Nº de incendios | Hectáreas quemadas | Sup. Prom. (ha) |
|-------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| 1963 - 1964 | 435 | 19,600 | 45.1 | 1987 - 1988 | 5,202 | 84,900 | 16.3 |
| 1964 - 1965 | 269 | 17,200 | 63.9 | 1988 - 1989 | 5,241 | 88,062 | 16.8 |
| 1965 - 1966 | 396 | 19,900 | 50.3 | 1989 - 1990 | 4,114 | 25,545 | 6.2 |
| 1966 - 1967 | 307 | 15,820 | 51.5 | 1990 - 1991 | 5,194 | 50,273 | 9.7 |
| 1967 - 1968 | 507 | 61,314 | 120.9 | 1991 - 1992 | 4,788 | 24,224 | 5.1 |
| 1968 - 1969 | 807 | 34,747 | 43.1 | 1992 - 1993 | 6,118 | 49,981 | 8.2 |
| 1969 - 1970 | 551 | 16,725 | 30.4 | 1993 - 1994 | 6,214 | 65,606 | 10.6 |
| 1970 - 1971 | 669 | 22,603 | 33.8 | 1994 - 1995 | 5,356 | 26,174 | 4.9 |
| 1971 - 1972 | 1,172 | 81,570 | 69.6 | 1995 - 1996 | 5,886 | 40,081 | 6.8 |
| 1972 - 1973 | 1,214 | 42,763 | 35.2 | 1996 - 1997 | 5,493 | 43,592 | 7.9 |
| 1973 - 1974 | 1,332 | 19,162 | 14.4 | 1997 - 1998 | 5,332 | 90,888 | 17.0 |
| 1974 - 1975 | 1,630 | 9,604 | 5.9 | 1998 - 1999 | 6,831 | 101,691 | 14.9 |
| 1975 - 1976 | 2,785 | 24,266 | 8.7 | 1999 - 2000 | 5,252 | 17,183 | 3.3 |
| 1976 - 1977 | 1,909 | 26,458 | 13.9 | 2000 - 2001 | 5,376 | 10,921 | 2.0 |
| 1977 - 1978 | 3,380 | 29,963 | 8.9 | 2001 - 2002 | 6,701 | 90,069 | 13.4 |
| 1978 - 1979 | 4,718 | 76,215 | 16.2 | 2002 - 2003 | 7,572 | 41,988 | 5.5 |
| 1979 - 1980 | 2,977 | 22,535 | 7.6 | 2003 - 2004 | 6,430 | 50,687 | 7.9 |
| 1980 - 1981 | 4,197 | 32,056 | 7.6 | 2004 - 2005 | 6,653 | 65,300 | 9.8 |
| 1981 - 1982 | 4,520 | 26,842 | 5.9 | 2005 - 2006 | 5,396 | 19,322 | 3.6 |
| 1982 - 1983 | 4,782 | 45,748 | 9.6 | 2006 - 2007 | 5,143 | 43,384 | 8.4 |
| 1983 - 1984 | 6,252 | 80,191 | 12.8 | 2007 - 2008 | 6,975 | 42,037 | 6.0 |
| 1984 - 1985 | 5,223 | 47,572 | 9.1 | 2008 - 2009 | 6,157 | 64,223 | 10.4 |
| 1985 - 1986 | 5,421 | 67,414 | 12.4 | 2009 - 2010 | 4,069 | 58,364 | 14.3 |
| 1986 - 1987 | 5,195 | 97,055 | 18.7 | 2010 - 2011 | 4,952 | 47,035 | 9.5 |

Fuente: datos oficiales publicados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), y adaptados por el autor para el análisis de resultados.

Los antecedentes revelan una notable alza de la cantidad de incendios hasta el período 1982-1986, momento en que la curva se estabiliza (gráfico 1.1.2.2.a), comprobándose posteriormente y hasta los tiempos presentes valores que fluctúan entre 5.200 y 7.570 incendios anuales, con una leve tendencia al incremento. En cambio, la tendencia de las superficies afectadas por el fuego en el mismo período es diferente, con alternancia de años benignos y críticos, y fluctuaciones desde 10.921 (temporada 2000-2001) hasta 101.691 (temporada 1998-1999) hectáreas por año.

Gráfico 1.1.2.2.a.

Evolución histórica de la ocurrencia de incendios en Chile. Últimos 48 años.



De acuerdo a los datos presentados en el cuadro y gráfico anterior, se comprueba lo expresado anteriormente sobre el pronunciado incremento de la ocurrencia entre los años 1963 a 1986, para llegar a una relativa estabilización de la cantidad de incendios en los años siguientes. Este fenómeno podría explicarse por la insuficiente capacidad existente para capturar y registrar la información sobre ocurrencia entre los años 1963 y 1981. Si se consideran exclusivamente los promedios a partir del año 1986, en los cuales la información posee un alto nivel de confiabilidad, los valores de superficie promedio afectada y tamaño medio de los incendios tienden a estabilizarse a valores de 53.543 y 9,49 hectáreas, respectivamente. Considerando las estadísticas a contar del año 1976, el valor promedio de hectáreas/incendio se estima en 11,01 para todo el territorio nacional.

Por otra parte, no debe desconocerse el efecto de las campañas de prevención y del mayor control en el uso del fuego, que se han venido intensificando con el transcurso de los años. De todas maneras, la tendencia del incremento de los incendios forestales es un fenómeno que se presenta en la mayoría de los países del mundo, como una consecuencia del uso cada vez más intensivo de los recursos naturales renovables, ya sea para su aprovechamiento productivo, o bien como una fuente de recreación y esparcimiento. Aunque no es posible comprobarlo, al parecer el cambio climático también está influyendo en el aumento de los incendios forestales.

En cuanto al tamaño medio de los incendios, se destaca una pronunciada disminución a contar del año 1978 con fluctuaciones interanuales pero siempre tendiendo a la baja, lo que se interpreta como una consecuencia de la consolidación de los programas de protección, con la implementación de organizaciones mejor preparadas, junto a un constante aumento en la asignación de recursos a partir desde los mediados de la década del sesenta. Posteriormente, a contar del año 1983, el indicador se ha mantenido con leves fluctuaciones. En todo caso, cabe señalar que el tamaño promedio de 9,49 -11,01 ha/incendio es un buen indicador, comparado con el promedio para Latinoamérica que alcanza a 65 ha/incendio (Julio, 2007).

Finalmente es necesario señalar que las cubiertas vegetales a proteger de los incendios forestales, de acuerdo al Catastro Nacional de Vegetación Nativa (CONAF/CONAMA, 1999), se presentan desde la III hasta la XII Regiones¹, en una extensión de 40,6 millones de hectáreas, lo que equivale aproximadamente al 54% del total del territorio continental del país.

1.2 Análisis estadístico de incendios en la zona central de Chile.

1.2.1. Síntesis general

Chile posee 15 regiones administrativas, en donde el 96,6% de la ocurrencia se concentra entre las Regiones V (Región de Valparaíso) y X (Región de Los Lagos); en cambio, las regiones del norte y extremo sur poseen una muy escasa importancia en la iniciación de incendios forestales (2,6%), lo que se explica por el menor riesgo presente (bajos niveles de densidad población y de vías de comunicación). Esto se refleja en la densidad de incendios, porque las regiones con una mayor ocurrencia corresponden justamente a las que poseen una menor extensión de territorio.

En esta investigación se aborda la zona central de Chile, entre las Regiones de Regiones de Valparaíso (V), Metropolitana (XIII), Libertador Bernardo O'Higgins (VI) y del

¹ Desde 1974, Chile está dividido políticamente en regiones, las que se subdividen en provincias. Hasta 2007 la cantidad de regiones de Chile era 13, y en la actualidad el total es de 15 regiones. La región más meridional es Magallanes, y la más septentrional es Arica y Parinacota. De norte a sur, la III Región corresponde a Atacama, y XII a la Región de Magallanes.

Maule (VII), históricamente se han caracterizado por la presencia de graves problemas generados por los incendios forestales, los que han provocado severos impactos sociales, ambientales y económicos en las cuencas hidrográficas que contienen.

A modo de referencia, la zona central de Chile continental posee una marcada estacionalidad climática, con condiciones mediterráneas muy similares a países de Europa del sur, tales como Portugal, España, Italia y Grecia, en donde es posible verificar la existencia de una fuerte actividad de incendios forestales.

De acuerdo a las estadísticas oficiales de la Corporación Nacional Forestal, y analizando los datos desde la temporada 1976-1977, hasta el período 2010-2011, esta zona concentra el 37,78% de la ocurrencia nacional (69.891 incendios), y el 46,22% de la superficie afectada de incendios forestales (828.914 hectáreas quemadas).

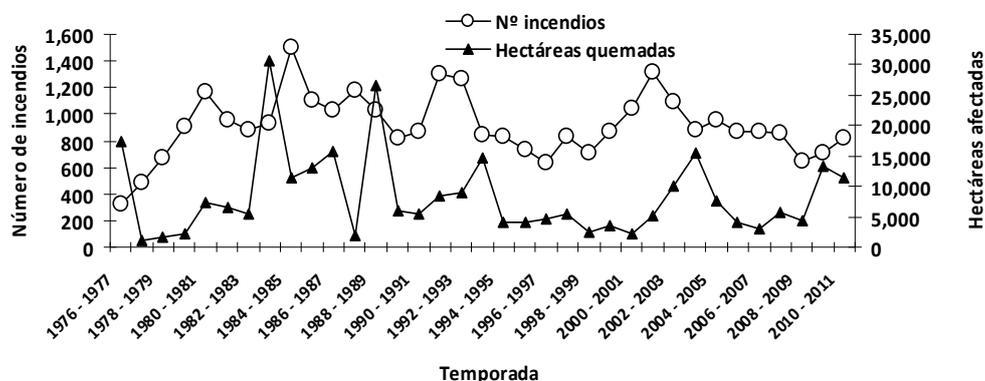
En relación a la distribución cronológica de la ocurrencia, las condiciones climáticas que imperan en Chile en el transcurso del año (verano caluroso y seco, e invierno frío y con precipitaciones), lleva a una alta concentración de los incendios en la temporada estival (diciembre a marzo). Este hecho, si bien exige un trabajo de elevada intensidad durante el verano, permite un receso de varios meses sin operaciones, que favorece a la preparación de las actividades para la siguiente temporada.

1.2.2 Cifras específicas por región

Un análisis más detallado al interior de las cuatro regiones de la zona central, muestra cifras de ocurrencia de incendios muy variables. Valparaíso por ejemplo, muestra un promedio de 911 incendios/temporada (gráfico 1.2.2.a), y una alta variabilidad dentro de este valor (máximo de 1.501 en 1984-1985 y mínimo de 321 en 1976-1977). Estas fluctuaciones poseen distintas explicaciones, entre ellas, la fuerte expansión en áreas de interfaz urbano-forestal que ha experimentado la región en los últimos 25 años, la variabilidad en la causalidad y las condiciones climáticas que han favorecido los procesos de ignición en áreas de alto riesgo, y en parte también por una mayor precisión en el registro estadístico de datos de ocurrencia, causas y superficies afectadas.

Gráfico 1.2.2.a.

Estadística de incendios en la Región de Valparaíso, desde el año 1976.

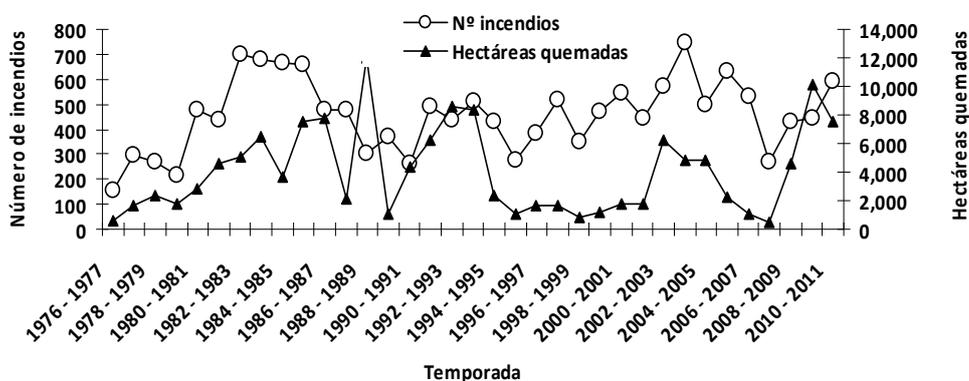


Respecto a las cifras de superficie afectada por el fuego, se produce un fenómeno similar, con altas fluctuaciones que se estabilizan a contar de la temporada 1989-1990. El valor promedio para el período 1976-1977/2010-2011 corresponde a 8.308 hectáreas quemadas, no coincidiendo necesariamente los valores más altos, con los años de mayor ocurrencia de incendios. En muchos casos, se constataron grandes incendios que arrasaron extensas superficies de plantaciones en áreas lejanas a interfaz, mientras que los niveles de mayor gravedad se produjeron en años donde la ocurrencia y superficie eran menores que el promedio. Tal es el caso de la temporada 2007-2008 en donde una cifra total de 850 incendios en 5.630 hectáreas quemadas, contempló un incendio de interfaz que ocasionó la muerte de 2 personas, 46 heridos, la destrucción de 119 viviendas y 371 damnificados.

Hacia el interior del territorio nacional, la Región Metropolitana concentra cifras significativamente menores que en Valparaíso, atribuible principalmente a la menor densidad de incendios por la existencia de una mayor superficie de territorio, y por una menor concentración de población en superficies topográficamente peligrosas para la propagación del fuego. El promedio para esta región, y para el período 1976-1977/2010-2011 es de 457 incendios con valores relativamente homogéneos a contar de la temporada 1986-1987, en donde la tendencia es más marcada a un promedio estable, que lo que sucede en la región de Valparaíso.

Gráfico 1.2.2.b.

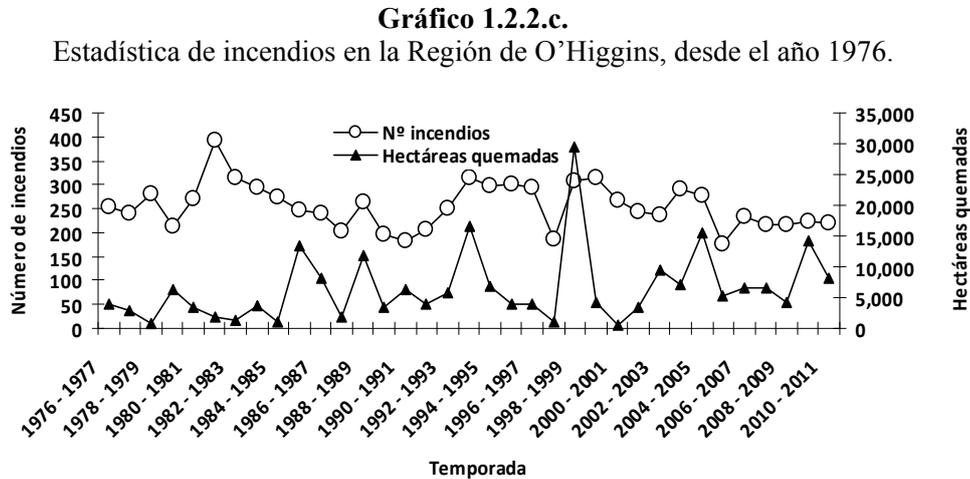
Estadística de incendios en la Región Metropolitana, desde el año 1976.



Respecto a las superficies afectadas, el promedio para este período es de 4.036 hectáreas quemadas, con valores extremos para las temporadas 1988-1989 y 2009-2010, atribuibles principalmente a la conjunción de condiciones de tipos meteorológicas y estacionales que incidieron en una rápida propagación del fuego. En ambos casos, la mayor proporción de vegetación correspondió a matorral arbustivo y pastizales. No obstante en esos años, las cifras de ocurrencia fueron menores que el promedio para todo el período analizado. Ello lleva a concluir, que, tal como se señalaba en el caso de la ocurrencia, no necesariamente una alta cantidad de incendios da como consecuencia una alta superficie afectada.

La Sexta Región posee una realidad distinta, debido a la existencia de un mayor territorio cubierto por bosques y plantaciones comerciales, y en donde la densidad poblacional queda acotada a pequeñas áreas urbanas, sin poseer una alta ocurrencia de incendios. Para esta Región, el promedio para el período 1976-1977/2010-2011 es de 256 incendios, siendo un valor que se ha mantenido relativamente constante a lo largo del tiempo. No obstante la variabilidad en la superficie anual afectada se hace de manifiesto al revisar testimonios de incendios ocurridos en zonas alejadas de la conectividad vial y con dificultades de acceso al ingreso de recursos para el combate. Tal es el caso de la temporada 1998-1999 en donde ocurrió uno de los incendios forestales más devastadores que se registran en las estadísticas oficiales, localizado en el poblado de Sierras de Bellavista, a 40 km de la ciudad de San Fernando, en la Región de O'Higgins. En dicho incendio se quemaron casi 30 mil hectáreas de bosque nativo, con especies altamente valiosas perteneciente al ecosistema de la región central de Chile. A

diferencia de las regiones anteriormente señaladas, el nivel de impacto y gravedad de los incendios se concentra más en las extensas superficies dañadas y la composición de la vegetación quemada.



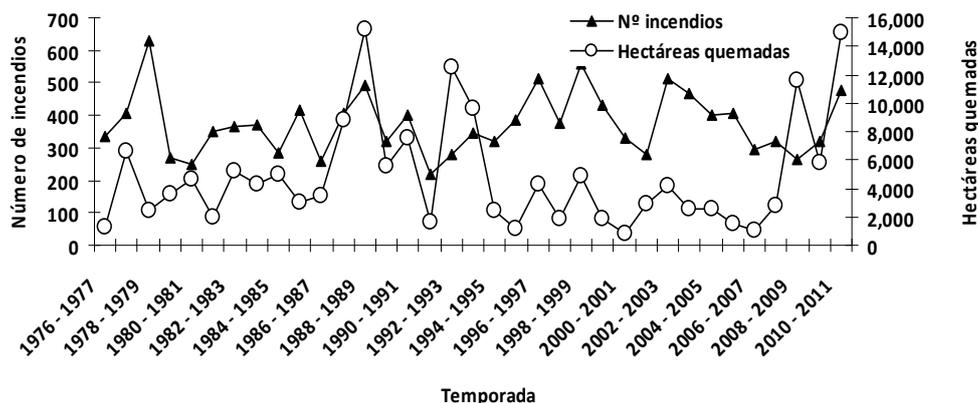
Más al sur del país se encuentra la Región del Maule (VII Región de Chile), en donde predomina la existencia de bosques adultos de robles y otras especies leñosas típicas de la vegetación nativa presente en estas latitudes. Las plantaciones forestales de las grandes empresas se concentran en las planicies intermedias y sector costero hacia el océano pacífico, y cuya distribución va acorde a la infraestructura de carreteras, caminos y acceso a centros poblados y puertos.

Considerando estos antecedentes, y tal como ocurre en prácticamente todas las regiones de Chile, la distribución espacial de la ocurrencia de incendios queda fuertemente condicionada por el efecto de la infraestructura de caminos y centros poblados. No obstante, los grandes incendios forestales que han ocurrido específicamente en la Región del Maule, en el período analizado (1976-1977/2010-2011) han estado asociados a una propagación del fuego en áreas de difícil acceso al control, por las condiciones topográficas en áreas alejadas.

El gráfico 1.2.2.d, muestra la historia de incendios en la Región, con un promedio de 373 incendios por temporada y una superficie de 4.840 hectáreas. Una tendencia a la irregularidad en estas cifras se detecta en algunas temporadas, atribuible principalmente a la combinación de los factores de riesgo y peligro en período de alta ocurrencia de incendios forestales.

Gráfico 1.2.2.d.

Estadística de incendios en la Región del Maule, desde el año 1976.



La irregularidad en las cifras de superficies afectadas queda reflejada en el último gran incendio forestal que afectó a la Comuna de Hualañé, Región del Maule, en donde se quemaron más de 10.000 hectáreas entre arbolado nativo, plantaciones de pino, eucaliptos y matorrales. Como se comentará más adelante, prácticamente la totalidad de los incendios forestales que se producen en Chile, son originados por acción humana, generalmente deliberada. Este evento ocasionó enormes impactos de todo orden en la Región, y, como ocurre en prácticamente todas las temporadas de incendios, lleva a plantear el estado actual de las campañas de prevención y la investigación existente para la prevención de desastres. Muchos de los grandes incendios forestales se originan en áreas de interfaz urbano-forestal, que es uno de los énfasis que desea dar esta investigación en la zona central de Chile.

1.2.3 Comentarios generales

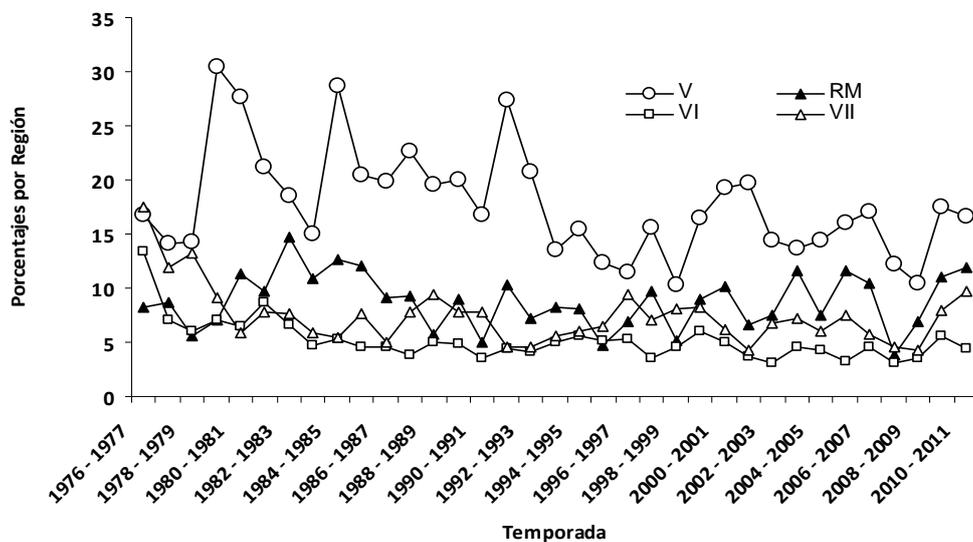
No obstante el elevado nivel de ocurrencia en las regiones de la zona central de Chile, se considera que la mayor gravedad de los impactos ambientales del fuego es una consecuencia de la propagación de incendios mayores o catastróficos, los que se definen como aquellos que afectan a una superficie superior a las 300 hectáreas (Julio, 2009). En estas regiones es normal encontrar incendios que escapan al tamaño promedio, pudiendo superar tamaños por sobre las 300 hectáreas, los cuales pueden ser calificados de especial gravedad. Los incendios mayores, que conformaron solamente el 3,6% del total de la ocurrencia, generaron alrededor del 55% del daño total a la vegetación afectada en las cuatro regiones de Chile central.

Respecto a la ocurrencia, se expresan las cifras a modo de resumen para las cuatro regiones de la zona central, en donde es posible verificar los mayores valores de incendios ocurridos en la Región de Valparaíso (17,73% respecto al total nacional para el período 1976-1977/2010-2011), que en el resto del territorio bajo estudio (8,79% para la Región Metropolitana, 5,14% para la Región de O'Higgins y 7,42% para la Región del Maule).

Ello lleva a plantar la necesidad de profundizar respecto a los mecanismos necesarios para fortalecer los actuales programas en prevención contra incendios, y las técnicas necesarias para establecer una mejor gestión del territorio. En esta investigación (Capítulo 5), se propone la inclusión de técnicas basadas en la economía del fuego, cuyo propósito es otorgar mayores antecedentes para lograr una mejor asignación de recursos, que para el caso de Chile, siempre son limitados y basados fuertemente en prioridades.

Gráfico 1.2.3.a.

Porcentajes de ocurrencia respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011.



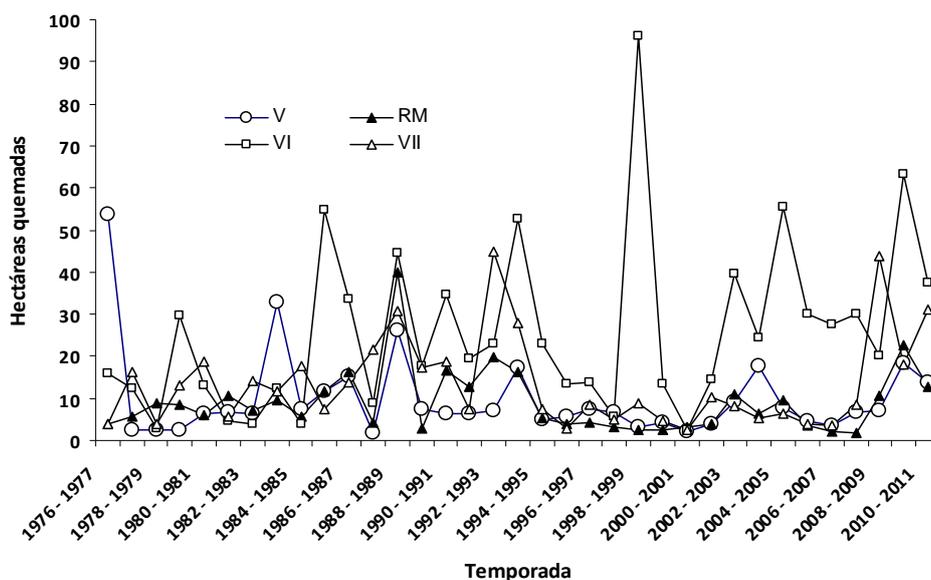
Las cifras de ocurrencia señaladas en el gráfico 1.2.3.a, se hacen más evidentes cuando se comparan con las de superficie afectada. Como se señalaba anteriormente, en la Región de Valparaíso la densidad de incendios es mucho más elevada que en las otras tres regiones, producto de la presencia de extensas zonas de interfaz urbano-forestal, lo que ocasiona el predominio de incendios de alta conflictividad y el establecimiento frecuente de niveles de alerta. Más adelante se explica un método que justamente aborda el tema de las áreas de influencia o protección, en sectores donde se ha

comprobado que la ocurrencia de incendios está marcada fuertemente por la acción de la interfaz.

Se señalaba anteriormente que el tamaño medio de incendios en Chile era bastante menor respecto al promedio general de Latinoamérica. No obstante al revisar internamente las cifras entre las regiones de Chile central, se constata que, a diferencia de las regiones de Valparaíso (V) y Metropolitana (XIII), que poseen tamaños medios de 9,91 y 9,0 hectáreas/incendio respectivamente, las regiones de O'Higgins (VI) y del Maule (VII), poseen un menor tamaño promedio de incendios más alto (25,65 y 13,53 hectáreas/incendio, respectivamente), lo cual sólo podría entenderse por su menor nivel de desarrollo en manejo del fuego en comparación al de las regiones vecinas. El gráfico 1.2.3.b ilustra esta situación, para el período 1976-1977/2010-2011.

Gráfico 1.2.3.b.

Porcentajes de ocurrencia respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011.



Las regiones en Chile se dividen administrativamente en comunas. En ellas, se ha constatado que las cifras de ocurrencia y daños ocasionados por incendios son muy significativas. Debe señalarse que las cuatro regiones aquí comentadas contienen en total 151 comunas. En 15 de ellas (alrededor del 10% del total de la superficie bajo estudio) no se produjeron siniestros.

Una de las razones de estas diferencias radica en las condiciones de riesgo que las afectan. Esto se debe al significativo efecto de la población en la iniciación de los fuegos, principalmente en la periferia de áreas urbanas, a lo largo de carreteras y caminos, y también por la variabilidad de los factores ambientales que inciden en la iniciación de los incendios (clima, topografía y tipos vegetacionales).

Se observa que la V Región es la que presenta permanente los mayores niveles de ocurrencia de incendios forestales. Por otra parte, la cantidad de siniestros ha sido relativamente constante en el transcurso del período de análisis, destacándose el año 2003 como el de mayor gravedad, y el año 1998 como el de menor severidad.

1.2.4. Situación de incendios forestales en vegetación nativa. Chile central.

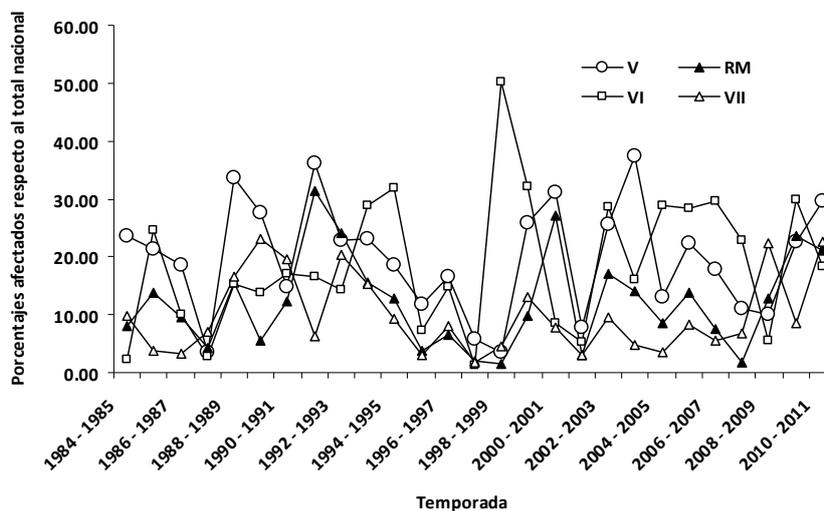
Como se señalaba anteriormente, existe una alta proporción de superficies afectadas por incendios en vegetación nativa, en un número mucho menor de incendios, que los reportados en el tamaño medio de los mismos. Existen referencias reportadas acerca de los daños y efectos del fuego en Chile central (Castillo 2006), en donde se constata que los patrones de recurrencia del fuego finalmente ocasionan un cambio sustantivo en el paisaje vegetal, al verse enfrentado al aumento del efecto borde producto de la actividad antrópica.

Al revisar las cifras regionales, se constatan los daños producto de la ocurrencia de grandes incendios forestales que han afectado principalmente a especies nativas del matorral y bosque mediterráneo de Chile central. Es el caso de la temporada 1988-1989, en donde se presentaron extensos incendios en las cuatro regiones analizadas. Por ejemplo, en la Región de Valparaíso, aquella temporada fue calificada como una de las más severas de las cuales se posee registro, al presentarse una ocurrencia simultánea de enormes incendios que causaron cuantiosos daños a la propiedad pública y a la vegetación nativa localizada en ejes de expansión urbana. La presencia de formaciones leñosas densas en sectores topográficamente inaccesibles para el combate terrestre, sumado a las altas temperaturas y fuerte viento, contribuyeron a una rápida propagación del fuego. Hechos como estos se han repetido año tras año, variando la cantidad de superficie afectada, pero manteniéndose relativamente constante los valores de ocurrencia. Otras temporadas especialmente conflictivas, fueron las de los años 1993-

1994 y últimamente en 1998-1999 con enormes daños a bosques de roble en la precordillera andina de la Región del Maule.

Gráfico 1.2.3.c.

Porcentajes de vegetación nativa afectada por incendios forestales.
Cifras respecto al total nacional. Período 1976-1977/2010-2011.



El gráfico 1.2.3.c ilustra lo explicado anteriormente. La alta variabilidad en la ocurrencia, y hectáreas afectadas se debe a la combinación de factores estacionales, climáticos, e incluso en la oportunidad y forma en que los episodios de fuego oponen resistencia a los medios de control que puedan existir en esos instantes. En muchas ocasiones, los extensos daños se han producido por la falta de acceso a terrenos alejados, o por la ocurrencia múltiple y con ello, a la falta de medios aéreos y terrestres necesarios para el oportuno control. Lo anterior es muy común en áreas localizadas en la alta cordillera de Los Andes, territorio que alberga la mayor proporción de bosques nativos en la Región centro y sur de Chile.

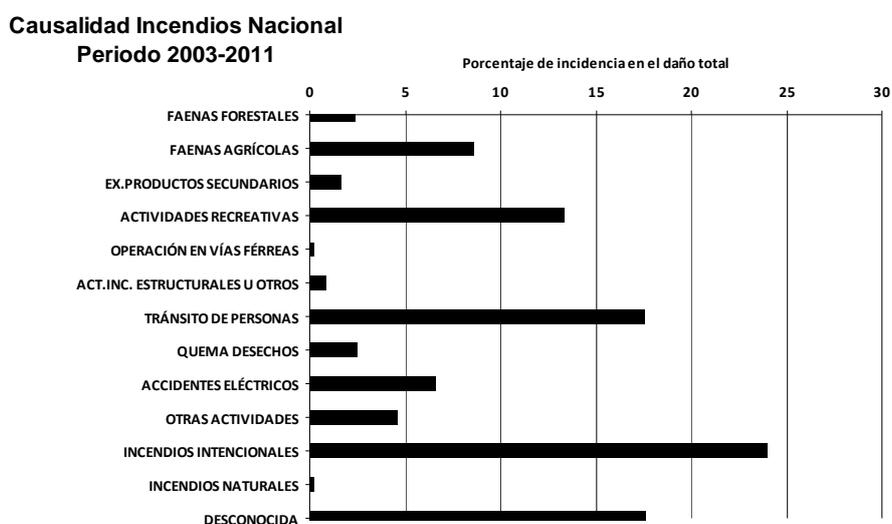
1.2.5 Dinámica de la causalidad

En Chile, prácticamente el 99% de los incendios forestales son originados de una u otra forma, por la actividad humana, aún cuando existen otras causas de origen natural (volcanismo, rayos, entre otras). Las estadísticas respecto a las causas que originan los incendios forestales en el país han sido estudiadas conforme se han perfeccionado los sistemas de registro y nomenclaturas para su clasificación. En tal sentido, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) es la institución oficial encargada de recopilar año a año estas estadísticas. Desde el año 1976 el sistema ha ido cambiando en cuanto a

la definición y clasificación de las mismas, pero en esencia los grupos causales no han variado sustantivamente en los últimos años.

Una síntesis inicial de la causalidad se presenta en el gráfico 1.2.5.a. Se puede observar que la intencionalidad es la que prevalece como causa principal, y su relación con las áreas de alta presencia humana, tales como centros poblados y/o actividades recreativas.

Gráfico 1.2.5.a
Síntesis de la causalidad de incendios en Chile.



Las causas experimentan variaciones según la región del país. Por ejemplo, en la zona centro-sur de Chile, una de las causas preponderantes es la atribuible a las quemaduras (*quema de desechos*), lo que se explica por una mayor participación de actividades en áreas rurales, en las cuales el fuego es una herramienta tradicional para la eliminación de desechos de explotaciones agrícolas y forestales y, también, en la habilitación de los suelos para cultivos y forestaciones. No obstante, al realizar un seguimiento de la causalidad en el transcurso de los años, se aprecia un notable y constante descenso de la participación de las quemaduras, lo que puede atribuirse a las disposiciones legales que se han estado aplicando cada día con un mayor rigor y, también, por la mejor comprensión de los productores rurales sobre los problemas que se generan con el empleo inadecuado e irracional del fuego como herramienta de trabajo. Además, es significativo el progresivo incremento de las causas *tránsito de personas* e *incendios intencionales*, que han pasado a ser los principales orígenes de incendios forestales. El primero podría interpretarse como una consecuencia de la cada vez mayor cercanía de

los centros poblados a las áreas silvestres y, también, al aumento permanente del interés o necesidad de los pobladores por visitarlas.

La intencionalidad se ha incrementado de manera notable, llegando a constituir la primera causa en Chile con una participación que alcanzó al 40% del total en el período 1996-2000. Julio (2007) expresa que este hecho es preocupante y estima que se mantendrá en el futuro, por diversas razones señalando, entre otras a protestas y venganzas motivadas por conflictos sociales o exigencias de recuperación de tierra por parte de movimientos indígenas. La piromanía es otra conducta que la experimentado un aumento, especialmente en áreas de interfaz. Algunos especialistas en comportamiento humano, opinan que esta tendencia tiene una asociación muy estrecha a otros males de la sociedad, tales como la drogadicción y alcoholismo.

1.3 Análisis de grandes incendios en la vegetación nativa de la zona central de Chile, período 1976-2010

El estudio geográfico de incendios forestales que han afectado a formaciones vegetales nativas en Chile central, es un área que, si bien es cierto reviste gran importancia a nivel científico, político y económico, en los hechos no ha sido suficientemente estudiado, considerando que esta iniciativa podría sin lugar a dudas apoyar sustantivamente a una estrategia integrada de prevención y combate de incendios forestales.

No obstante la alta relevancia de este tema en el área ambiental, hasta el año 2011 han sido escasas las referencias científicas en Chile que han abordado el tema de los incendios en vegetación nativa desde el punto de vista geográfico, y considerando los daños y efectos en el paisaje. Los estudios existentes abordan aspectos de recuperación de paisajes quemados en eventos puntuales, localizados específicamente en las regiones sur y austral del territorio. Por tal razón, esta investigación pretende abordar este aspecto en Chile Central, específicamente las regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador General Bernardo O'Higgins y la región del Maule (cuatro regiones), en donde se concentra una importante proporción de incendios que han afectado en forma sistemática a espacios naturales y con ello, a áreas de conectividad urbano-forestal, que han sido reconocidas como sectores críticos de ocurrencia.

Por todos los antecedentes anteriores, se hizo necesario abordar en forma espacio temporal el seguimiento de grandes eventos de fuego, y para el período mayor a cubrir, considerando las estadísticas existentes en Chile respecto a ocurrencia y causas de incendios forestales. Para efectos específicos, esta sección explica y detalla desde el punto de vista geográfico, los daños y efectos producidos en áreas representativas para un período de 35 años. Estos resultados han permitido generar nuevas referencias factibles de ser utilizadas en futuras investigaciones como también al apoyo en la redacción e implementación de nuevas estrategias para la prevención de incendios en espacios naturales.

En esta sección se expone un resumen de un análisis de grandes incendios en vegetación nativa ocurridos en los últimos 35 años en la zona central de Chile, y en cuyo caso, los principales resultados se centran en la Región de Valparaíso.

1.3.1 Resumen

La zona central de Chile ha sido permanentemente afectada por incendios forestales en vegetación nativa, cuyos daños y efectos no han sido suficientemente estudiados a escala regional, incluso dado el alto nivel de gravedad que representa este problema en el país. Por esta razón, esta investigación analizó 35 años de incendios (período 1976-2010), con el objetivo de disponer de datos útiles para ejecutar futuros proyectos de recuperación ambiental en áreas degradadas por el fuego. El análisis consideró incendios superiores a 2.000 hectáreas, localizados entre los paralelos 32° y 38°S, comprobándose una alta variabilidad en el ciclo recurrencia, y cuyos principales daños se concentran en los años 1984 y 1999, atribuibles principalmente a las condiciones ambientales que favorecieron la propagación del fuego en esos años. No obstante, estos resultados no necesariamente corresponden a patrones de recurrencia, principalmente por la ausencia de datos confiables con anterioridad a 1976. Respecto al análisis de campo, los indicadores de abundancia-dominancia de Braun-Blanquet y Westhoff-Maarel, y métricas de paisaje, muestran que la estructura y composición de la vegetación no ha cambiado radicalmente en este período, existiendo las mismas especies pero en un mayor estado de degradación que los bosques existentes a comienzos del siglo pasado. Los análisis de simulación mostraron elevados niveles de

liberación calórica en el comportamiento del fuego, presumiblemente por la alta disponibilidad de material vegetal combustible en las áreas analizadas, y por las condiciones topográficas y ambientales que favorecieron su rápida propagación.

1.3.2 *Referencias generales*

La existencia ancestral de extensas superficies de bosques en áreas del centro, sur y austral de Chile, y los posteriores procesos de colonización, ocasionaron un rápido retroceso de estas áreas naturales. Al respecto, Julio (2007) estima que entre los años 1850 y 1950 alrededor de la mitad de la superficie de bosques nativos fue prácticamente arrasada (unas 20 millones de hectáreas) como consecuencia del uso indiscriminado del fuego. Como consecuencia de ello se verifica la aparición y proliferación de especies invasoras post incendios (Castillo 2006). El crecimiento de áreas pobladas y la actividad agrícola e industrial, generaron un aumento sostenido de incendios y en los niveles de gravedad de los mismos (Castillo *et al.* 2003). En particular, esta investigación centra su análisis en la zona central de Chile, particularmente entre las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule, en donde las condiciones de sequía y estacionalidad han originado eventos de fuego que han ocasionado cuantiosas pérdidas ambientales y en bienes y servicios por los efectos en cercanía a sectores poblados (Tapia 2008, Alvarez 2008), y por la existencia de grandes masas forestales de vegetación natural. En este ámbito, Castillo (2006) efectuó un estudio multitemporal del efecto del fuego sobre el paisaje vegetal nativo en la zona mediterránea costera de la Región de Valparaíso, en el período 1986–2004. En su estudio determinó que no se experimentaron cambios significativos, aún incluso dada la alta frecuencia de incendios forestales registrados. Con ello comprobó antecedentes reportados por Quintanilla (2000), en el sentido que la alteración en la estructura de la vegetación se manifiesta evidentemente en una escala muchísimo mayor de tiempo, presumiblemente con bastante antelación a la ocupación del área para uso agrícola y urbano, y más recientemente por la introducción de plantaciones forestales con fines productivos.

Esta investigación plantea como objetivo central, proporcionar información más precisa respecto a los daños y efectos ocasionados por el fuego en vegetación nativa ocurridos en los últimos 35 años en cuatro regiones de Chile, considerando aspectos de número y

localización de incendios, las condiciones del combustible vegetal antes del inicio del fuego y sus efectos posteriores en la propagación, y un análisis integrado del paisaje afectado. Por constituirse en un análisis integrado de todos los aspectos anteriores, la investigación indicada presenta la importancia de ser el primer estudio formal realizado en el país, que permite calificar en forma más precisa aquellas áreas naturales que han sido permanentemente afectadas por el fuego, e incrementar el conocimiento ya existente en este tema. El método utilizado y sus resultados, son aplicables y comparables a otras regiones de clima mediterráneo, tales como España, Francia o Portugal. Como limitaciones, cabe destacar que para obtener mejores estimaciones acerca de daños al paisaje vegetal, es necesario disponer de mayores antecedentes de campo, y registros históricos de mayor data, aspecto que en Chile sólo es posible de obtener a partir del año 1976.

1.3.3 Métodos utilizados

Área de estudio. La investigación abarcó las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule (figura 1.3.3.a), con una superficie total de 7.836.288 hectáreas. En todas ellas, se han presentado incendios forestales expresados en impactos sociales, ambientales y económicos en las cuencas hidrográficas que los contienen. Las Regiones señaladas, en conjunto representan alrededor del 10% del total de la superficie continental de Chile. Sin embargo, según los antecedentes elaborados por Julio (2007), y posteriormente actualizados con los registros del Sistema Nacional Estadístico de Manejo del Fuego de CONAF (2011), la ocurrencia de incendios forestales y las superficies afectadas por el fuego alcanzaron el 34,7 % y el 51,4 %, respectivamente, del total nacional.

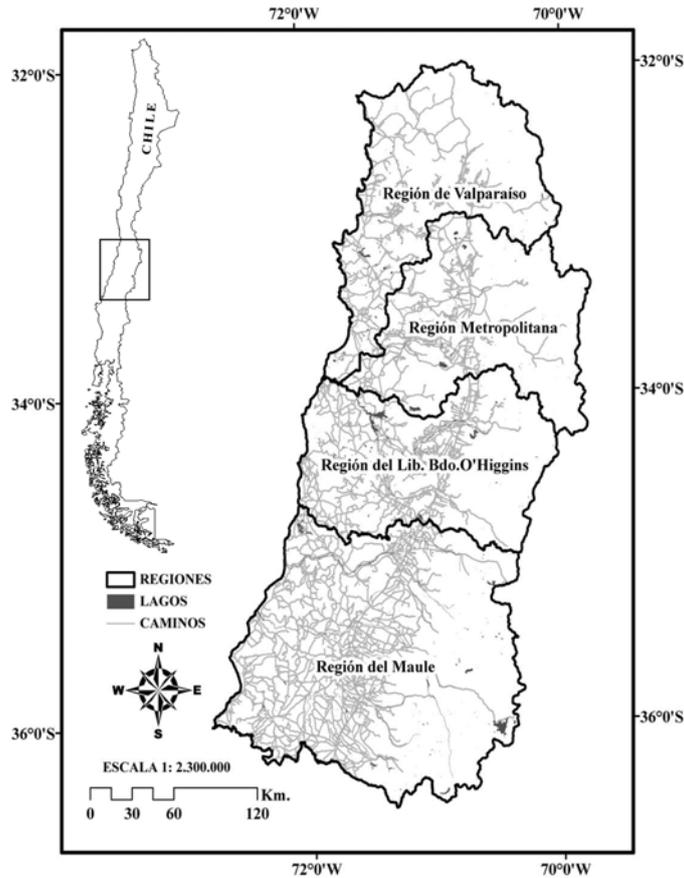


Figura 1.3.3.a. Área de estudio

Fase de gabinete: Análisis histórico de incendios en el área de estudio. Se recopilieron antecedentes disponibles en actas de incendios forestales proporcionados anualmente por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) en Chile, de manera de poder filtrar y seleccionar aquellos registros que corresponden a grandes incendios en vegetación nativa. Para ello se consideraron las cifras disponibles desde el año 1976 hasta 2010, y para las cuatro regiones consideradas. Los datos fueron separados por tipo de vegetación, filtrando aquellos eventos que afectaron a bosque y matorral nativo. Inicialmente se consideró una selección de incendios con tamaños superiores a 300 ha. No obstante de esta nueva selección, se optó por considerar aquellos que superaron las 2.000, por concentrarse en ellos, los mayores daños. Estos antecedentes permitieron definir con mayor claridad aquellas áreas consideradas para la fase de campo, y con ello el establecimiento de áreas muestra y testigo.

Fase de campo: áreas muestra y testigo, y análisis del comportamiento del fuego. Para cada región, se eligieron y visitaron áreas afectadas por incendios en vegetación nativa y

también áreas testigo, para establecer parámetros de comparación. En cada caso se efectuó un inventario de vegetación quemada y no quemada, en parcelas de 100 m². En estas áreas se estudió la vegetación usando la escala de Braun-Blanquet (1948), perfeccionada posteriormente por Braun-Blanquet y Bolós (1958), en la que se combinan la abundancia-dominancia². Los índices “+, r”, registran la abundancia, mientras que los restantes (1, 2, 3, 4, 5) tienen en cuenta la cobertura o dominancia (cuadro 1.3.3.a). En la práctica ocurre que en la mayoría de los sectores en donde se establecen parcelas de muestreo, la clase asociada al índice “2” agrupa a una diversidad de situaciones, por lo que en muchos casos se opta por subdividir, de acuerdo a lo propuesto por Westhoff y Maarel (1978).

Cuadro 1.3.3.a

Escala de abundancia-dominancia de Braun-Blanquet y Bolós (1958).

| Índice | Significado |
|--------|---|
| r | Un solo individuo, cobertura despreciable |
| + | Más individuos, cobertura muy baja |
| 1 | Cobertura menor del 5% |
| 2 | Cobertura del 5 al 25% |
| 2m | Cobertura próxima al 5% |
| 2a | Cobertura del 5 al 15% |
| 2b | Cobertura de 15 al 25% |
| 3 | Cobertura del 25 al 50% |
| 4 | Cobertura del 50 al 75% |
| 5 | Cobertura igual o superior al 75% |

Este método es el apropiado para ser aplicado en parcelas regulares con tamaños máximos de 200 m² en el caso de bosques, bosques abiertos y matorrales altos, pudiendo llegar hasta un umbral inferior de 50 m² para el caso de parcelas en donde predominan las leñosas altas abiertas y matorrales de distinto tamaño. Para el caso de las mediciones efectuadas en terreno, las áreas consideradas (100 m²) se ajustaron a estos criterios. En cada área de muestra y testigo, se determinó la “fidelidad” de las especies, y que corresponde a la verificación si éstas son representativas del entorno geográfico del lugar, y como consecuencia de ello, asignar este diagnóstico al entorno (Turner *et al.* 2001). Este criterio puede utilizarse además como un complemento a la

² Concepto referido a la asignación de una u otra especie como característica a una u otra de las comunidades en que se presente. Contempla además el estudio de las diferencias de abundancia entre distintas comunidades.

caracterización de las macro unidades florísticas que debieran ser típicas del ecosistema local (cuadro 1.3.3.b).

Cuadro 1.3.3.b
Grados de fidelidad para las especies encontradas en la parcela. Turner *et al.* (2001).

| Valor | Carácter |
|-------|---|
| 5 | Especie exclusiva (característica), confinada a una sola comunidad vegetal o grupo de comunidades. |
| 4 | Especie selectiva, con clara preferencia por una determinada comunidad vegetal. |
| 3 | Especie preferente, que aunque se presenta en varias comunidades, es más abundante o presenta mayor vitalidad en el que es objeto de estudio. |
| 2 | Especie compañera, indiferente, sin una preferencia marcada por ninguna comunidad vegetal. |
| 1 | Especie accidental, que tiene claramente su óptimo en otra comunidad. |

La fidelidad de una especie puede ser territorial, si posee un área mucho mayor que el de la propia comunidad a la que pertenece, lo cual es frecuente. En tal caso su óptimo ecológico puede variar, particularmente cuando se aproxima a los límites de su área de distribución natural. Ejemplos muy conocidos y estudiados para los paisajes mediterráneos de Chile central son las especies del matorral nativo denso, tales como el litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), quillay (*Quillaja saponaria* (Molina)), y boldo (*Peumus boldus* (Molina)), que extienden su distribución a lo largo de más de 2.000 km; no así como el caso de otras especies como palma chilena (*Jubaea chilensis* (Molina) Baillon), confinada a áreas muy específicas.

En forma complementaria se realizó un análisis del comportamiento del fuego³, mediante la instalación de parcelas de medición. Una correspondió a un sector afectado por el fuego, y la otra, a un sector vecino no quemado. Se estableció como requisito que ambas parcelas tuviesen condiciones ambientales similares con anterioridad al incendio ocurrido en el lugar. Es decir, sin que apreciaran diferencias en el tipo y condiciones del modelo de combustible (carga, continuidad y distribución) y en la topografía (pendiente y exposición), existentes en ambas.

³ Conceptualmente corresponde al conjunto de efectos, principalmente de carácter físico-mecánicos y químicos, que se observan en el ambiente afectado por la propagación del fuego (Julio 2009).

En la parcela no afectada, agregando los antecedentes del estado meteorológico del lugar en el momento del inicio del incendio (temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento y estado o condición de humedad de la vegetación fina y muy fina), fue posible simular en forma retrospectiva el comportamiento del fuego por medio de las fórmulas y tablas provistas por el Sistema KITRAL® (Julio 2007), mediante el empleo de sus fórmulas de propagación lineal del fuego⁴. El análisis de los efectos del fuego en la parcela quemada permitió validar los resultados de la simulación del comportamiento del fuego y, además, estimar en forma preliminar los impactos del incendio en el ambiente. Esta fase permitió además, evaluar con precisión y profundidad los impactos del fuego en el paisaje, en la generación de vegetación post-fuego y en las propiedades físicas y químicas del suelo.

Paisaje. Como fase final de esta investigación, se efectuó un estudio local de paisaje mediante el uso de Fragstats© v.3.3, y la expresión de sus resultados en un sistema de información geográfica. Se aplicaron métricas de tamaño, forma, conectividad y relaciones geométricas de cada uno de los sectores afectados por el fuego, y considerando el trabajo de campo. Como apoyo se utilizaron imágenes procedentes de Google Earth™ v.5.0.11, las cuales fueron ajustadas a los parámetros geográficos (datum WGS84, Huso 19 Sur en coordenadas utm), y mejoradas en ERDAS Imagine© v.9.1 para resaltar las áreas de mayor interés. El siguiente paso fue la construcción de una base de datos arco-nodo en Arc/Info Workstation© v9.0, considerando además, las características topográficas de pendiente y altitud en cada sector, con el propósito de delimitar y calcular con precisión las áreas y perímetros de cada unidad homogénea, y facilitar de esta manera la conversión de datos a formato *raster*⁵ (GRID) para ser incorporado al cálculo de métricas de paisaje. Las correlaciones entre parámetros se realizaron mediante XLSTAT® v.4.01, y verificadas en SPSS© v.15. Como paso final,

⁴ Ecuaciones elaboradas por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile (Julio *et al.* 1995), y validadas por Castillo (1998). El Sistema KITRAL® es un software desarrollado por este laboratorio, el cual contempla entre sus diferentes comandos, a un software de simulación de incendios que permite calcular la velocidad de propagación lineal del fuego en metros por segundo, y que considera como factores de entrada, el modelo de combustible, contenido de humedad de la vegetación fina y muy fina, los efectos de la pendiente y el viento.

⁵ Estructura matricial de datos que permite efectuar operaciones matemáticas entre capas geográficas de información. Para estos efectos el raster se almacena en formato GRID de Arc/Info.

se realizó un análisis de componentes principales para caracterizar en forma conjunta los principales parámetros de paisaje, entre ellos, el tamaño y forma de áreas quemadas.

1.3.4 Resultados

Estadísticas de incendios. De acuerdo a los datos disponibles para el período 1976-2010, en las cuatro regiones se produjeron aproximadamente 50.116 incendios forestales, afectando a una superficie total de 611.665 ha (cuadro 1.3.4.a). De este total, 326 incendios corresponden a superficies mayores a 300 ha en vegetación nativa quemada, y cuya suma total asciende a 358.211 ha. A su vez, de estos 326 registros, 34 de ellos corresponden a incendios de gran magnitud (superiores a 2.000 ha). Este antecedente revela que los incendios mayores (3,8 % del total de la ocurrencia), generaron alrededor del 56% del daño total a la vegetación afectada en esta área.

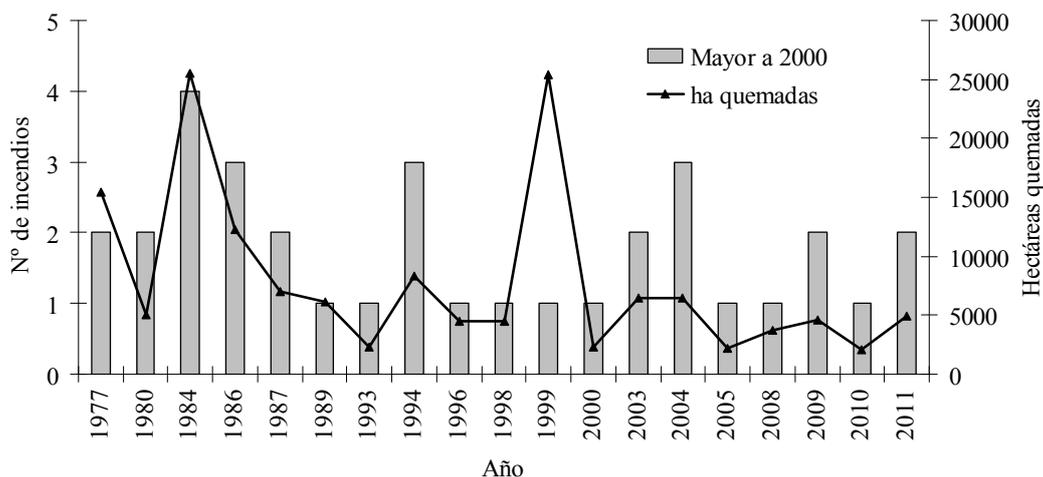
Cuadro 1.3.4.a
Ocurrencia de incendios forestales y superficies afectadas en Chile (1976-2010).

| Región | Nº de incendios | % respecto a total nacional | Sup. (ha) | % Superficies respecto a total nacional |
|-------------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|---|
| de Valparaíso | 23.306 | 16,59 | 222.779 | 16,84 |
| Metropolitana | 11.624 | 8,27 | 109.653 | 8,28 |
| del Lib. Gral. Bdo. O'Higgins | 6.231 | 4,44 | 161.640 | 12,22 |
| del Maule | 8.955 | 6,37 | 117.593 | 8,89 |
| Total | 50.116 | 35,67 | 611.665 | 46,23 |

Las regiones con una mayor ocurrencia son las de Valparaíso y Metropolitana, las cuales no coinciden con las que tienen una mayor superficie afectada (del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule). En relación a la recurrencia total de incendios forestales, debe señalarse que se presentan grandes diferencias entre las regiones y, también, entre las comunas de ellas, derivadas de las condiciones de riesgo y peligro que las afectan. Esto se debe al significativo efecto de la población en la iniciación de los fuegos, principalmente en la periferia de áreas urbanas, a lo largo de carreteras y caminos, y también por la variabilidad de los factores ambientales que inciden en la iniciación de los incendios (clima, topografía y tipos vegetacionales). Las regiones más afectadas por grandes incendios corresponden a las de Valparaíso y del Libertador General Bernardo O'Higgins, con cifras que fluctúan entre 25.496 hectáreas (año 1984) y 25.389 hectáreas (año 1999), de acuerdo a lo señalado en el gráfico

1.3.4.a. No existen patrones claros de recurrencia, principalmente a la falta de antecedentes de mayor data histórica. Los datos disponibles indican la sucesión de grandes eventos en un período aproximado de 35 años.

Gráfico 1.3.4.a
Número de grandes incendios y superficie quemada (vegetación nativa).



Aún cuando en el análisis de 35 años se manifiesta una tendencia cíclica de grandes incendios cada 15 años (años 1984 y 2000), el comportamiento de la ocurrencia en relación a la magnitud de los incendios, debe ser estudiado a una escala mayor de tiempo, considerando que en Chile, sólo existen registros fidedignos a partir del año 1976.

Fase de campo. La estructura de la vegetación se explica en el anexo 1. Los sectores analizados indican rastros de incendios de alta intensidad calórica (ver resultados de comportamiento del fuego), con una comunidad vegetal densa dominada por plantas nativas de rápida regeneración, pero de escasa cobertura respecto a las áreas testigo. Estos antecedentes coinciden con los reportados por Villaseñor (1977), para el estudio de comunidades vegetales afectadas por incendios en esta región. Los resultados de perfiles horizontales y verticales en cada parcela (anexo 2), señalan estructuras dominadas por leñosas medias y bajas, entremezcladas con matorral nativo en alto estado de regeneración, y cuyo estado general ha persistido en los últimos 35 años, no evidenciándose cambios sustantivos para los años venideros, de acuerdo a la dinámica actual de incendios y sus efectos en el paisaje vegetal nativo. Una muestra gráfica de las

áreas afectadas por el fuego se ilustra en la figura 1.3.4.a. Corresponde a parte de la campaña de campo realizada para el estudio de estas comunidades vegetales.

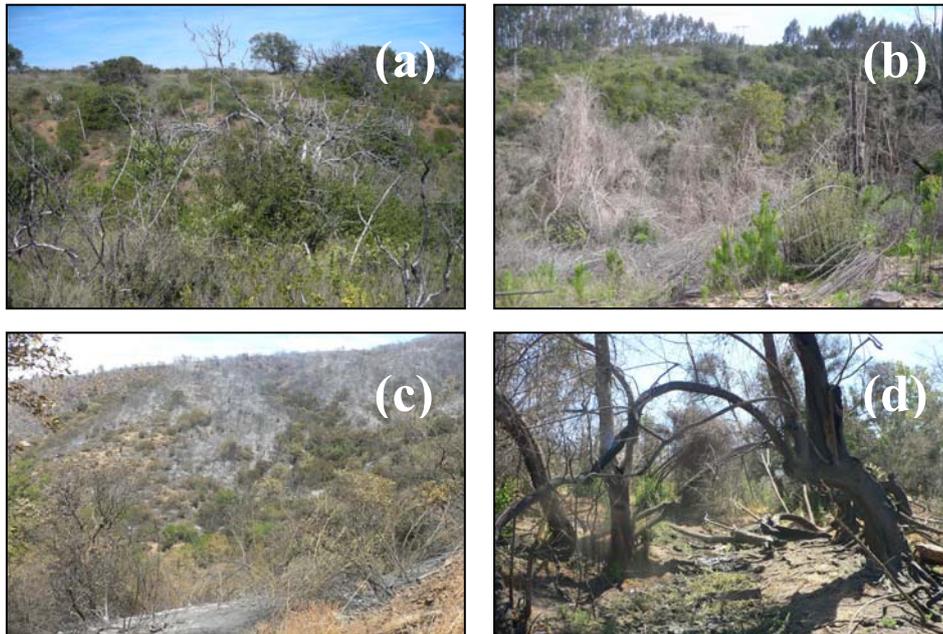


Figura 1.3.4.a

Comunidades de vegetación nativa afectadas por el fuego. (a): Localidad de San Juan; (b): San Gerónimo. (Región de Valparaíso, sector costa). En ambos casos el grado de afectación producto de la acción del fuego es moderado a bajo. (c): Melipilla (Región Metropolitana) y (d): Nanchagua (Región del Maule). Grados de afectación alto a severo.

Análisis del comportamiento del fuego. De acuerdo a los datos recopilados en campo, se exponen los resultados de cinco grandes incendios en vegetación nativa (cuadro 1.3.4.b), para las áreas contempladas en el estudio, en lo que respecta a las magnitudes de los parámetros del comportamiento del fuego, y una reseña sobre los efectos post-incendio.

Cuadro 1.3.4.b

Comparación del comportamiento del fuego. Vegetación nativa quemada. Valores promedio para todos los incendios analizados.

| Incendio N°: | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^b | 4 ^c | 5 ^d |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Parámetros: | | | | | |
| Fecha del incendio | 18.12.07 | 02.03.08 | 07.02.09 | 15.01.09 | 22.09.07 |
| Superficie afectada (ha) | 3.000 | 3.765 | 2.832 | 3.600 | 225 |
| Combustible disponible (ton ha ⁻¹) | 37,4 | 39,3 | 26,2 | 30,8 | 49,5 |
| Velocidad propagación (m h ⁻¹) | 372 | 356 | 4.416 | 1.163 | 28 |
| Intensidad calórica (kcal m ⁻¹ s ⁻¹) | 712 | 734 | 5.004 | 2.172 | 103 |
| Longitud de llamas (m) | 3,03 | 3,07 | 7,43 | 5,06 | 1,24 |
| Severidad del incendio | Media | Media | Extrema | Alta | Baja |
| Consumo de combustibles | Medio | Alto | Muy Alto | Muy Alto | Bajo |
| Regeneración post-incendio | Muy Alta | Muy Alta | Baja | Media | Baja |
| Efecto en el suelo (visual) | Bajo | Bajo/ Medio | Medio/Alto | Medio | Medio |

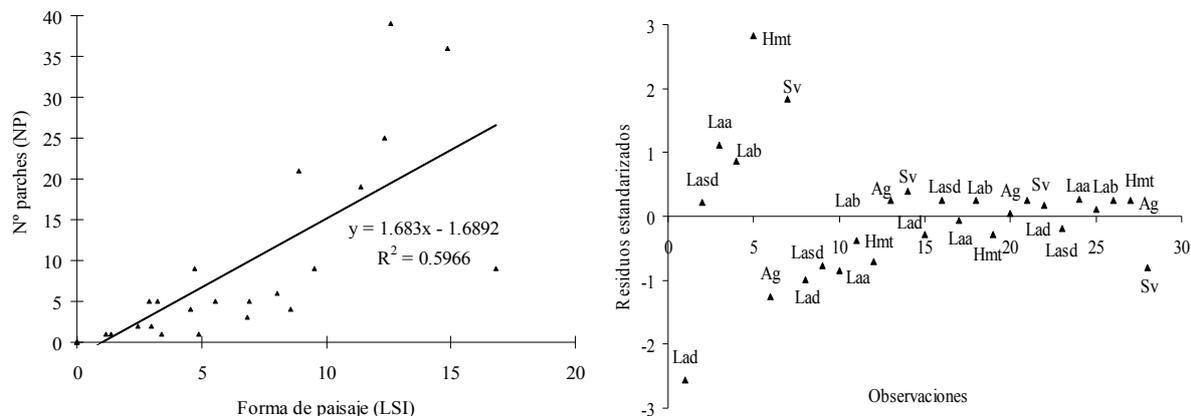
^aRegión de Valparaíso, ^bRegión Metropolitana, ^cRegión del Libertador General Bernardo O'Higgins, ^dRegión del Maule. Fuentes: Julio et al, (2011); Rodríguez y Silva et al, (2010).

Se aprecia, de manera preliminar, una correlación media a alta entre la severidad de los incendios con los efectos del fuego en la vegetación y el suelo. Las grandes diferencias existentes en la velocidad de propagación simulada mediante KITRAL®, se debe principalmente a las características de la continuidad horizontal y vertical de la vegetación. Estos aspectos se ven corroborados en el análisis de los perfiles de vegetación para cada una de estas áreas. Los valores de severidad, consumo de combustibles, regeneración y efectos en el suelo, fueron estimados visualmente considerando los valores de los parámetros obtenidos de la simulación, y de acuerdo a los antecedentes publicados por Julio (1990) y Castillo (2006).

Paisaje. Las principales métricas analizadas en Fragstats©, se enfocan en el análisis del tamaño de fragmentos en cada parcela muestra, su forma y continuidad de bordes, aspectos clásicos en el análisis de patrones espaciales de ocupación (Turner *et al.* 2001). Considerando las formaciones vegetales presentes, existe una correlación entre el número de fragmentos (NP) de leñosas altas densas y semidensas, respecto al aumento del coeficiente de forma (LSI) (gráficos 1.3.4.a-b). Este aspecto es más evidente en las regiones de Valparaíso y Metropolitana, en donde los niveles de intervención y el grado de recurrencia de incendios, ocasiona un aumento del efecto borde, y con ello, valores de forma más elevados que en vegetación con menores factores de disturbio. Más al sur, en las áreas estudiadas, la dispersión de datos es mayor, por lo que el grado de asociación de estas dos variables tiende a ser menor.

Gráficos 1.3.4.a-b

(a) Izquierda: correlación entre el número de parches (NP) y la forma de paisaje (LSI) ($P < 0,05$). (b) Derecha: análisis de residuos entre estos dos factores ($P < 0,05$).



Estos resultados dan la primera aproximación respecto a las diferencias existentes en el grado de fragmentación de paisajes entre las regiones analizadas. En el caso del análisis de residuos, no se observa una clara tendencia entre tipos de vegetación asociadas a patrones de fragmentación. Sí lo hay, respecto a las diferencias en latitud. En general, la tendencia es una mayor asociación en las áreas quemadas de las regiones de Valparaíso y Metropolitana, en donde la ocurrencia de incendios es más elevada. Desde el punto de vista multivariado, las correlaciones más altas se concentran en aquellos parámetros que hacen referencia a largo y número de parches (cuadro 1.3.4.c), mientras que los parámetros más relevantes en la expresión de paisajes afectados por el fuego, para las áreas estudiadas, son los asociados a la forma de sus fragmentos, con un 60,37% de varianza explicada para el primer factor (cuadro 1.3.4.d), y la expresión de tamaño de los mismos, con 28,53% para el segundo factor.

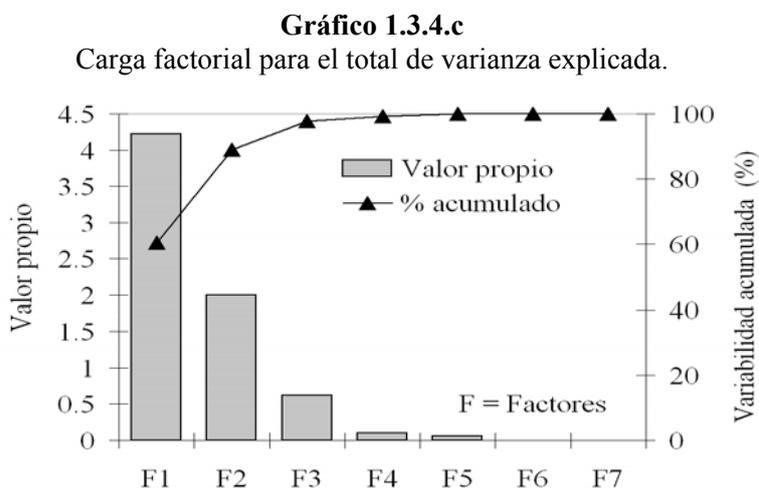
Cuadro 1.3.4.c
Matriz de correlación (Pearson)

| Variabes | Área (CA) | Nº parches (NP) | Densidad (PD) | Parche más largo (LPI) | Bordes totales (TE) | Densidad de bordes (ED) | Forma de paisaje (LSI) |
|-------------------------|-----------|-----------------|---------------|------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Área (CA) | 1 | 0,074 | 0,078 | 0,939 | 0,507 | 0,511 | 0,261 |
| Nº parches (NP) | 0,074 | 1 | 0,999 | -0,020 | 0,516 | 0,514 | 0,772 |
| Densidad (PD) | 0,078 | 0,999 | 1 | -0,014 | 0,519 | 0,517 | 0,774 |
| Parche más largo (LPI) | 0,939 | -0,020 | -0,014 | 1 | 0,461 | 0,466 | 0,204 |
| Bordes totales (TE) | 0,507 | 0,516 | 0,519 | 0,461 | 1 | 1,000 | 0,841 |
| Densidad de bordes (ED) | 0,511 | 0,514 | 0,517 | 0,466 | 1,000 | 1 | 0,840 |
| Forma de paisaje (LSI) | 0,261 | 0,772 | 0,774 | 0,204 | 0,841 | 0,840 | 1 |

Cuadro 1.3.4.d
Contribución de las variables para cada factor (%). F= factores.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | Total |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Área (CA) | 6,87 | 30,04 | 13,11 | 0,90 | 49,05 | 0,07 | 0,01 | 100,00 |
| Nº parches (NP) | 13,71 | 15,39 | 17,56 | 2,97 | 0,39 | 49,95 | 0,02 | 100,00 |
| Densidad (PD) | 13,81 | 15,16 | 17,61 | 2,71 | 0,67 | 50,01 | 0,01 | 100,00 |
| Parche más largo (LPI) | 5,27 | 34,35 | 9,80 | 4,73 | 45,82 | 0,01 | 0,00 | 100,00 |
| Bordes totales (TE) | 20,14 | 0,96 | 19,24 | 9,43 | 0,39 | 0,01 | 49,81 | 100,00 |
| Densidad de bordes (ED) | 20,15 | 1,03 | 19,02 | 9,24 | 0,36 | 0,01 | 50,18 | 100,00 |
| Forma de paisaje (LSI) | 20,01 | 3,04 | 3,64 | 70,00 | 3,29 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |

Producto de estos resultados, el análisis de componentes principales arroja valores propios de 4,22 para el primer componente, asociado a formas de paisaje en comunidades vegetales, y 1,99 para el concepto de forma, expresado en áreas quemadas y recuperadas por la regeneración, con un 88,91% de carga factorial para el análisis total de componentes principales (gráfico 1.3.4.c).



1.3.5 Discusión

La metodología aquí aplicada, para el estudio de la vegetación nativa afectada por incendios, presenta similitudes a otros estudios de similares características en ecosistemas mediterráneos. Por ejemplo, Mouillot *et al.* (2003), estudian el comportamiento de la vegetación en ecosistemas mediterráneos de Francia, afectados intensamente por el fuego en los últimos 20 años. En sus resultados, demuestran las alteraciones graduales de los ecosistemas vegetales, al realizar una descripción histórica de la vegetación original, y sus cambios a través del tiempo por la acción del fuego. Para ello los autores se apoyan en la medición in situ de la estructura de la vegetación con y sin disturbio (muestra – testigo). También determinan que la alta frecuencia de

pequeños incendios produce un efecto sinérgico en la estructura de la vegetación mediante un aumento de los parches quemados, e incremento del efecto borde entre áreas quemadas y no quemadas, aspectos muy similares a los aquí reportados. Los resultados derivados del muestreo en campo en las cuatro regiones de Chile central y para todos los sectores analizados, otorgan testimonios sobre la existencia de patrones espaciales de recurrencia de fuegos, tanto a escala 1:50.000 como a escala detallada, aún cuando, como lo corrobora Castillo (2006) y Rundell (1977), la comprobación de este tipo de fenómeno debe ser validada en estudios de mayor data histórica, desde decenas a cientos de años. Respecto a la capacidad de retoñación de especies y la estructura vegetal post fuego, los resultados confirman los estudios realizados por Altieri y Rodríguez (1974) y Avila *et al.* (1983), en el sentido que las especies de bosque mediterráneo, mayoritariamente compuesto por leñosas altas y matorral esclerófilo de Chile central responden en forma similar respecto a otros ambientes mediterráneos en donde la presencia del fuego es derivada principalmente por acciones derivadas de la actividad humana. Por el contrario, es posible evidenciar temporadas de fuegos donde la ocurrencia y daños son estadísticamente más bajas respecto a años anteriores. Estas variaciones son producto de una diversidad de factores, no necesariamente atribuibles a factores climáticos. Se ha demostrado que, mientras prevalecen condiciones de altas temperaturas, baja humedad relativa del aire y de los combustibles vegetales, en muchos casos incluso la iniciación de fuegos es más baja respecto a otros años con menor sequía. Independiente de lo anterior, la sucesión de fuegos sobre este paisaje vegetal ha propiciado el desencadenamiento de un proceso regresivo en la comunidad de especies originales, favoreciendo la entrada de plantas adaptadas al cubrimiento de suelos quemados mediante la propagación por semillas y propágulos.

Desde el punto de vista de paisaje, los resultados aquí obtenidos son una respuesta a los procesos de disturbios previamente definidos y caracterizados por Turner *et al.* (2003), como eventos relativamente discretos que irrumpen en la estructura de un ecosistema, comunidad o población de un paisaje. Estos disturbios, como los observados en esta investigación en las cuatro regiones analizadas, crean patrones espaciales de comportamiento de la vegetación natural y un mosaico de estados que los ecólogos lo han definido como una relación mosaico-paisaje (Daigle, 1996; Parminter, 1996; Turner *et al.* 2003). En una caracterización fina de las áreas analizadas en campo, como en los testimonios de los grandes incendios que se localizaron en ellas, se comprueban las

referencias de Gergel y Turner 2002, Turner *et al.* 2001 y Turner *et al.* 2003, en el sentido que la posición topográfica incluyendo la altitud, pendiente y exposición, influyen decisivamente en la probabilidad, estación y magnitud de los disturbios. Incluso en muchos casos es posible determinar patrones de magnitudes de incendios relacionados a tipos de paisaje (Rollins *et al.* 2002, Cardille *et al.* 2001). Un aspecto fundamental se refiere al tamaño de los parches, y que en el análisis multivariado de datos, expresó una alta significancia, tal como lo reporta Daigle (1996), cuando compara las características espaciales de paisajes en la Columbia Británica sujetos a eventos regulares de incendios con tamaños entre 60 a 100 hectáreas, dispersos en un área extensa. En su investigación concluye que la influencia de los parches quemados respecto a los sectores no quemados, inciden en un área directa superior a las 500 hectáreas en los bordes directos de las áreas quemadas. Lo anterior queda reflejado en cambios importantes en el suelo, vientos locales, pérdida de biodiversidad y la entrada de plantas invasoras.

Respecto a los efectos directos de los incendios en el repoblamiento, claramente existe una fuerte actividad regenerativa, dominada por especies del matorral nativo adaptadas a la alta recurrencia de fuegos. En este sentido, Fulé *et al.* (2003) estudian la dinámica del fuego en bosques de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* P. et C. Lawson), tomando un período aproximado de 300 años, mediante técnicas dendrocronológicas. Los episodios de fuego vienen precedidos de cambios importantes en la estructura y cobertura de estos bosques en la relación microclima-suelo. Mediante el uso de esta técnica se demuestra que la magnitud de las cicatrices de fuego, inciden directamente en los procesos de repoblamiento y en la permanencia de parches con lenta recuperación de vegetación original, dando paso a parches con estructura y composición de especies vegetales diferentes. Otro aspecto relacionado con el efecto del fuego en el paisaje, es la influencia de áreas urbanas. Este factor es de alta trascendencia al momento de evaluar el estado de conservación de paisajes vegetales cercanos a estas áreas. El mismo autor, tomando un período de 10 años en un hábitat donde predomina Pino ponderosa, detecta que desde el aumento en la tasa de urbanización, la cercanía de actividades de recreación, han ocasionado que en un lapso aproximado de 7 años (período 1995-2001), la frecuencia de incendios y gravedad de éstos, ocasiona alteraciones en el paisaje traducidas en cambio en la composición de especies, disminución de la materia orgánica, y el paso de un estado de mosaicos diversos a un gran parche homogéneo.

Los resultados del comportamiento del fuego derivados de las campañas de campo, ponen de manifiesto que la topografía por ejemplo, influye directamente en la velocidad de avance del fuego, pues a mayor pendiente se obtiene una mayor inclinación de las llamas y una mayor intensidad calórica a nivel del suelo. Adicionalmente, la acumulación de material vegetal seco altamente combustible, especialmente en quebradas y zonas de altas pendientes hace que el fuego presente comportamientos extremos (Mouillot *et al.* 2003; Rodríguez y Silva *et al.* 2010), con intensidades calóricas que pueden superar fácilmente las $2.000 \text{ kcal m}^{-1}\text{s}^{-1}$, producto de la alta carga de combustibles y su alta inflamabilidad, como lo reportado en los incendios de las regiones Metropolitana y del Maule, descritos en el cuadro 4. Las áreas afectadas por propagación continua, tienden a formar parches homogéneos de recuperación vegetal post fuego, a diferencia de aquellos sectores en donde se ha producido saltos de fuego. No se evidencian grandes diferencias en los niveles de recuperación en el estrato aéreo, considerando los niveles de intensidad. Sin embargo, sí se aprecian mayores daños en el suelo, en donde es posible ver pérdidas totales de estrata orgánica y rápidos procesos de erosión en laderas y partes bajas en donde desembocan cursos de agua.

El factor humano incide directamente en la recurrencia, y por lo tanto en el peligro y daño potencial que puede alcanzar el fuego. En este sentido, aún cuando se verificaron extensas áreas quemadas en zonas alejadas, el nivel de intervención puede condicionar claramente la relación de tamaño, forma y cohesión de las unidades de paisaje vegetal.

Como comentario final, los resultados obtenidos en las cuatro regiones analizadas son válidos como aporte al estado actual de investigación científica sobre el tema, al no existir en Chile antecedentes previos que integren todos los componentes aquí explicados. No obstante lo anterior, resulta necesario complementar estos resultados con estudios futuros que consideren otras áreas muestra afectadas por incendios en vegetación nativa, de manera de poder aportar mayores antecedentes conducentes a proponer estrategias de recuperación de paisajes quemados y los mecanismos para la protección de los mismos. Para ello, se cuenta con una primera plataforma geográfica de datos, generada por esta investigación.

CAPÍTULO 1.- Los incendios forestales en Chile.
Énfasis en la zona central.-

Anexo 1. Resultados de Braun-Blanquet (BB) / Westhoff y Maarel (WM). La= leñosas altas (>2m); Lb = leñosas bajas ($\leq 2m$; $\geq 0,5m$); Hmt = hierbas y matorral menor (<0,5m).

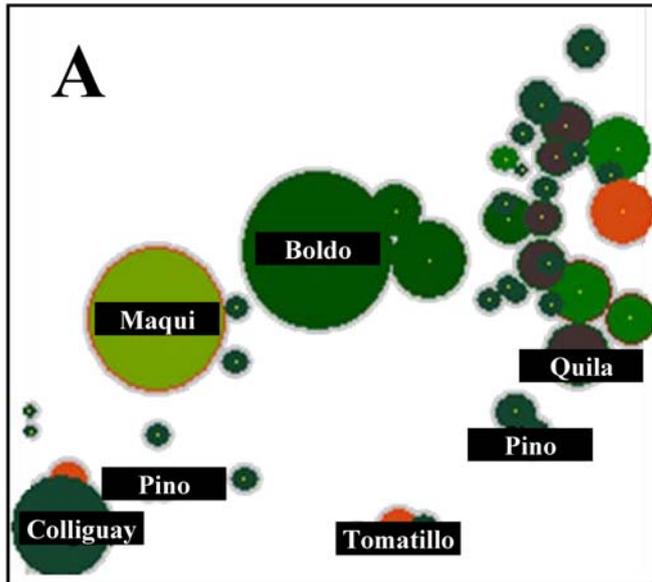
| Región de Valparaíso | | | | | | | |
|----------------------|------|-----------|------------|------|-----------|-----------|----------|
| Sector | Tipo | Pendiente | Exposición | Tipo | Índice BB | Índice WM | Carácter |
| 1 | | | | La | r | -- | 3-4 |
| 1 | T | 35° | N | Lb | 3 | -- | 3 |
| 1 | | | | Hmt | 3 | -- | 3 |
| 2 | | | | La | 2 | 2b | 3 |
| 2 | M | 20° | S | Lb | 4 | -- | 3-4 |
| 2 | | | | Hmt | 4 | -- | 3 |
| 3 | | | | La | 3 | -- | 3-4 |
| 3 | T | 2,5° | Plano | Lb | 2 | 2a | 3 |
| 3 | | | | Hmt | 5 | -- | 3 |
| 4 | | | | La | 3 | -- | 3-4 |
| 4 | M | 3° | Plano | Lb | + | -- | 3-4 |
| 4 | | | | Hmt | 4 | -- | 3 |
| 5 | | | | La | 5 | -- | 3-4 |
| 5 | T | 5,7° | Plano | Lb | 2 | 2a | 3 |
| 5 | | | | Hmt | 5 | -- | 3-4 |
| 6 | | | | La | + | -- | 3 |
| 6 | M | 22° | W | Lb | 4 | -- | 3-4 |
| 6 | | | | Hmt | 5 | -- | 3 |

| Región Metropolitana | | | | | | | |
|----------------------|------|-----------|------------|------|-----------|-----------|----------|
| Sector | Tipo | Pendiente | Exposición | Tipo | Índice BB | Índice WM | Carácter |
| 1 | | | | La | 2 | 2b | 3 |
| 1 | M | 2° | SE | Lb | + | -- | 2 |
| 1 | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |
| 2 | | | | La | 5 | -- | 3 |
| 2 | T | 7° | S | Lb | 4 | -- | 2 |
| 2 | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |
| 3 | | | | La | 3 | -- | 3 |
| 3 | M | 6° | SE | Lb | 4 | -- | 2 |
| 3 | | | | Hmt | 5 | -- | 1 |
| 4 | | | | La | 5 | -- | 3 |
| 4 | T | 2° | S | Lb | 2 | 2b | 2 |
| 4 | | | | Hmt | + | -- | 1 |
| 5 | | | | La | 3 | -- | 3 |
| 5 | M | 5° | SE | Lb | 3 | -- | 2 |
| 5 | | | | Hmt | + | -- | 2 |
| 6 | | | | La | 5 | -- | 3 |
| 6 | T | 3° | S | Lb | 4 | -- | 2 |
| 6 | | | | Hmt | + | -- | 2 |

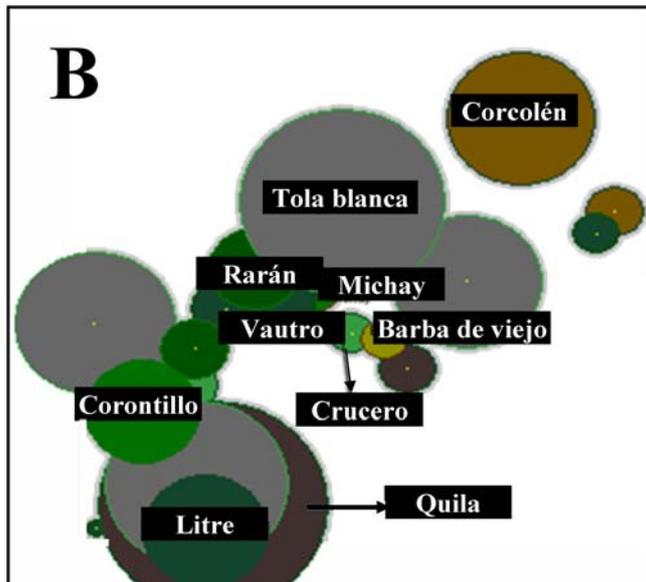
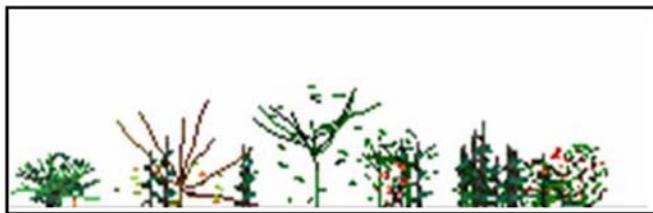
**CAPÍTULO 1.- Los incendios forestales en Chile.
Énfasis en la zona central.-**

| Región del Libertador General Bernardo O'Higgins | | | | | | | |
|--|------|-----------|------------|------|-----------|-----------|----------|
| Sector | Tipo | Pendiente | Exposición | Tipo | Índice BB | Índice WM | Carácter |
| 1 | M | 3° | E | La | 3 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 3 | -- | 2 |
| | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |
| 2 | T | 5° | SE | La | 3 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 2 | 2a | 2 |
| | | | | Hmt | 5 | -- | 2 |
| 3 | M | 5° | E | La | 4 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 2 | 2b | 4 |
| | | | | Hmt | 5 | -- | 2 |
| 4 | T | 7° | SE | La | 5 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 3 | -- | 3 |
| | | | | Hmt | 2 | 2b | 2 |
| 5 | M | 35° | N | La | 4 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 2 | 2a | 2 |
| | | | | Hmt | 2 | 2b | 2 |
| 6 | T | 8° | E | La | 5 | -- | 3 |
| | | | | Lb | 4 | -- | 4 |
| | | | | Hmt | 2 | 2b | 2 |
| Región del Maule | | | | | | | |
| Sector | Tipo | Pendiente | Exposición | Tipo | Índice BB | Índice WM | Carácter |
| 1 | M | 47° | N | La | 5 | -- | 5 |
| | | | | Lb | 2 | 2b | 3-2 |
| | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |
| 2 | M | 44° | N | La | 5 | -- | 5 |
| | | | | Lb | 4 | -- | 3-2 |
| | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |
| 3 | M | 52° | N | La | 5 | -- | 5 |
| | | | | Lb | 3 | -- | 3-2 |
| | | | | Hmt | 4 | -- | 2 |

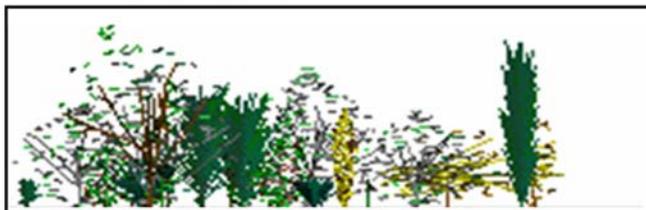
Anexo 2. Perfiles horizontales y verticales de parcelas muestra y testigo, para la caracterización de la vegetación afectada por el fuego.

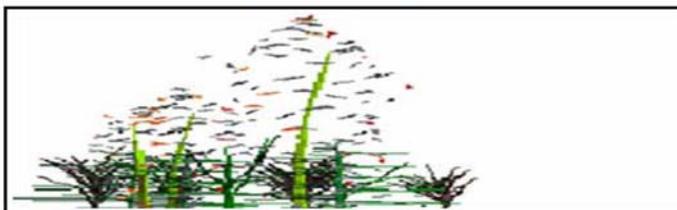
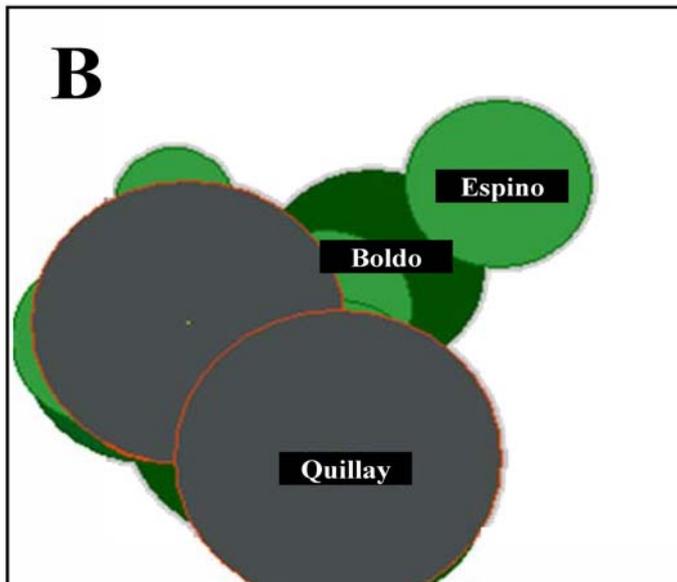
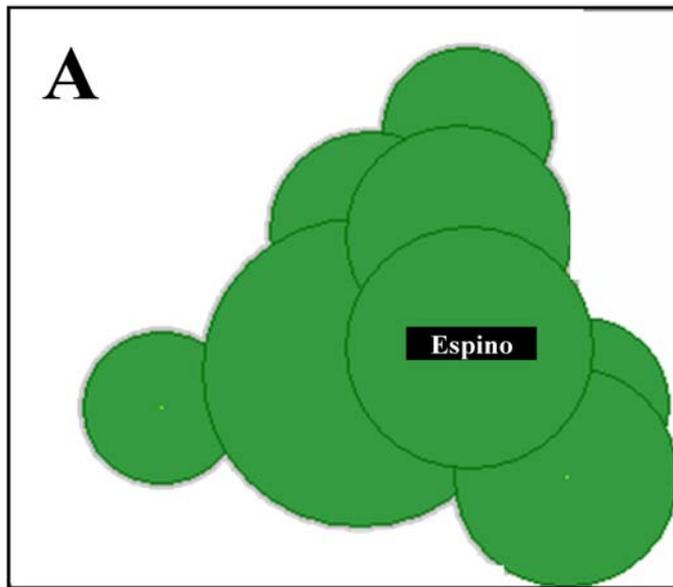


Región de Valparaíso. A) Parcela muestra. Especies presentes: colliguay (*Colliguaja odorifera* (Molina)), palo colorado (*Pouteria splendens* (A. DC.) O.K.), boldo (*Peumus boldus* (Molina)), michay (*Berberis chilensis* (Gill.) ex. Hook), corontillo (*Escallonia revoluta* (Ruiz et Pav.) Pers.), quila (*Chusquea cumingii* Nees.) y tomatillo (*Solanum ligustrinum* Lodd.).

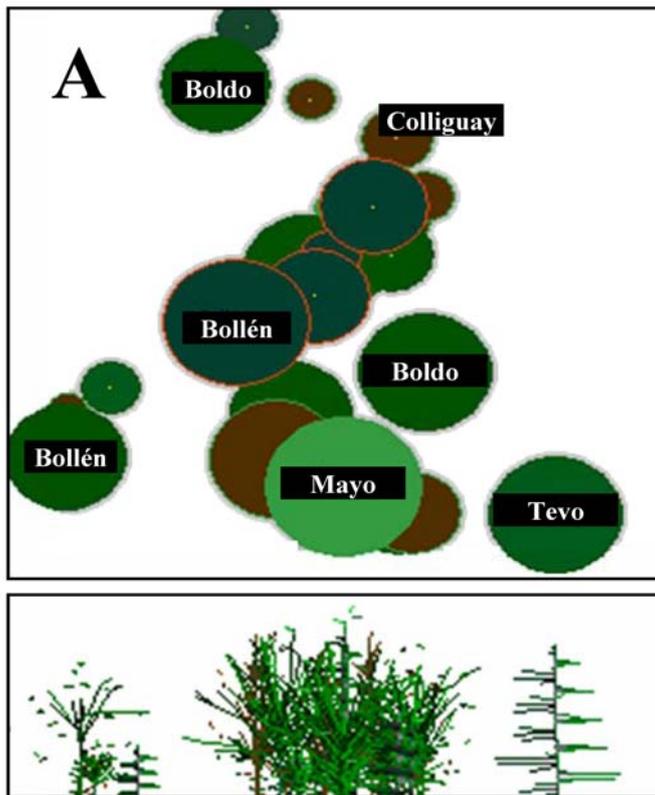


B) Parcela testigo. Especies presentes: vautre (*Baccharis concava* (Ruiz et Pav.) Pers.), quila (*Chusquea cumingii* Nees.), litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), tola blanca (*Proustia pyrifolia* DC.), crucero (*Colletia spinosa* Gmel.), michay (*Berberis chilensis* (Gill.) ex Hook.), rarán (*Myrceugenia obtusa* (D.C.) Berg.), barba de viejo (*Ageratina glechonophylla* (Less.) R.M.King et H.Rob.), corontillo (*Escallonia pulverulenta* (Ruiz & Pav.) Pers.), y corcolén (*Azara integrifolia* Ruiz et Pav.)

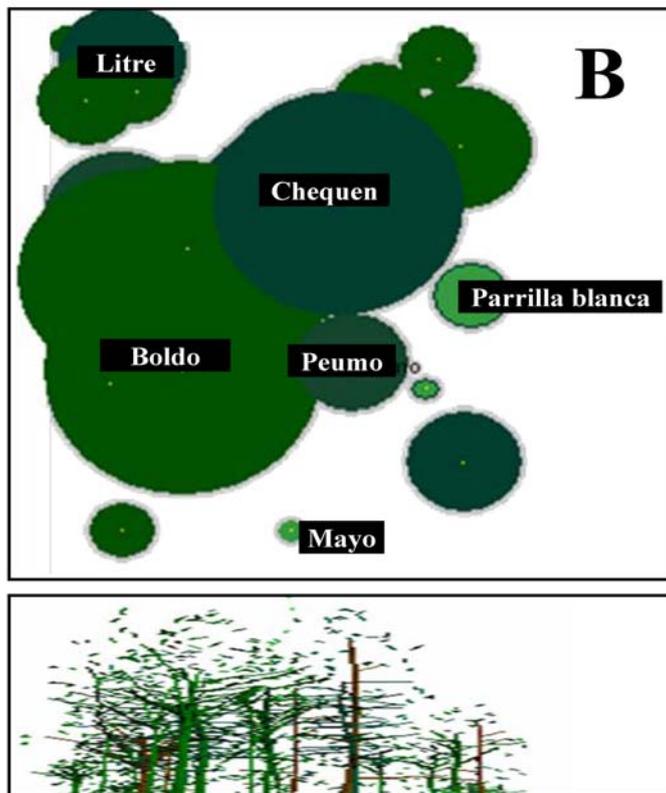




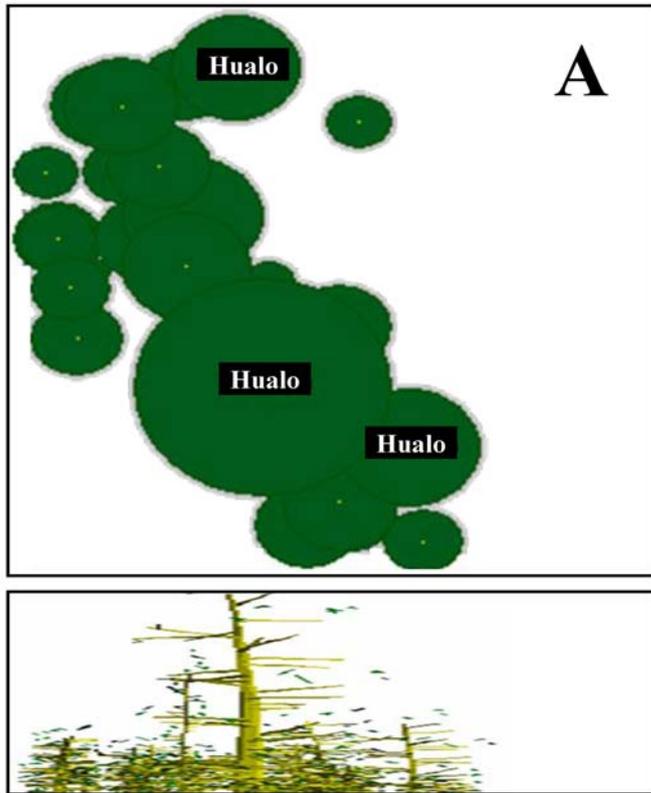
Región Metropolitana. A) Parcela muestra. Especies presentes: espino (*Acacia caven* (Molina) Molina). B) Parcela testigo. Especies presentes: espino (*Acacia caven* (Molina) Molina), quillay (*Quillaja saponaria* (Molina)), boldo (*Peumus boldus* (Molina)) y tevo (*Trevoa trinervis* Miers.).



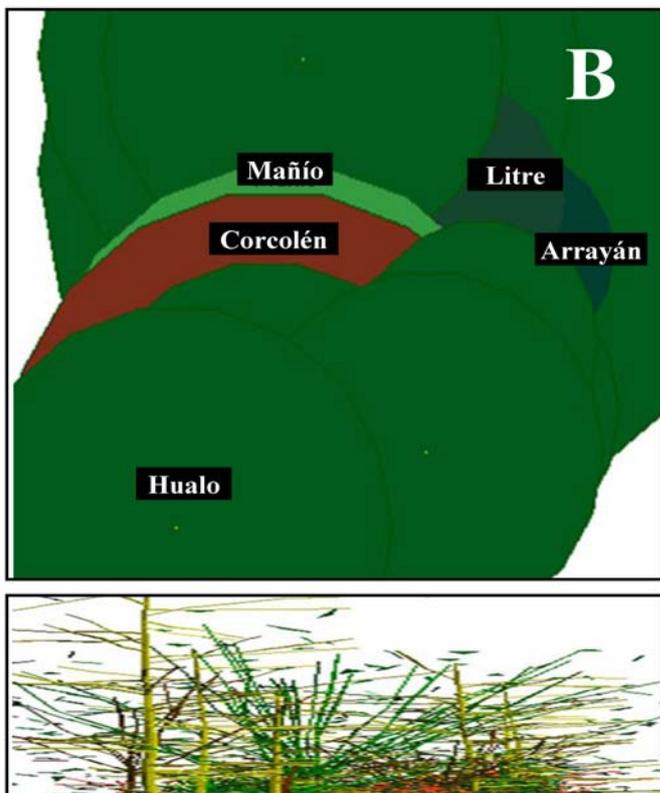
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. A) parcela muestra. Especies presentes: boldo (*Peumus boldus* (Molina)), tevo (*Trevoa trinervis* Miers.), colliguay (*Colliguaja odorifera* (Molina)), bollén (*Kageneckia oblonga* Ruiz et Pav.), litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), y mayo (*Sophora macrocarpa* J.E. Sm.).



Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. A) parcela muestra. Especies presentes: boldo (*Peumus boldus* (Molina)), tevo (*Trevoa trinervis* Miers.), colliguay (*Colliguaja odorifera* (Molina)), bollén (*Kageneckia oblonga* Ruiz et Pav.), litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), y mayo (*Sophora macrocarpa* J.E. Sm.).



Región del Maule. A) parcela muestra. Especies presentes: hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser).



B) parcela testigo. Especies presentes: hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser), arrayán (*Luma apiculata* (DC.) Burret), corcolén (*Azara petiolaris* (D. Don.) Johnst.), litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), mayo (*Sophora macrocarpa* J.E. Sm.), mañío (*Podocarpus salignus* D. Don.) y chaura (*Gaultheria phillyreifolia* (Pers.) Sleumer).

1.3.6 Opciones de restauración. Referencias.

Se analiza la integración de los datos y resultados generados de las etapas anteriores, y cómo ellos contribuyen a proponer acciones futuras para la restauración de áreas afectadas por incendios forestales. En tal sentido, como paso previo, resulta necesario definir brevemente algunos conceptos formales existentes en la bibliografía especializada, y que describen el paisaje y sus componentes asociados, en función de los daños y efectos ocasionados por el fuego.

- *Áreas degradadas*: Jardel *et al.* (2003), califican las áreas degradadas como aquellas caracterizadas por poseer un gradiente desde áreas o sitios poco alterados hasta aquellos con un marcado grado de deterioro. De esta manera los sitios prioritarios para restauración son aquellos que presentan una clara disminución de la cobertura boscosa, acelerados procesos de erosión, alteración del flujo hidrológico, y escasa a nula regeneración natural. En el caso específico de los incendios, se consideran además aquellas zonas en donde existen evidencias de continuas actividades antropogénicas que van en directo peligro de la conservación del patrimonio natural. También, el concepto de degradación se relaciona con cambios graduales o sutiles que reducen la integridad y la salud ecológica (Jardel *et al.* 2003). Un ecosistema afectado permanentemente por disturbios – como es el caso de la alta recurrencia de incendios sobre un mismo paisaje – queda destruido cuando la degradación o el daño elimina toda la vida macroscópica y, por lo general, también arruina el ambiente físico, por ejemplo el suelo, las cuencas hidrográficas y la conectividad entre sistemas de paisaje (Castillo, 2006). La transformación es la conversión de un ecosistema en otro tipo de ecosistema o uso de la tierra, por ejemplo, de bosque a agrícola o simplemente a áreas erosionadas sin uso sustentable.

- *Restauración*: La restauración ecológica es el proceso de ayudar el restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (SER, 2004).

- *Paisaje*: Turner *et al.* 2003 y SER 2004, coinciden en su definición como un mosaico de dos o más ecosistemas que intercambian organismos, energía, agua y nutrientes. En vez de enfocarse en solamente un ecosistema, una buena parte de la restauración

ecológica tiene como objetivo legítimo y muy importante de la reintegración de ecosistemas y paisajes fragmentados,

- *Recuperación*: La acción de restaurar, trae implícita la definición de “recuperar” (SER, 2004). Un ecosistema se ha recuperado – y restaurado – cuando contiene suficientes recursos bióticos y abióticos como para continuar su desarrollo sin ayuda adicional. Este ecosistema se podrá mantener tanto estructural como funcionalmente. Demostrará capacidad de recuperación dentro de los límites normales de estrés y alteración ambiental. Interactuará con ecosistemas contiguos en términos de flujos bióticos y abióticos e interacciones culturales.

- *Rehabilitación*: Acción o conjunto de acciones físico-mecánicas conducentes a restablecer en zonas degradadas algunos elementos o servicios ecológicos importantes, y que fueron dañados parcial o totalmente antes o durante el proceso de disturbios (Castillo, 2006). Dependiendo de las condiciones locales, la rehabilitación puede ser parcial y no pretende forzosamente que sean homólogos a estados prístinos. Es un concepto muy amplio que involucra prácticas locales sobre el paisaje, en relación al tipo de disturbios que se presenten, la magnitud y recurrencia de ellos. En este ámbito, es pertinente incluso hablar de "mejoras" de terrenos, remedios para impedir o aminorar el avance de la erosión, mediante acciones concretas como el tratamientos de taludes en áreas contiguas a sectores quemados y arrastre de suelos, la revegetación con especies de la zona, o simplemente, la plantación con especies vegetales de rápido crecimiento, que sean acordes con la estética y armonía del paisaje que se desea recuperar.

La literatura concuerda que en cualquier propuesta de restauración y rehabilitación, es necesario, como primer paso, establecer las condiciones de referencia, en función de las cuales se definirán los objetivos y sus acciones estratégicas. En este proceso se definen las condiciones meta, basadas fuertemente en la composición original y futura de especies vegetales y la estructura de las comunidades restauradas, en función de los ecosistemas que han sido afectados (Agee y Huff, 1985; Jordan *et al.* 1987; Whisenant 1999; Wagner *et al.*, 2000). Esto hace necesario introducir un componente de investigación aplicada a la restauración, centrada en aspectos tales como la caracterización de la vegetación en áreas poco alteradas, y el entendimiento de patrones del paisaje y procesos de regeneración natural y sucesión.

La etapa de la restauración se inicia con la presencia de un ecosistema alterado, hacia un estado futuro esperado, que es la recuperación ecológica (SER, 2004). Ello implica la definición de un ecosistema de referencia que sirve de modelo para planificar un proyecto de restauración ecológica y posteriormente para la evaluación de éste. Este es un proceso que debe ser evaluado y monitoreado constantemente, de manera de verificar los procesos de adaptación y cambios, en los distintos componentes del paisaje objetivo (Turner *et al*, 2001).

Las tareas de restauración implican la adopción de una variedad de acciones físico-mecánicas, cuyos efectos en el ambiente se manifestarán dependiendo de la extensión y duración de las perturbaciones pasadas (Turner *et al*. 2003; Fernández *et al*. 2010). En muchos casos, la restauración implica eliminar por completo una alteración específica, con el fin de permitir que los procesos ecológicos se recuperen por sí solos.

Autores dedicados al estudio de comunidades vegetales alteradas por disturbios – entre ellos los incendios forestales – coinciden en que aún cuando las labores de restauración de paisajes se efectúe con extrema dedicación y rigurosidad, difícilmente se lograrán restablecer por completo los procesos naturales originales sobre un ecosistema no acostumbrado a disturbios que superen la capacidad de recuperación natural. En estos casos, se sugiere plantear intensidades o grados de logro en la cicatrización de paisajes y en el grado de recuperación de sus funciones biológicas.

1.3.7 Contexto de la restauración post-incendios

Los daños y efectos físico-mecánicos producidos por la propagación del fuego, son una respuesta al tipo de vegetación que son objeto de su destrucción, como también a las condiciones topográficas y ambientales por las cuales el fuego se propaga. En tal sentido, el grado de intensidad calórica – algunos autores lo explican como intensidad del fuego – condicionan directamente la magnitud de los daños, colocando niveles de gravedad sobre los cuales es necesario planificar y sectorizar las acciones para la restauración.

Luego de que un ecosistema es afectado por un incendio, se deben considerar dos fases para su recuperación. Una primera, a corto plazo, denominada *rehabilitación*, que debe ser ejecutada tan pronto como sea posible luego del siniestro (Vega, 2007), y una segunda a mediano y largo plazo, denominada *restauración*. En el primer caso, rehabilitar implica contrarrestar los efectos negativos inmediatos al disturbio, principalmente los derivados por la escorrentía superficial y erosión post fuego, como también en la recuperación de la productividad y servicios básicos del ecosistema (Fernández *et al.* 2010). Por otra parte, restaurar busca recuperar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, así como también su resiliencia al fuego. En ambos casos, las acciones a aplicar, son de carácter complementario, dependiendo de la magnitud de ellas, de la oportunidad de su aplicación y del contexto o tipo de paisaje que se desea rehabilitar.

1.3.8 Etapas de la restauración

Independiente al tipo de proyecto de restauración a abordar, existen tres fases o etapas ineludibles a aplicar, cada una de ellas con sus grados de énfasis en función de los objetivos a conseguir. Fernández *et al.* (2010), exponen las siguientes fases:

a) *Planificación*: la primera acción a realizar, es la neutralización paulatina o inmediata de aquellos factores que impiden la recuperación del ecosistema. Para el logro de este propósito, es necesario definir con mucha claridad las metas, sus objetivos, jerarquías y plazos factibles de cumplir, dentro de un calendario de planificación con fines de restauración. En esta actividad se hace necesario disponer de un conocimiento multidisciplinario y muy detallado del funcionamiento del ecosistema – en este caso paisajes vegetales nativos afectados por incendios – sus principales componentes y relaciones entre ellos, como asimismo la dinámica del funcionamiento individual y colectivo de cada parte del sistema a intervenir. En tal sentido, la propuesta técnica debe ir organizada de tal manera de cumplir con ciertos requisitos técnicos, que hagan factible su aplicabilidad: a) la viabilidad científica, b) viabilidad territorial, c) viabilidad técnica, d) viabilidad económica, e) viabilidad política, f) viabilidad social, y g) viabilidad política (Montes 2002, citado por Fernández *et al.*, 2010).

b) *Implementación:* La condición inicial necesaria para implementar medidas, es conocer muy bien el hábitat y condiciones del área a ser restaurada. En tal sentido, es imprescindible considerar las variables básicas ambientales como suelo, topografía, hidrología e hidrografía, la existencia de comunidades biológicas, el clima local y macro-clima, y un historial detallado de las principales perturbaciones (tipo, periodicidad e intensidad), a que ha sido objeto el área a restaurar. Luego de revisar todos estos antecedentes se estudian las especies candidato a utilizar y los métodos de preparación del sitio, como asimismo los mecanismos de auto-sustentación de las especies que quedarán en las nuevas condiciones de restauración. Otro aspecto necesario a considerar – como paso previo – es evaluar con la mayor precisión posible el grado de intensidad del daño que se hace manifiesto en el suelo, de manera de establecer el grado de sobrevivencia de las plantas a introducir, como asimismo de las técnicas de repoblación, ya sea a través de semillas (siembra directa), propágalos o transplante.

c) *Monitoreo:* Es quizás la etapa más relevante en la acción de restauración, por cuanto el monitoreo contempla el permanente cuidado de las acciones aplicadas, principalmente en la respuesta de las especies vegetales utilizadas y en el grado de recuperación que va experimentando el paisaje. El monitoreo es la herramienta que ayuda a determinar cuan bien el proyecto de restauración cumple con las metas y objetivos. Debe ser un proyecto práctico, técnicamente factible de aplicar, y con alta factibilidad de ser repetido en condiciones similares de paisaje.

1.3.9 Iniciativas de restauración post-fuego en Chile

No obstante la existencia de numerosos proyectos de restauración de paisajes, no se dispone de un consolidado de experiencias en el caso específico de aplicación de medias de restauración en condiciones de post-fuego. En general, las principales experiencias en Chile están asociadas a proyectos de rehabilitación y recuperación mediante el empleo de especies herbáceas y leñosas de rápido crecimiento, en muchos casos a base de especies exóticas. Asociado a ello, se encuentra la poca información respecto a las medidas específicas de restauración y monitoreo con especies nativas de la zona, lo que redundará finalmente a encontrar escasos antecedentes sobre proyectos de rehabilitación de paisajes quemados a base de especies nativas del ecosistema originalmente afectado.

1.3.10 Diagnóstico de la restauración en el área de estudio. Calificación y propuestas preliminares.

En este contexto, y de acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de paisaje y el estado de la vegetación – reflejado en el estudio de perfiles horizontales y verticales – es posible dilucidar las acciones a aplicar desde el punto de vista de los riesgos actuales y potenciales – condicionados por los niveles de impacto sin proyecto –, y por la escala de priorización de medidas para las áreas muestra, dentro de un esquema integrado de restauración. Se procedió a identificar las interrelaciones de impactos generados por la acción del fuego en el paisaje vegetal a nivel más detallado, considerando las acciones y factores involucrados en una matriz ambiental de doble entrada.

Salvo algunas experiencias en restauración ejecutadas en Parque Pumalín, Provincia de Palena en la Región de Los Lagos, como también en otros bosques húmedos en la Región de Aysén, en hábitats de Alerce (*Fitzroya cupressoides* (Molina) Johnst.), Ciprés de las Guaticas (*Pilgeloendron uviferum* (D.Don.) Florin), Araucaria (*Araucaria araucana* (Molina) K.Koch.), además de algunas iniciativas ejecutadas por la Universidad Católica y Universidad de Santiago, no se dispone de suficientes referencias en Chile sobre la relación entre cuantificación de impactos ocasionados por los incendios forestales y las opciones de restauración en función de sus variables de diagnóstico del paisaje.

Como primer paso, y considerando la evaluación del comportamiento del fuego en las áreas estudiadas, se detallan los componentes de paisaje involucrados en los daños y efectos ocasionados por incendios, y conforme a los antecedentes de campo explicados anteriormente. En ellos, se aplican las siguientes acciones, en forma secuencial, de acuerdo a las condiciones locales de las áreas afectadas y conforme a los antecedentes disponibles en (Fernández *et al.* 2010), para la implementación de obras en el caso específico de la Región del Matorral y Bosque Esclerófilo. No obstante, la bibliografía citada sólo entrega escasas referencias que deben ser complementadas en forma más específica, con las medidas locales que acá se proponen (cuadro 1.3.10.a).

Cuadro 1.3.10.a

Calificación del impacto provocado por incendios en vegetación nativa, para cada una de las áreas test.

| | | Región | | | | |
|---|--|-------------------------------|------------|------------|----------|----------|
| | | V | XIII | VI | VII | |
| | | Áreas test visitadas : | | | | |
| Parámetros del comportamiento del fuego | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Fecha del Incendio | | 18.12.07 | 02.03.08 | 07.02.09 | 15.01.09 | 22.09.07 |
| Superficie Afectada (ha) | | 3.000 | 3.765 | 2.832 | 3.600 | 225 |
| Intensidad Calórica (kcal m ⁻¹ s ⁻¹) (prom.) | | 712 | 734 | 5.004 | 2.172 | 103 |
| Severidad del Incendio | | Media | Media | Extrema | Alta | Baja |
| Regeneración Post-Incendio | | Muy Alta | Muy Alta | Baja | Media | Baja |
| Efecto en el Suelo (visual) | | Bajo | Bajo/Medio | Medio/Alto | Medio | Medio |

| Factores ambientales ↓ | Sub-componentes ↓ | Nivel de impacto (Bajo, Medio, Alto) ↓ | | | | |
|-------------------------------|--------------------------|---|-------------------------|-------------|-------|-------|
| | | Acción prioritaria* (1a, 1b, 1c, 2, 3) ↓ | | | | |
| | | 1a – 1b – 1c – 2 | 1a – 1b – 1c – 2 – 3 | 1b – 1c – 2 | 3 | 2 – 3 |
| Paisaje | Belleza escénica | Medio | Medio | Medio | Alto | Alto |
| | Singularidad | Bajo | Medio | Alto | Bajo | Alto |
| Tierra | Suelo | Alto | Alto | Alto | Medio | Alto |
| Agua | Superficial | Alto | Alto | Alto | Medio | Alto |
| | Subterránea | Bajo | Medio | Alto | Medio | Medio |
| | Calidad | Bajo | Medio | Alto | Bajo | Medio |
| | Cantidad | Medio | Medio | Medio | Medio | Bajo |
| Atmósfera | Emisión de partículas | Alto | Alto | Alto | Alto | Medio |
| Procesos | Erosión | Alto | Medio | Alto | Medio | Alto |
| | Inundación | Medio | Medio | Medio | Medio | Medio |
| | Sedimentación | Alto | Medio | Medio | Medio | Medio |
| | Captación | Medio | Medio | Medio | Bajo | Medio |
| | Remoción en masa | Alto | Bajo | Alto | Bajo | Alto |
| Flora | Bosque nativo | Alto | Alto | Alto | Medio | Medio |
| | Matorral nativo | Alto | Alto | Alto | Medio | Medio |
| | Riqueza florística | Medio | Medio | Medio | Bajo | Medio |
| Fauna | Aves | s/i | s/i | Alto | Medio | Alto |
| | Animales terrestres | Medio | Alto | Alto | Alto | Alto |
| | Microfauna | Alto | Alto | Medio | Medio | Alto |
| Impactos socioeconómicos | Fuentes de trabajo | Bajo | Medio | Medio | Medio | Medio |
| | Calidad de vida | Medio | Medio | Alto | Medio | Medio |
| | Infraestructura | Bajo | Bajo | Medio | Medio | Medio |
| | Turismo y recreación | Medio | Bajo | Alto | Alto | Medio |

Las medidas señaladas con asterisco en el cuadro 8, se exponen a continuación:

1: Rehabilitación. Acción prioritaria, mediante la revegetación con especies nativas propias de la sucesión ecológica. En casos especiales se sugiere repoblar con especies exóticas con éxito comprobado de establecimiento.

1a) Intervención mediante siembra directa. Extracción – previo estudio de factibilidad – de especies retoñadoras exóticas con comportamiento agresivo de crecimiento.

Mantener tocones y raíces de rebrotes para especies de la sucesión natural. Obras mecánicas de contención de laderas (empalizadas, diques de erosión), surcos en contorno. Monitoreo, de acuerdo a lo expuesto en la fase 3 de restauración. Cercado. Control de lagomorfos.

1b) Preparación del suelo. Plantación con especies exóticas y/o siembra con leguminosas y gramíneas de rápido crecimiento. Obras de contención de laderas y surcos de erosión. Monitoreo. Cercado. Control de lagomorfos.

1c) Intervención mediante plantación asistida. Especies nativas propias de la sucesión ecológica. Extracción de plantas y brotes no deseados. Eventualmente preparar sitio mediante obras mecánicas al suelo. Obras de contención en laderas. Establecimiento de empalizadas en sectores con mayor erosión. Monitoreo. Cercado. Control de lagomorfos.

2: **Restauración:** Una vez que se ha rehabilitado parcial o totalmente el ecosistema a intervenir. Revegetación con especies iniciales aplicadas en la fase de rehabilitación – nativas o exóticas – mediante el reemplazo de árboles/arbustos/hierbas que no hayan sobrevivido a la etapa inicial de repoblamiento. Repaso de las obras mecánicas aplicadas. Monitoreo. Fortalecimiento de estructuras de aislamiento contra el ganado. Control de lagomorfos.

3: **Recuperación:** Monitoreo. Prioridad de no cambio de uso de la tierra ni inclusión de ganado o especies agresivas. Fase 2 de repoblamiento en aquellas áreas donde el proceso de recuperación del suelo ha sido lento.

1.4 Conclusiones del capítulo

a) El análisis estadístico de los incendios forestales en la zona central Chile muestra que existen claras diferencias entre sus regiones, marcadas por un clima mediterráneo con influencia oceánica y altas oscilaciones térmicas que ocasionan elevados niveles de riesgo en la ocurrencia de incendios forestales. Estas diferencias se manifiestan principalmente en el promedio anual de incendios forestales, y en la densidad de los mismos respecto a la superficie afectada, analizando un período total de 48 años.

- b) Conforme se ha efectuado una revisión histórica en la evolución de la protección contra incendios forestales en Chile, especialmente en los últimos 30 años, se ha visto que un aumento en los niveles de inversión basado en una mayor dotación de recursos para el combate y extinción, no es una garantía segura respecto a esperar una disminución en la ocurrencia y daños. El problema de los incendios forestales, lejos de disminuir, se ha mantenido en una situación al alza, obligando a las instituciones estatales encargadas de la protección y a las empresas forestales, a efectuar una revisión permanente de sus mecanismos de prevención, alerta y control. En tal sentido, se manifiesta un déficit en la investigación pura, aplicada y en la innovación tecnológica, siendo un aspecto débil que sólo ha sido parcialmente cubierto con una inversión sostenida en recursos financieros y medios físicos para la extinción.
- c) Respecto a lo anterior, resulta necesario invertir e innovar en conocimientos nuevos, como también en perfeccionar aquellas líneas de investigación que fueron propuestas en 1985 en el Programa de Investigaciones en Manejo del Fuego. Entre los tópicos más importantes en donde se hace necesario enfocar esfuerzos se encuentran: *comportamiento del fuego, prevención, estándares de productividad en operaciones terrestres y aéreas, gestión en manejo del fuego, efectos del fuego y mitigación de impactos adversos*, y por último, *seguridad en manejo del fuego*. En total, seis líneas de trabajo en las cuales se han efectuado avances sustantivos, pero con la creciente demanda de capital I+D para potenciar el actual sistema integrado de protección existente en Chile.
- d) Un análisis territorial de la distribución espacial de los incendios forestales y sus efectos en la vegetación nativa, muestra que en general, los paisajes vegetales de Chile central se encuentran adaptados a la presencia frecuente del fuego, lo cual se traduce en la existencia de formaciones degradadas que coexisten con espacios naturales conformados por especies que conformaban el antiguo bosque esclerófilo mediterráneo.
- e) El aumento en los niveles de severidad, el efecto borde y una menor resiliencia en áreas permanentemente afectadas por el impacto sostenido del fuego, son características comunes posibles de encontrar en aquellas áreas en donde la alta

densidad de incendios se encuentra asociada a sectores de interfaz y alta conectividad. Por otra parte, se verifica que los registros históricos de grandes incendios forestales en vegetación nativa se localizan preferentemente en áreas alejadas de los grandes centros urbanos y con escasa a nula accesibilidad por medios terrestres para el combate.

- f) Como se desarrolla más adelante en esta investigación, los aspectos aquí presentados constituyen parte de las referencias necesarias que justifican la necesidad de diseñar un esquema, a modo de modelo, encargado de facilitar la integración y evaluación de la mayor cantidad posible de variables y factores que inciden en la ocurrencia y propagación de incendios forestales, y que normalmente han sido abordados en forma separada. Como se señalaba anteriormente, una de los tópicos primordiales a desarrollar, corresponde a la gestión en manejo del fuego. Dentro de este gran tema, se encuentra la valoración económica, aspecto que se aborda en el capítulo 5 de esta tesis doctoral.

1.5 Referencias

- Agee J.K. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest Forests. Island Press. Washington D.C., EUA.
- Agee J.K. y M.H. Huff. 1985. Structure and process goals for vegetation in wilderness areas. Pp. 17-25 en: National Wilderness Research Conference. USDA Forest Service. Fort Collins, Colorado, EUA.
- Altieri M, Rodríguez J. 1974. Acción Ecológica del fuego en el Matorral Natural Mediterráneo de Chile, en Rinconada de Maipú. Tesis Licenciado en Agronomía. Santiago, Chile. Facultad de Agronomía, Universidad de Chile. 144p.
- Alvarez G. 2008. Diseño de un sistema de patrullaje terrestre para el control de incendios forestales en un sector de la precordillera de la Región Metropolitana. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 83p.
- Avila G, Araya S, Cisterna R, Haltenhoff H. 1983. Efectos del Fuego sobre la Vegetación Herbácea y Arbustiva de Chile Central. Actas III Seminario sobre Manejo del Fuego. Universidad Austral/CONAF, Arauco. 25p.
- Braun-Blanquet J. 1948. Übersicht der Pflanzengesellschaften Ratiens. *Plant Ecology* 1(1):29-41.
- Braun-Blanquet, Bolós J. 1958. Les groupements vegetaux du bassin moyen de l'Ebre et leur dynamisme. Zaragoza, España. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei* (5):1-4.
- Cardille J, Ventura S, Turner M. 2001. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, USA. *Ecological Applications* 11(1): 111-127.

- Castillo M. 1998. Método de Validación para el Simulador de Expansión de Incendios Forestales del Sistema KITRAL. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 123p.
- Castillo M, Pedernera P, Peña E. 2003. Incendios Forestales y Medio Ambiente. Una síntesis global. *Ambiente y Desarrollo* 19 (3-4): 88-99.
- Castillo M. 2006. El cambio del paisaje vegetal afectado por incendios en la Zona Mediterránea Costera de la Quinta Región de Chile. Tesis Magíster en Geografía. Santiago, Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 143p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2011. Sistema Estadístico Nacional de Manejo del Fuego. Fichas de Incendios Forestales de las Regiones V, VI, VII y Metropolitana. Santiago de Chile.
- Daigle P. 1996. Fire in the Dry Interior Forests of British Columbia. Ministry of Forests Research Program. *Extension Notes*. (8): 5p.
- Fernández I, Morales N, Olivares L, Salvatierra J, Gómez M, Montenegro G. 2010. Restauración Ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Pontificia Universidad Católica de Chile y Corporación Nacional Forestal. 162p.
- Forcada E. 2000. El Impacto Ambiental en la Agricultura: Metodologías y Procedimientos. Imagraf Impresores. S.A. 323p.
- Fulé P, Crouse J, Heinlein T, Moore M, Covington W, Verkamp G. 2003. Mixed-severity fire regime in a high-elevation forest of Grand Canyon, Arizona, USA. *Landscape Ecology* (18):465-486.
- Gergel S, Turner M. 2002. Learning Landscape Ecology: A practical Guide to Concepts and Techniques. Book Reviews. *Landscape Ecology* (17) 91-93.
- Jardel P., E.J., R. Ramírez V., A. Saldaña A., F. Castillo N., J.C. Chacón M., S. Zuloaga A., O.E. Balcázar M., H. Quiñones y A. Aragón C. 2003. "Restauración de áreas afectadas por incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán". Informe final del Proyecto F6-00-14. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C. y Universidad de Guadalajara. Autlán, Jalisco, México. 35p.
- Jordan W.R. III, M.E. Gillpin y J.D. Aber (Eds.) 1987. Restoration ecology: A synthetic approach to ecological research. Cambridge University Press. Cambridge, Gran Bretaña.
- Julio G, Castillo E, Pedernera P. 1995. Modelación de Combustible. *Actas de Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales* :111-127.
- Julio G. 1990. Diseño de Índices de Riesgo de Incendios Forestales para Chile. *Bosque* 11(2):59-72.
- Julio G. 2007. Formulación de Lineamientos Políticos y Estratégicos para la Protección contra Incendios Forestales en Chile. Tesis Doctor Ingeniero de Montes. Córdoba, España. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, España. 341 p.
- Julio G. 2009. Fundamentos del Manejo del Fuego. VI Edición. Publicación del Depto. Gestión Forestal y Medio Ambiente. Santiago, Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. 326p.
- Julio G.; Castillo M.; Fuentes J.P.; Garfias R. 2011. Estudio de impactos de incendios forestales en la Zona Central de Chile – Propuestas de acciones de restauración y mitigación. Informe Final del Grupo de Trabajo del Laboratorio de Incendios

- Forestales de la Universidad de Chile en el Proyecto FONDECYT N° 1095048. Santiago, 177 pág.
- Machado A. 2001. Restauración Ecológica. Una introducción al concepto. Gobierno de Canarias. Revista de Medio Ambiente (21). 7p.
- Mouillot F, Ratte JP, Joffre R, Moreno J, Rambla S. 2003. Some determinants of the spatio-temporal fire cycle in a mediterranean landscape (Corsica, France). *Landscape Ecology* 18(7): 665-674.
- Parminter J, Daigle P. 1997. Landscape Ecology and Natural Disturbances: Relationships to Biodiversity. Ministry of Forests Research Program. *Extension Notes* (10): 5p.
- Quintanilla V. 2000. Influencia del fuego en el desequilibrio ecológico de la vegetación en la zona mediterránea de Chile: casos de estudio. *Investigaciones Geográficas*. (34): 3-14.
- Rodríguez y Silva F, Julio G, Castillo M, Molina JR, Herrera MA, Toral M, Cerda C, González L. 2010. Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Córdoba, España. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p.
- Rollins M, Morgan P, Swetnam T. 2002. Landscape-scale controls over 20th century fire occurrence in two large Rocky Mountain (USA) wilderness areas. *Landscape Ecology* 17(6): 539-557.
- Rundell P. 1977. The matorral zone of Central-Chile. Unpublished draft.
- SER. 2004. Society for Ecological Restoration. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. Principios de restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: *Society for Ecological Restoration International*. 15p.
- Tapia G. 2008. Diseño de un sistema de torres de detección de incendios forestales para la Región Metropolitana. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 38p.
- Turner M, Gardner R, O'Neill R. 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. Springer-Verlag New York, Inc. 402p.
- Turner M, Romme W, Reed R, Tuskan G. 2003. Post-fire aspen seedling recruitment across the Yellowstone (USA) Landscape. *Landscape Ecology* 18(2):127-140.
- Vega J. 2007. Bases ecológicas para la restauración preventiva de zonas quemadas. Thematic-Session 8 – Restauración de zonas quemadas-Vega, J.A.
- Villaseñor R. 1977. Unidades de vegetación de los cerros de la provincia de Valparaíso, Chile. 6p. Inédito.
- Wagner M.R., W.M. Block, B.W. Geils y K.F. Wenger. 2000. Restoration Ecology: A new forest management paradigm, or another merit badge for foresters? *Journal of Forestry* 98 (10):22-27
- Westhoff V, Van der Maarel E. 1978. The Braun-Blanquet approach. In Whittaker, RH (ed) 399p.
- Whisenant S.G. 1999. Repairing damaged wildlands. A process-oriented landscape-scale approach. Cambridge University Press. Cambridge, Gran Bretaña.

CAPÍTULO 2

LOS INCENDIOS FORESTALES EN ÁREAS DE INTERFAZ URBANO FORESTAL. EL CASO DE CHILE.

CAPÍTULO 2: LOS INCENDIOS FORESTALES EN ÁREAS DE INTERFAZ URBANO FORESTAL. EL CASO DE CHILE.

2.1 Ocupación Urbana: Interfaz Urbano-Forestal. Referencias generales.

La urbanización y el incremento de la densidad de población traen como consecuencia la fragmentación de áreas aledañas, con el consiguiente riesgo de degradación de espacios naturales (Zhai *et al*, 2003). Producto de ello la población crece y se desarrolla. Comienza la presión por la utilización del espacio y sus recursos asociados. Generalmente esto se expresa en la reconversión de terrenos agrestes por tierras productivas o simplemente para construcción de nuevos espacios urbanos.

El concepto de Interfaz Urbano Forestal – conocido también como Wildland Urban Interface (WUI) – nace de la necesidad de diferenciar geográficamente el límite que se produce entre la ocupación humana y aquellas áreas cuyo uso del suelo está destinado a agrícola, protección o forestal, entre otros.

Es una franja o zona en donde el componente humano coexiste en un gradiente espacial, con las tierras ocupadas por actividades agrícolas, forestales, u otro tipo de uso de suelo distinto a la ocupación en infraestructura. Cada frente o faceta, presenta indicadores de presencia y cobertura, como asimismo un grado de pertenencia a la categoría en que se califica este uso (Davis, 1990). Comúnmente en esta interfaz se genera una variedad de situaciones intermedias que permiten la conexión entre paisajes.

Lo anterior también se conoce como área de amortiguamiento, para expresar procesos que experimentan modificaciones espaciales a medida que aumenta o disminuye la distancia desde o hacia la variable de medición. En el caso de la interfaz urbano-forestal (o interfaz urbano-rural), usualmente se definen distancias en función de la densidad habitacional, aspectos topográficos y otros derivados del efecto borde del paisaje en el límite del área consolidada.

Por ejemplo, es posible distinguir mezclas en esta zona de interfaz. Davis (1990), y Radeloff *et al*, (2001), distinguen por ejemplo, cinco categorías o mezclas de situaciones en esta zona WUI o interfaz: El anillo o área WUI propiamente tal,

conformada por segmentos claramente demarcados que separan estructuras estrechamente unidas y consolidadas de otras provisorias o de menor elaboración, un área siguiente (denominada *intermix*), compuesta por estructuras dispersas, pero siempre manteniendo continuidad de combustible; se distingue además un área de oclusión, compuesta por islas o fragmentos cohesionados de combustibles, frecuentemente pequeñas construcciones aisladas de material ligero; posteriormente aparece un área de borde en donde coexisten asentamientos poblados y enclaves de vegetación combustible en sectores con topografía variable; finalmente se encuentra la vegetación propiamente tal, rodeando en muchos casos, las áreas anteriormente descritas. Esta clasificación evidentemente experimenta variaciones dependiendo de las características de densidad, topografía y accesibilidad a este tipo de áreas.

Diversas metodologías aplicadas al efecto de la interfaz (WUI) al entorno geográfico coinciden en que las líneas de contacto – denominadas también por Collins (2005), como *líneas de evidencia* –, guardan atributos biofísicos de las estructuras o construcciones hasta una distancia media de 30 metros internándose hacia el entorno, mezclándose paulatinamente con los atributos de paisaje, y disminuyendo el grado o atributo de pertenencia urbano, a uno rural.

En estas áreas, normalmente existen muchas actividades que dan lugar a ejes de expansión y ocupación de nuevas tierras, lo que en muchos análisis geográficos se conoce como cambio en el uso del suelo. Los asentamientos no programados adecuadamente en terrenos que antes pertenecían a zonas boscosas, usualmente son asociados a sectores de marginalidad, en donde el confinamiento de familias de escasos recursos se hace evidente en aquellas zonas de exclusión, pero que por causas de la alta demanda por vivienda y la imposibilidad de otorgar adecuadas soluciones habitacionales, pasan a conformar un área semiconsolidada, caracterizada por la presencia incompleta de servicios de calidad, y con evidentes signos de desorganización estructural, especialmente en relación a vías de acceso e infraestructura para la atención de emergencias. En una menor proporción, estos asentamientos se producen por motivos de búsqueda de una mejor calidad de vida asociada a áreas con mayor contacto con la naturaleza, no necesariamente vinculados a carencias de tipo económicas o de falta de opciones para la construcción o adquisición de una vivienda.

En el fenómeno de expansión, comúnmente se definen áreas potenciales para su ocupación, como aquellas que ofrecen menos dificultades para el asentamiento, y resultan más atractivas desde el punto de vista de organización territorial, asumiendo que existe una estructura orgánica y ordenada de crecimiento hacia la periferia (Theobald, 2007). Mediante técnicas de análisis multitemporal de espacios urbanos utilizando celdillas de avance, se ha visto que el crecimiento tiende a concentrarse en áreas que favorecen la conectividad, especialmente en relación a la preexistencia de caminos interiores, y que posteriormente pasan a constituir vías principales de comunicación entre áreas pobladas. Este mismo fenómeno ha sido estudiado midiendo la evolución espacio temporal de la densidad de habitantes utilizando series de datos derivados de censos y agrupados en áreas de crecimiento predefinidas (Radeloff *et al*, 2001; Theobald, 2001).

Existen métodos para precisar la magnitud y patrones de expansión urbana hacia el entorno del paisaje. En estados como Nevada, Montana y Utah, los ejes de expansión hacia zonas boscosas han experimentado un avance promedio del 52% respecto al año 70, estimándose un crecimiento de tan sólo 5% al año 2030, principalmente por la creciente dificultad de encontrar tierras aptas para el establecimiento de suelo urbano. Esta situación se repite con mucha frecuencia y tiende a guardar cierta lógica por cuanto el crecimiento urbano hacia zonas confinadas y de difícil acceso, experimenta inicialmente rápidos procesos de ocupación, disminuyendo gradualmente conforme ya los espacios factibles de ser ocupados ofrecen mayor cantidad de limitantes, tales como la escasa accesibilidad y altas pendientes, entre otros factores.

2.2 La interfaz y su relación con los incendios

Una de estas actividades, que caracteriza a muchas áreas de interfaz especialmente en áreas mediterráneas con altas densidades de población en sus bordes, son los incendios forestales. En ellos, las causas que los provocan van muy relacionadas a aspectos de intencionalidad o descuido en la ejecución de labores que implican el uso del fuego.

Es por ello que la acción humana – negligente o premeditada – en la ocurrencia de incendios forestales es un aspecto muy común en este tipo de interfaz, y conforma una

de las principales causas en el sistema global de estadísticas de incendios, tanto en Chile como en países con similares características climáticas tales como España, Portugal, Italia y Grecia (Castillo *et al*, 2010). De hecho, mucho de los eventos de fuego que se producen en estas áreas de contacto se derivan de distintas actividades que se practican, tales como extracción de material vegetal, depósito de desperdicios, o recreación, entre otros factores.

La expresión territorial de esta interfaz se incrementa además, cuando el paisaje afectado comienza a manifestar signos de adaptación al fuego (Castillo, 2006). Es el caso de muchos paisajes mediterráneos en donde coexisten formaciones naturales con las provenientes de disturbios post fuego, muchas veces ocasionado por acciones antrópicas.

Por lo anterior, se advierte la importancia de estudiar este tipo de áreas, básicamente por tres razones: el primer lugar, la ocurrencia de incendios forestales se ha incrementado fuertemente en los últimos 25 años, especialmente en áreas mediterráneas de América del Sur; segundo, la población crece sostenidamente, aumentando la probabilidad de ocupación en áreas antes calificadas como naturales o agrestes; y tercero, los esfuerzos de los gobiernos locales y particulares han sido ampliamente cuestionados y puestos a revisión de expertos dado que ha sido evidente la falta de enfoque a los reales problemas coyunturales, particularmente en los protocolos aplicados para la atención de grandes emergencias (Collins, 2005).

En Estados Unidos por ejemplo, entre 1980 y 1990 se ha demostrado que la presencia de grandes incendios (sobre mil hectáreas), ha incrementado en forma sustantiva la fragmentación de paisajes silvestres y en la susceptibilidad a ser ocupados por asentamientos humanos o actividades vinculadas a la producción de bienes y servicios (Cohen, 2000). Frecuentemente, pequeños episodios de fuego que ocurren en esta zona de interfaz, pueden convertirse en verdaderos eventos catastróficos, afectando a extensas superficies que comprometen a espacios habitados, lo que hace aún más dificultoso el combate del fuego (Cohen, 2000). Por ejemplo, en Estados Unidos, más de 900 viviendas son destruidas anualmente en promedio, producto de incendios generados en áreas de interfaz, de acuerdo a estadísticas reportadas a partir de 1990. (Institute of Business and Home Safety, 2004).

Para las instituciones encargadas del combate y control de incendios forestales en los Estados Unidos, el daño ocasionado por grandes eventos en zonas pobladas ha sido un aspecto preocupante desde la década de los 80, quedando en el recuerdo los desastres acaecidos en los años 2000, 2002, y últimamente los sucedidos en 2011 y 2012. La gravedad de los daños puso en el debate la importancia de replantear las políticas de protección que usualmente se instauraba para proteger el patrimonio forestal y la vida de las personas, especialmente en áreas de la interfaz urbano-rural en donde justamente se reportaban los problemas más serios (Collins, 2005).

Por tal razón en este país existen estándares nacionales aplicados para disminuir las condiciones de riesgo en la WUI, regulados por la NFPA (Nacional FIRE Protection Association), y programas de colaboración asociados. Estos estándares tocan aspectos tales como organización de cuerpo de voluntarios, acciones programadas de la comunidad en zonas de riesgo de incendios, ordenanzas municipales de emergencia en situaciones coyunturales y apoyo estatal mediante activación de mecanismos de ayuda directa. (Kundell, *et al*, 2002).

Ante la gravedad que reviste el problema de los incendios forestales en la interfaz, en Estados Unidos se han ejecutado diversos proyectos de educación coordinados por la NWCG (Nacional Wildfire Coordinating Comité), entidad administrada por la NFPA, mediante la ejecución de talleres participativos con comunidades locales respecto al manejo de vegetación combustible, estrategias de reacción frente a emergencias y comportamiento colectivo, todos estos aspectos, como medidas prácticas para lograr disminuir el peligro de incendios en la interfaz. (Kundell, *et al*, 2002).

En estos casos y en muchos otros reportados en áreas de interfaz, el comportamiento del fuego en estructuras y construcciones difiere ostensiblemente del que se presenta en espacios abiertos afectando a vegetación combustible. Estudios post incendios han logrado revelar que aproximadamente el 90% de las casas que han resistido a los embates del fuego, ha sido porque las estructuras se componen mayoritariamente de materiales no inflamables, o porque la vegetación circundante se encontraba a distancias promedio mayores a 10 metros de las construcciones amenazadas.

En estas áreas de contacto, la velocidad de propagación del fuego y los montos calóricos generados en la combustión de materiales ligeros estructurales ha sido estudiada mediante modelos matemáticos (Porterie *et al*, 2007) que demuestran que la expansión puede llegar a generar torbellinos de fuego favorecidos por la formación de ciclones de aire caliente que interactúan con los gases incandescentes al interior de estructuras aireadas (Brink *et al*, 2000).

Pyne *et al*, (1996) han reportado tiempos de residencia de las llamas muy superiores a los que se presentan habitualmente en la combustión de vegetación arbórea o arbustiva en espacios abiertos. Esto hace que las posibilidades de rápida propagación del fuego en construcciones habitacionales sean aún mayores si la densidad de edificaciones combustibles es también alta. (Cohen, 2000). En variados casos, residentes que habitan en zonas de alto riesgo de incendios forestales, prefieren aceptar la presencia del fuego y organizarse en el combate del mismo, más que tomar las precauciones necesarias para minimizar el riesgo en la ignición y propagación (Jackson, 1991).

Bajo el concepto de protección a la comunidad frente a los eventuales daños ocasionados por incendios, se aplican terminologías para definir a la comunidad de riesgo. En Canadá y Estados Unidos se acostumbra a calificar como *comunidad de protección* a este tipo de situaciones, expresándola espacialmente mediante la definición de distancias uniformes o búferes de protección (Nowicki, 2002; Hann y Strohm, 2003). En tal sentido los valores más utilizados para la definición de áreas de protección, oscilan entre 800 a 3.200 metros a partir de los últimos indicios de construcciones habitadas (Theobald, 2007). Autores como Adriansen *et al*, (2003), reportan distancias de amortiguamiento del orden de 800 metros como mínimo, recomendando ampliar a 1.600 metros para asegurar una minimización de eventuales efectos ocasionados por la propagación del fuego. La definición local de este valor de distancia dependerá de la densidad de poblados hacia la periferia, la cantidad, tipo y distribución espacial de combustible vegetal disponible en el anillo o sector circundante, la pendiente y los regímenes de vientos imperantes especialmente en condiciones de quebradas y vertientes.

En estudios de paisaje en donde la vegetación cumple un importante rol en el estudio del efecto borde, el ancho de esta área de amortiguamiento podrá tener ponderaciones

variables, mediante la definición de funciones de costo de acceso, tal como se aplica en el efecto de caminos o redes hidrográficas (Flamm *et al*, 2001; Theobald, 2007). Esto debido a que la vegetación, al igual que otro tipo de formaciones presentes en el terreno, opone resistencia frente a la expansión urbana, y en consecuencia, es posible discriminar tipos y magnitudes que reflejan el grado de cohesión de unidades frente a la intervención o avance de un proceso expansivo, tal como ocurre con la ocupación del suelo para fines habitacionales.

Sin embargo en muchas ocasiones esta definición de distancias sólo se establece en función de la ocupación del suelo, sin considerar variables operativas de emergencia frente a incendios. De allí nace la necesidad de adoptar criterios técnicos para la efectiva protección a la población amenazada, los cuales deben considerar como mínimo, la caracterización del acceso a sectores amagados por el fuego, como asimismo las condiciones de visibilidad para el empleo de elementos aéreos en el combate de incendios (Theobald, 2007).

Agencias del gobierno de Canadá han desarrollado programas y técnicas para reducir el riesgo contra incendios en la interfaz urbano-rural mediante trabajos directos con la comunidad en el ámbito de la educación y difusión, complementado por intervenciones sistemáticas a la vegetación combustible presente en estas áreas. Este último aspecto contempla además la ejecución de quemas prescritas en áreas colindantes a casas y centros de recreación. Incluso se ha llegado a aplicar técnicas de reducción de combustibles al interior de parque y reservas, de modo de disminuir el peligro contra incendios (McGee, 2007).

En este país los municipios son los principales responsables de atender eventuales emergencias que se puedan producir en estas áreas, por lo cual, desde el año 2003 se ha perfeccionado fuertemente la implementación de técnicas para bajar el monto de material combustible, como asimismo en estudiar permanentemente la conducta de la población y sus actividades cotidianas especialmente ligadas al uso del fuego. Por ejemplo, en Toronto y Windsor, el uso de las quemas prescritas representa una práctica habitual que posibilita la disminución del peligro en áreas especialmente confinadas por condiciones topográficas y conectividad (McGee, 2007).

Otro caso respecto a implementación de estrategias para la reducción del peligro en la propagación del fuego es Portugal. Una sucesión inusual de situaciones ocasionadas por incendios forestales en áreas de interfaz se produjo en ese país el año 2005, causando severos daños a la población incluida la pérdida de vidas humanas. Estos desastres han llevado a la necesidad de reformular los mecanismos de atención frente a emergencias, y la prevención de posibles focos de conflictividad. Es el caso del plan desarrollado por la Escola Superior Agraria de Coimbra (ESAC), el cual contempla la definición de cuadrantes de protección en áreas semi-urbanas. Estas localizaciones se encuentran claramente definidas en una cartografía digital de riesgo, que permite, entre otros beneficios, apoyar el plan de emergencia para el combate y evacuación de la población.

2.3 Situación de incendios en interfaz. Zona Centro-Sur de Chile.

Las referencias acerca de incendios forestales en áreas de interfaz son escasas, y las que existen son poco precisas en sus contenidos. Una excepción a esta situación lo constituye Chile, aún cuando su sistema de recopilación y análisis de información respecto a desastres es incompleta, se dispone de valiosos antecedentes que permiten evaluar y estudiar los mecanismos necesarios para mejorar el sistema de protección civil para la población en áreas de riesgo de incendios.

En Chile, la vulnerabilidad de la población frente al efecto potencial de la propagación del fuego ha sido estudiada mediante análisis de casos en distintas regiones del país. En particular se exponen las experiencias adquiridas en incendios ocurridos en los últimos 5 años en áreas de interfaz, particularmente en la Octava Región del Bío Bío (Comunas de Chiguayante y Dichato), y en la Quinta Región de Valparaíso (Comunas de Valparaíso y Viña del Mar).

En este capítulo se exponen tres casos representativos que afectan con frecuencia a la región mediterránea de Chile Central y Sur, caracterizada por la alta cantidad de incendios, la mayoría ubicados en áreas donde se combina la existencia de poblados junto con las condiciones topográficas y climáticas que favorecen la rápida propagación del fuego.

En prácticamente todos los incendios ocurridos en el país, la causa principal es la actividad humana. En los casos de daños a las poblaciones humanas, estas cifras varían significativamente en su monto y consecuencias entre una temporada y otra. En los análisis sobre el tema, se ha comprobado que los efectos de mayor gravedad no observan una relación clara con el tamaño de los incendios, sino que más bien con la oportunidad en que se presentan, la intensidad que desarrollan y la velocidad de propagación que alcanzan. La situación es más difícil es la de incendios localizados en la interfaz urbano-rural, por el inminente riesgo a viviendas e instalaciones, con los consecuentes impactos en la vida humana. En estos últimos valores, las pérdidas pueden ser irrecuperables y de montos incalculables.

Aún cuando en los últimos 20 años se han mejorado las campañas de prevención contra incendios, ha ocurrido al mismo tiempo una creciente expansión urbana hacia áreas no habitadas, junto con un aumento en la cantidad de incendios generados intencionadamente por el hombre. Lo anterior ha ocasionado un importante incremento en los niveles de gravedad y daños ocasionados a la población, junto a elevados gastos en el combate, y la extrema complejidad en labores de coordinación y protección de áreas urbanas amenazadas por el fuego.

En cuanto al tamaño medio de los incendios, se destaca una pronunciada disminución, especialmente en los últimos 15 años, lo que se interpreta como una consecuencia de la consolidación de los programas de protección civil, con la implementación de organizaciones mejor preparadas, junto a un constante aumento en la asignación de recursos en los últimos cuatro gobiernos del país. La proporción de extensión de la superficie quemada en relación al total del territorio nacional a proteger se considera como muy bajo (0,1% anual), al compararse con el promedio de Latinoamérica que es del orden de 1,14 % por año (Julio, 2007). No se disponen de estadísticas muy completas para los últimos años en incendios de interfaz, pero a nivel general, en los últimos 15 años el 93,7% de los incendios afectaron superficies iguales o menores a 10 ha. Por el contrario, los incendios de 100 o más hectáreas representan el 1,2 % de la ocurrencia. Estos valores revelan que las operaciones de presupresión y combate se realizan en forma rápida, efectiva y oportuna.

En relación a la distribución cronológica de la ocurrencia, las condiciones climáticas que imperan en Chile en el transcurso del año (verano caluroso y seco, e invierno frío y con precipitaciones), lleva a una alta concentración de los incendios de interfaz en la temporada estival (diciembre a marzo), con alrededor del 90 % del total concentrado en áreas críticas de ocurrencia, estudiadas y validadas por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile. Este hecho, si bien exige un trabajo de elevada intensidad durante el verano, permite un receso de varios meses sin operaciones, que favorece a la preparación de las actividades para la siguiente temporada.

Estudios realizados por Jiménez (2006), López (2009), y el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile, han intentado valorizar los daños y efectos ocasionados a las viviendas en estas áreas, a base de los materiales de construcción, de la localización de ellas en el área de interfaz, y de las condiciones de propagación e intensidad del fuego. Producto de estas referencias, ha sido posible construir el primer modelo geográfico de vulnerabilidad (Rodríguez y Silva *et al*, 2010), basado en la integración de tres grandes componentes geográficos: el riesgo humano, el peligro de la propagación y el daño potencial ocasionado por el avance del fuego.

En la zona Sur (Regiones Octava y Novena), se producen frecuentemente incendios de interfaz asociados a la presencia de plantaciones forestales de pino y eucalipto, y en donde las condiciones de propagación se ven favorecidas por la alta carga de combustible, y por el tipo de material de las viviendas (generalmente a base de madera, exclusivamente). En este escenario, la ponderación de variables en un modelo debe colocar especial énfasis en las condiciones de peligro, es decir, en el comportamiento potencial del fuego, y en el seguimiento de las condiciones topográficas y meteorológicas que favorecen su propagación.

Más al Norte de Chile, se ubica la Región del Valparaíso, caracterizada por poseer las áreas más severamente dañadas por incendios de interfaz. En esta región, se diseñó un modelo de vulnerabilidad basado en un análisis territorial con múltiples factores geográficos, todos ellos calificados mediante la asignación de puntajes, previo análisis de los distintos tipos de viviendas localizadas en áreas de interfaz urbano forestal, considerando además las características generales de cada familia mediante visitas a terreno. En tal sentido, las vivienda en cada uno de los estratos fueron evaluadas

contemplando aspectos tales como: densidad (número de casas por hectárea), superficie construida y total disponible por vivienda, número de personas que habitan en cada hogar, materiales de construcción, valor de bienes susceptibles de ser afectados, nivel de riesgo a la salud de las personas, por mencionar los más relevantes.

2.3.1 Estudio de caso 1: Comuna de Chiguayante. Octava Región de Chile.

La zona costera de Chile posee áreas claramente identificadas en cuanto a ocurrencia, densidad y gravedad de incendios forestales. En el caso específico del área sur, es posible encontrar testimonios de graves incendios en interfaz, producto de la actividad humana en áreas donde las condiciones de peligro para la propagación del fuego, son extremas. En la figura 2.3.1.a se ilustran dos áreas de estudio, que corresponden a los poblados de *Dichato* y *Chiguayante*. En ambos casos, se exponen brevemente algunos antecedentes que ilustran el problema de los incendios en interfaz.

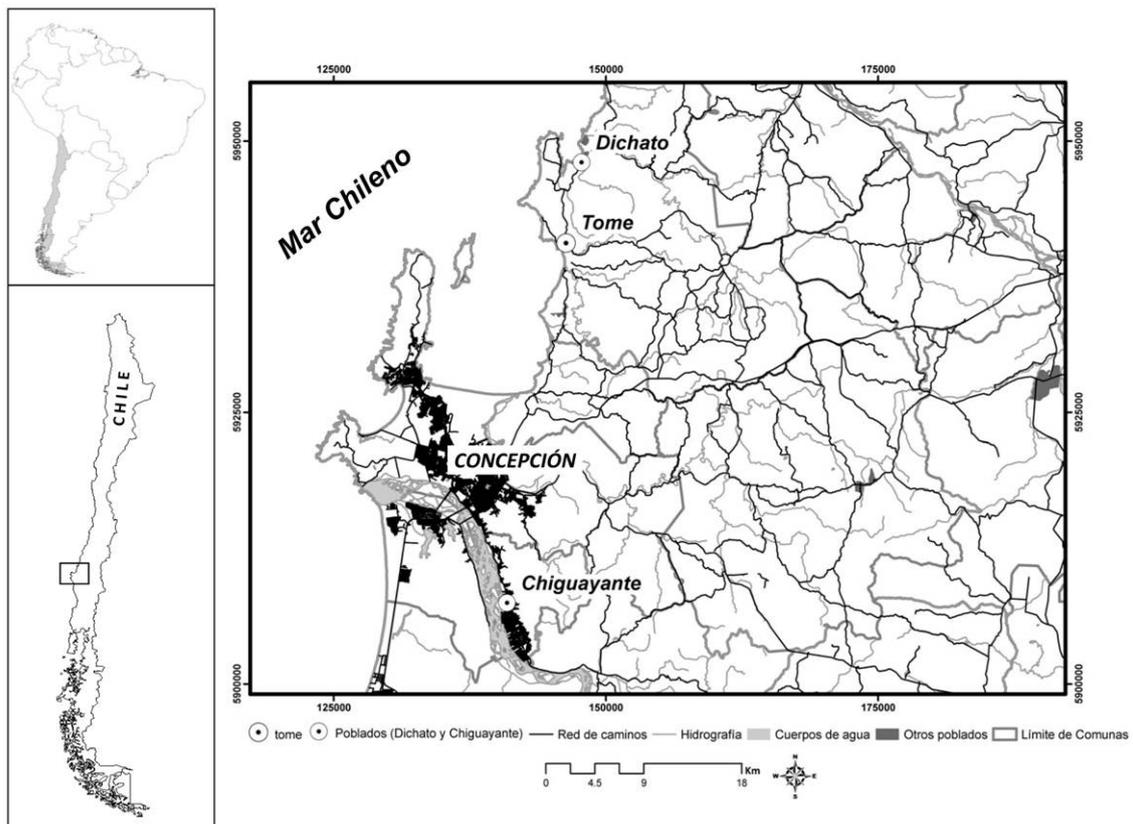


Figura 2.3.1.a

Áreas de interfaz, en donde se han producido graves incendios con daño a viviendas, en áreas críticas de ocurrencia. Poblados de *Dichato*, *Tomé* y *Chiguayante*.

La comuna de Chiguayante se ubica en la Provincia de Concepción, sobre la ribera nororiental del río Bío Bío, a unos 18 km aguas arriba de su desembocadura en el océano Pacífico. Sus coordenadas geográficas son 36° 55' 27" Sur y 73° 02' 10" Oeste, su altitud varía desde los 25 msnm, junto a la orilla del río, hasta los 400 msnm de las partes altas de la cordillera de la Costa. En esta área se presenta una interfaz caracterizada por una alta densidad estructural en viviendas y diversidad en materiales que obedecen principalmente a diferencias económicas. Producto de la ocupación del territorio y de las características topográficas y oferta de uso de suelo, se ha conformado en los últimos 15 años un límite heterogéneo caracterizado por un contacto directo con la vegetación combustible en sectores de elevadas pendientes. El comportamiento del fuego en estas condiciones puede alcanzar proporciones extremas, principalmente por la acción sostenida de fuertes vientos procedentes desde el Océano Pacífico, y que aceleran las condiciones de presecado de los materiales combustibles, y con ello, las condiciones mínimas de encendido.

Un ejemplo de lo anterior, fue el incendio ocurrido el 7 de febrero de 1999. En ese día, se conformaron las condiciones propicias para el avance del fuego: vientos fuertes y secos procedentes del valle central y precordillera de Los Andes (conocidos como *puelche*), altas temperaturas y la existencia de una gran cantidad de vegetación densa altamente combustible, en contacto directo con poblaciones cuyos ejes de expansión se insertan en el bosque. El resultado de esta combinación de factores fue un incendio que arrasó tan sólo 13 hectáreas, pero que ocasionó enormes pérdidas materiales a viviendas, heridos, y daños sociales que fueron difíciles de cuantificar por el Municipio de la Comuna.



Foto 2.3.1.a. Consecuencias Incendio en febrero 1999 en la zona de estudio. Fuente: fotografía aérea cedida por la Municipalidad Chiguayante. Citado en Jiménez (2006).

Producto de este incendio y de otros sucedidos en el pasado, Jiménez (2006) realizó un estudio en la Comuna, a base de información histórica de incendios, su localización y características de los mismos, como asimismo un análisis de riesgo y peligro de incendios forestales utilizando ecuaciones y funciones de comportamiento del fuego acordes al área de estudio.

Como principales resultados, se proponen valores de anchura mínima en faja de protección para las viviendas respecto a los combustibles del entorno (sistema preventivo de defensa), cuyos valores dependen principalmente del modelo de combustible presente, y con un ancho promedio para todos los casos estudiados, de 30 metros. Del mismo modo se determinaron distancias de seguridad en función del material de construcción de las viviendas y las condiciones topográficas del entorno para efectos del cálculo de la propagación del fuego, utilizando las fórmulas del Sistema KINTRAL, elaborado por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile. En su estudio propone propuestas de protección a nivel individual (vivienda) y a nivel de planes futuros de urbanización, planteando claramente medidas de tratamiento de la vegetación combustible y exclusión de aquellas áreas que revisten un alto peligro a la propagación del fuego.

2.3.2 Estudio de caso 2: Poblados de Tomé y Dichato. Octava Región de Chile.

Similar estudio realizó López (2009) en la Comuna de Tomé y la localidad de Dichato, más al norte de Chiguayante (ver figura 2.3.1.a), Octava Región de Chile. En el estudio local de la interfaz, propone un análisis territorial que integra los factores de riesgo, peligro y daño potencial producto de la propagación del fuego. Sus resultados se expresan en un modelo de vulnerabilidad que permite apoyar acciones para la protección contra incendios forestales.

En modelo desarrollado corresponde a un listado jerárquico de variables que intentan explicar el problema de los incendios forestales en la interfaz analizada. El trabajo se organiza en tres grandes componentes: el factor riesgo, explicado principalmente por las actividades humanas, entre ellas la ocurrencia y densidad de incendios forestales, el factor de peligro, dado principalmente por las condiciones topográficas, climáticas y de

la vegetación, que condicionan la propagación del fuego. El tercer componente incluido en el modelo de vulnerabilidad corresponde al daño potencial, que para el caso de este estudio, se colocó énfasis en la estimación de pérdidas en viviendas por áreas de interfaz, como asimismo en una valoración económica de los bienes tangibles materiales susceptibles a ser dañados por la acción del fuego.

La figura 2.3.2.a, ilustra la expresión territorial de los resultados, destacando la alta gravedad del problema en toda la interfaz, asociado a sectores de alta conectividad vial, y densidad poblacional. Los antecedentes aquí reportados son un testimonio de la presión que ejerce la actividad humana sobre la ocupación ininterrumpida de nuevos espacios, muchas veces no aptos para el cambio en el uso del suelo.

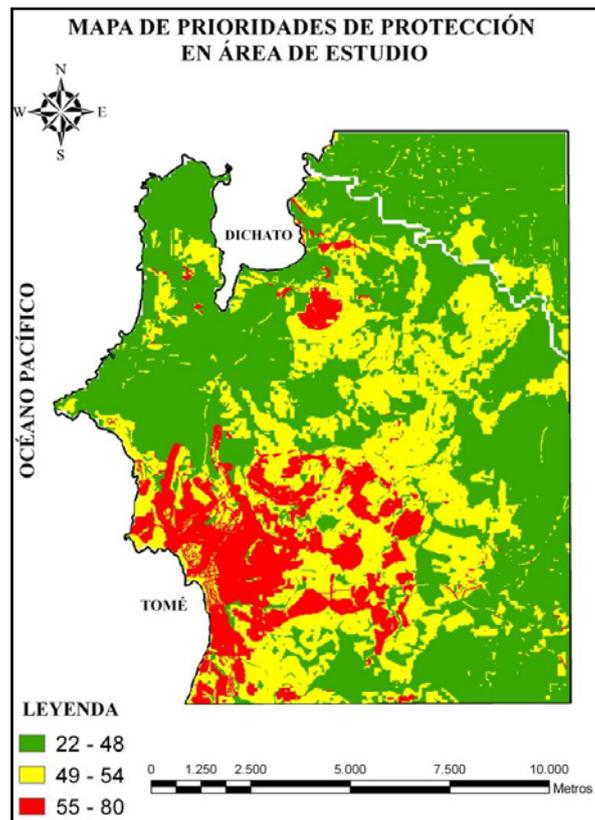


Figura 2.3.2.a.

Mapa de Prioridades de Protección, aplicado a la Comuna de Tomé y alrededores. Incluye otras localidades como Dichato, más al norte. Los sectores marcados en rojo corresponden a los valores más altos de vulnerabilidad, y en donde el estudio propone concentrar la mayor cantidad de esfuerzos para la protección. Fuente: López (2009).

En la elaboración de esta cartografía de vulnerabilidad, se consideraron aspectos de simulación de los parámetros de comportamiento del fuego, principalmente la velocidad

de propagación lineal que éste alcanza en distintas condiciones, la intensidad calórica del fuego y la longitud de llama. Estas estimaciones se calcularon mediante las ecuaciones de propagación elaboradas por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile e integradas en el modelo KITRAL, propiedad de este laboratorio.

El estudio concluye que las acciones conducentes a fortalecer el sistema de protección, deben estar orientadas fuertemente al manejo de la vegetación combustible y en el adecuado orden en la secuencia de ocupación de tierras. En paralelo, se propone fortalecer el programa de prevención mediante el acercamiento a la población de riesgo, como también a la persuasión de conductas irresponsables que desencadenan los incendios.

Por esta razón, los centros poblados de Tomé y Dichato, precisan de forma urgente una planificación a nivel comunal de su interfaz urbano-forestal, con la finalidad de garantizar el cumplimiento de la normativa comunal actual, así como el desarrollo y ejecución de acciones destinadas a prevenir la ocurrencia y las consecuencias de los incendios forestales en las zonas de Primera Prioridad.

Este estudio, al igual que muchos otros aplicados a áreas de interfaz, precisa el análisis económico de aquellas variables que inciden en la conveniencia de instalar nuevos espacios para uso habitacional, que consideren medidas cautelares para la prevención de desastres. La experiencia indica que en muchos casos las decisiones son más bien de orden político, en donde no necesariamente se privilegia la capacidad técnica para elaborar planes adecuados de ocupación del territorio.

2.3.3 Estudio de caso 3: Comuna de Valparaíso. Quinta Región de Chile.

En la periferia de las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar, las graves pérdidas que el fuego provoca en sus recursos naturales renovables y los severos impactos ambientales y sociales que se generan, conforman un preocupante escenario de daños cuyo principal foco se concentra en sectores habitacionales localizados en la interfaz urbano-rural, con la destrucción de viviendas y los impactos en las personas mismas, con repercusiones y desastres de una cuantía difícil de imaginar. Estas Comunas se caracterizan por una elevada ocurrencia de incendios forestales en sectores densamente poblados, y donde

año tras años los medios informan sobre el sinnúmero de viviendas arrasadas por el fuego y los lamentables perjuicios sobre sus habitantes, incluyendo la pérdida de vidas.

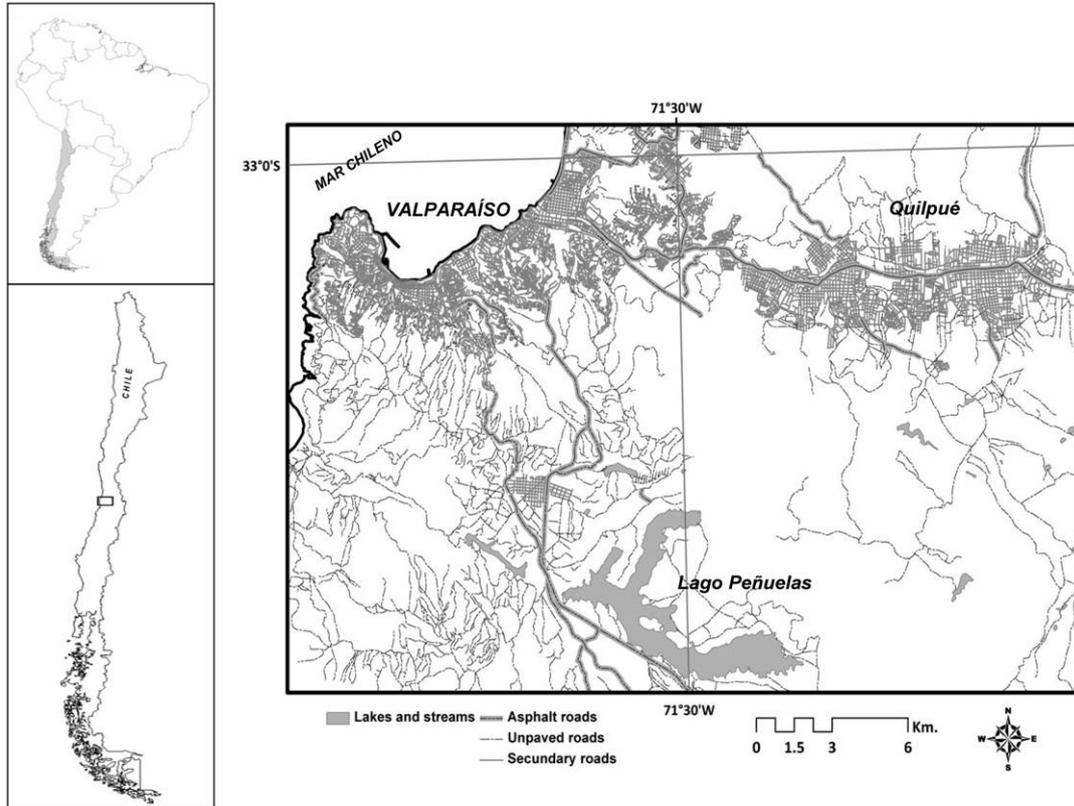


Figura 2.3.3.a
Área de estudio, Zona costa de Valparaíso, Quinta Región de Chile Central.

No obstante la relevancia de estos hechos, y los indudables esfuerzos para mitigarlos por parte de la Corporación Nacional Forestal, la Oficina Regional de Emergencia del Ministerio del Interior, Compañías de Bomberos y diversas organizaciones públicas y privadas, el problema se ha mantenido a lo menos en los últimos 40 años, desde la ocurrencia del incendio en la Población Gómez Carreño ubicada en la interfaz de Viña del mar, en 1969, que arrasó más de 100 viviendas causando la muerte de una decena de personas. En una importante medida las acciones de defensa forestal se han visto permanentemente muy limitadas por la insuficiente disponibilidad de recursos para la prevención y el combate del fuego, lo que podría ser una consecuencia del escaso conocimiento sobre la real magnitud de los daños materiales que se producen y de los impactos sociales y ambientales que derivan.

En terreno, es posible apreciar la ocupación del suelo, que se extiende hacia zonas lejanas respecto a caminos en buen estado, como también en áreas locales en donde las posibilidades de combate de incendios son mínimas por las altas pendientes y fuertes vientos que se desplazan por cerros acantilados. Esta situación se distribuye espacialmente en áreas de alto riesgo histórico muy marcadas, en donde la concentración de incendios toma forma respecto a la cercanía a caminos y ocupaciones de suelo en áreas no habilitadas (Figura 2.3.3.b).

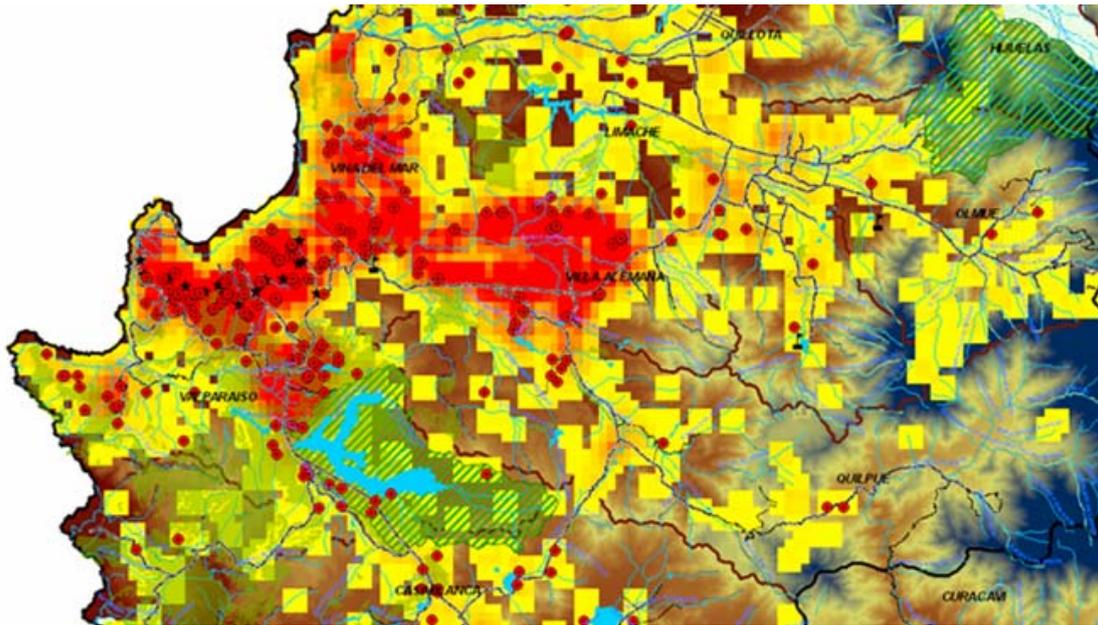


Figura 2.3.3.b

Zonas críticas de alta densidad de incendios forestales en interfaz urbano forestal. Las áreas marcadas en tonalidades rojo indican los mayores problemas del territorio, calculadas en unidades de 400 hectáreas. Dentro de esta área, destacan 23 puntos de alto conflicto por el alto número de incendios provocados por acción intencionada del hombre, y que corresponden a poblaciones y grupos de casas cuya posición se encuentran en sectores con alto peligro a la propagación del fuego.

En las áreas indicadas en la figura 2.3.3.b, se realizó un estudio de tipo social a todas las viviendas localizadas en riesgo de incendios, con el objetivo de segmentar las áreas urbanas en categorías para el diseño de políticas de protección. Los resultados de este estudio se exponen en el capítulo 4. A escala local, la figura 2.3.3.c representa las áreas en donde se aplicaron encuestas de percepción en la población en riesgo. Los resultados advierten el alto conocimiento de los daños potenciales que las personas, pero a la vez, la escasa posibilidad que ellos tienen de ser atendidos por personas encargadas del combate de incendios forestales, por la alta dificultad en el acceso al recurso agua, caminos de rápido acceso, y por las condiciones topográficas y de vegetación que favorecen la rápida propagación de las llamas.

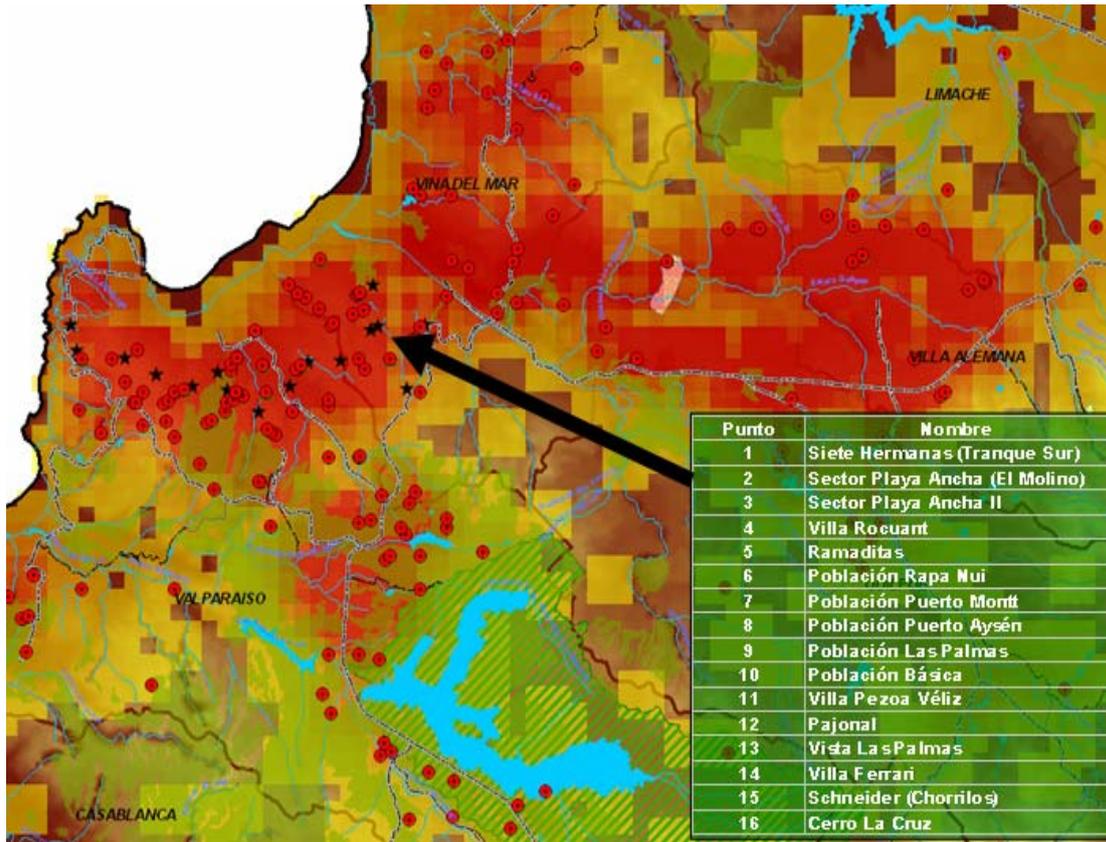


Figura 2.3.3.c

Puntos (estrellas en negro) reconocidos como de alta conflictividad en incendios de interfaz, y en donde se presentan altas demandas en manejo de la vegetación combustible.

En los análisis de riesgo y peligro por incendios forestales, es recomendable analizarlo desde distintas escalas geográficas. Cuando se utilizan las tecnologías de información geográfica, es necesario definir unidades de análisis que permitan su fácil reconocimiento en terreno, como además en la posibilidad de interpretar sus atributos mediante técnicas de tratamiento de imágenes. En el caso de Valparaíso, se utilizaron productos de alta resolución (píxeles de 5 metros) para la identificación y clasificación de las viviendas en áreas de interfaz. (Rodríguez y Silva *et al*, 2010). El análisis inicial de las imágenes e información obtenida en terreno permitió identificar cuatro situaciones, de las cuales tres corresponden socioeconómicos diferentes (*Alto S-1; Medio-Bajo S-2, y Bajo S-3*), y una cuarta (*S-4*), referido a sectores de casas aisladas o muy dispersas, y de condiciones socioeconómicas variables. A continuación se delimitó un sector de muestreo representativo de cada situación, obteniéndose los siguientes valores promedios para las variables de caracterización de cada una de ellas (Cuadro 2.3.a).

Cuadro 2.3.a

Resumen de antecedentes recolectados en el estudio de Casas en Zonas de Interfaz.

| Variables | Situación | | | |
|---|-----------|-------|-------|-------|
| | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 |
| Superficie de sector de muestreo (ha) | 4,5 | 5,25 | 6,25 | 20 |
| Número de casas identificadas | 115 | 60 | 450 | 4 |
| Densidad de Casas (N° de Casas/ha) | 25,55 | 11,43 | 72 | 0,2 |
| Superficie Promedio por Casa (m ²) | 120 | 48 | 52,5 | 68 |
| Densidad de Superficie de Construida (m ² /ha) | 0,306 | 0,055 | 0,374 | 0,001 |
| Cantidad Promedio de Adultos en cada Casa | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Cantidad Promedio de Niños en cada Casa | 2 | 5 | 4 | 4 |
| Material de Construcción | LC | M | M | LCM |
| Coefficiente de Riesgo de Personas en cada Casa | 6 | 13 | 11 | 11 |
| Escala Relativa de Inflamabilidad de Casas | 1 | 4 | 5 | 3 |
| Valor de la Construcción (m\$/m ²) | 1.215 | 217 | 335 | 439 |
| Valor de Enseres en cada Casa (m\$) | 43,74 | 3,12 | 5,28 | 8,96 |
| Escala Relativa del Valor de Construcción | 1,00 | 0,18 | 0,28 | 0,36 |
| Factor de Pérdida Económica | 0,1 | 1 | 0,9 | 0,8 |
| Factor de Daño a la Salud de las Personas | 0,3 | 1 | 0,9 | 0,7 |

Este análisis de tipo de viviendas en zonas de interfaz tiene la utilidad de poder valorar espacialmente el daño potencial en el avance del fuego, si es que realmente se produce el incendio. De esta manera es posible construir la carta de vulnerabilidad y daño potencial, junto con estimar el monto de pérdidas directas e indirectas, apoyadas por el análisis territorial del riesgo, peligro y daño potencial. Las áreas y características de las viviendas descritas en el cuadro 2.3.a, permitieron establecer zonas de peligro contra incendios, sobre la base de un modelo matemático basado en Sistemas de Información Geográfica, y la consideración de expertos que calificaron un total de 24 variables y factores que intentan modelar la vulnerabilidad del territorio frente a incendios forestales (Figura 2.3.3.c).

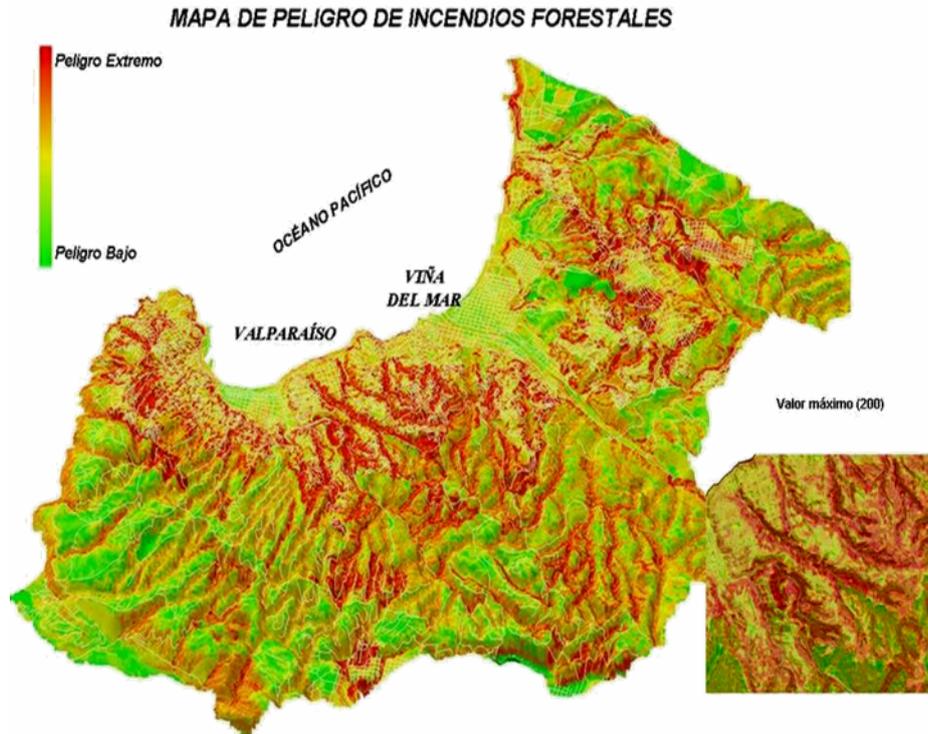


Figura 2.3.3.c

En este mapa, las áreas marcadas en rojo corresponden a los valores más alto de peligro y vulnerabilidad, y que están asociados a sectores con alta densidad de población. El tamaño y forma de estas áreas están relacionadas directamente con la presencia de altas pendientes del terreno y vegetación densa muy inflamable.

En la caracterización de las áreas de interfaz afectadas por incendios, resulta necesario además, cuantificar el estado de la vegetación posible de ser afectada por el fuego y sus efectos en la propagación hacia las casas. Para ello, se recomienda identificar puntos por donde el fuego podría avanzar con mayor fuerza, y además, los lugares en los cuales pueden aplicarse trabajos de corte y poda de vegetación

En las áreas de interfaz anteriormente descritas, se verificaron 16 puntos críticos en donde las labores silviculturales han sido parte mitigante de la alta velocidad de propagación del fuego y de los niveles de intensidad alcanzados por el fuego. En ellos, se observa que el problema se concentra en áreas con pendientes mayores al 50% y con densidad de cobertura vegetal cercano al 100%. Destacan áreas en donde existe un alto tránsito de personas que realizan actividades extractivas en la vegetación, y que como consecuencia de ello, en muchas ocasiones provocan incendios que suben rápidamente por laderas hacia las partes altas. Al no existir un área buffer o de protección, de produce entonces un rápido contacto del fuego con las viviendas por los fenómenos de

radiación y convección, propios de la alta intensidad que alcanzan las llamas en propagación libre.

2.4 Acciones para la disminución del peligro de incendios forestales en áreas de interfaz urbano-forestal. Zona Centro-Sur de Chile.

Existen tres formas conocidas de transferencia del calor: *conducción*, *convección* y *radiación*. En la conducción el calor se transfiere a través de un cuerpo sólido, por contacto entre sus partículas, sin que se verifique un desplazamiento significativo de estos elementos. Este mecanismo posee escasa importancia en la propagación de incendios forestales. La convección es el flujo de calor en ambientes gaseosos o líquidos, generado por la mezcla de porciones que poseen diferentes temperaturas y densidades. Posee una gran importancia en el desarrollo de los incendios forestales (columna de convección), también en el precalentamiento del ambiente por donde puede eventualmente propagarse el fuego. En cambio, en la radiación el calor se transmite por medio de ondas que se propagan en la atmósfera en línea recta. Un ejemplo típico de este mecanismo es el calefactor eléctrico (sin ventilador). Es importante en los incendios forestales porque el precalentamiento y presecado de los combustibles cercanos a las llamas se lleva a efecto principalmente por medio de este mecanismo de transferencia.

En incendios forestales y quemas también se verifican transferencias del calor mediante la emisión de materiales incandescentes, pavesas, chispas o brasas, las que pueden originar fuegos satélites. Sin embargo, a estas emisiones corresponderían más bien considerarlas como un efecto de la convección. (Julio, 2010). En el caso de la transferencia de calor a viviendas, estos principios se manifiestan dependiendo del distanciamiento existente entre la fuente de calor y el material combustible, como asimismo en las características propias de la vegetación. En todos los casos, un buen despeje y poda de material leñoso bajo, sin dudas contribuye a aminorar estos efectos.

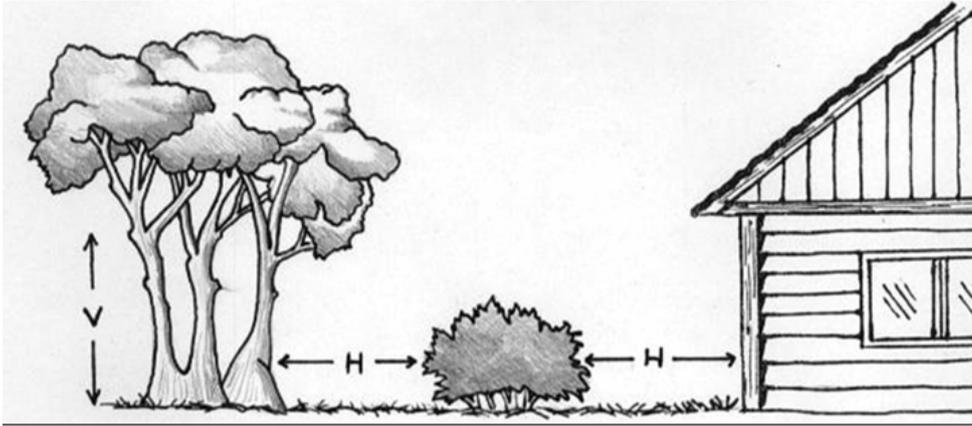


Figura 2.4.a.

Situación típica, que ilustra los distanciamientos horizontal y vertical que deben considerarse al momento de planificar manejar la vegetación combustible.

El efecto combinado de la transferencia de calor se ilustra en las siguientes figuras, considerando como ejemplo, cercanía a viviendas de material ligero (madera principalmente, y en presencia de cargas superiores a 8 toneladas por hectárea).

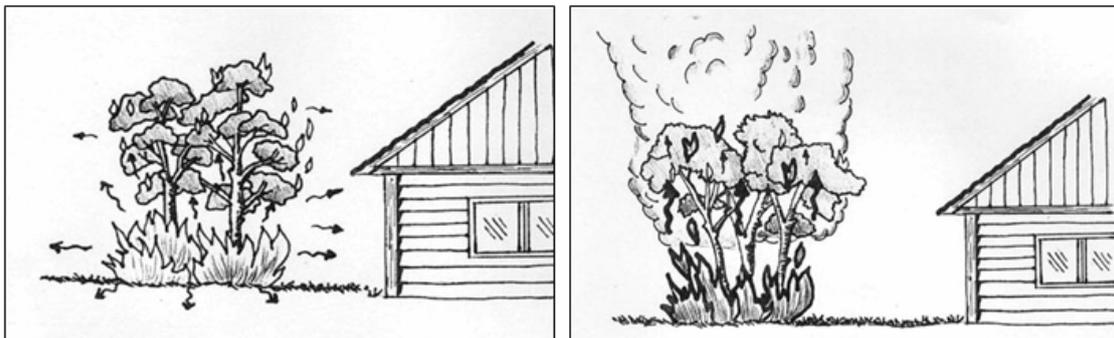


Figura 2.4.b.

Izquierda: efecto combinado de transferencia de calor hacia todas las direcciones. Derecha: En ausencia de viento y terrenos planos, la columna de humo desplaza la base del calor en el sentido del flujo.

Los efectos del fuego antes descritos en las figuras anteriores se ven acentuados por las condiciones climáticas y topográficas que usualmente se presentan en áreas muy inclinadas y con alta cantidad de vegetación. En el año 2008 se produjo un grave incendio de interfaz que quemó más de 64 casas y en el que perdieron la vida 3 personas. El avance del fuego fue extremadamente rápido y violento producto de la acción del viento que aceleró la velocidad de propagación. En la foto 2.4.a se muestra el área específica en donde ocurrió el incendio, en una población con alta densidad de viviendas de estratos socioeconómico bajo.

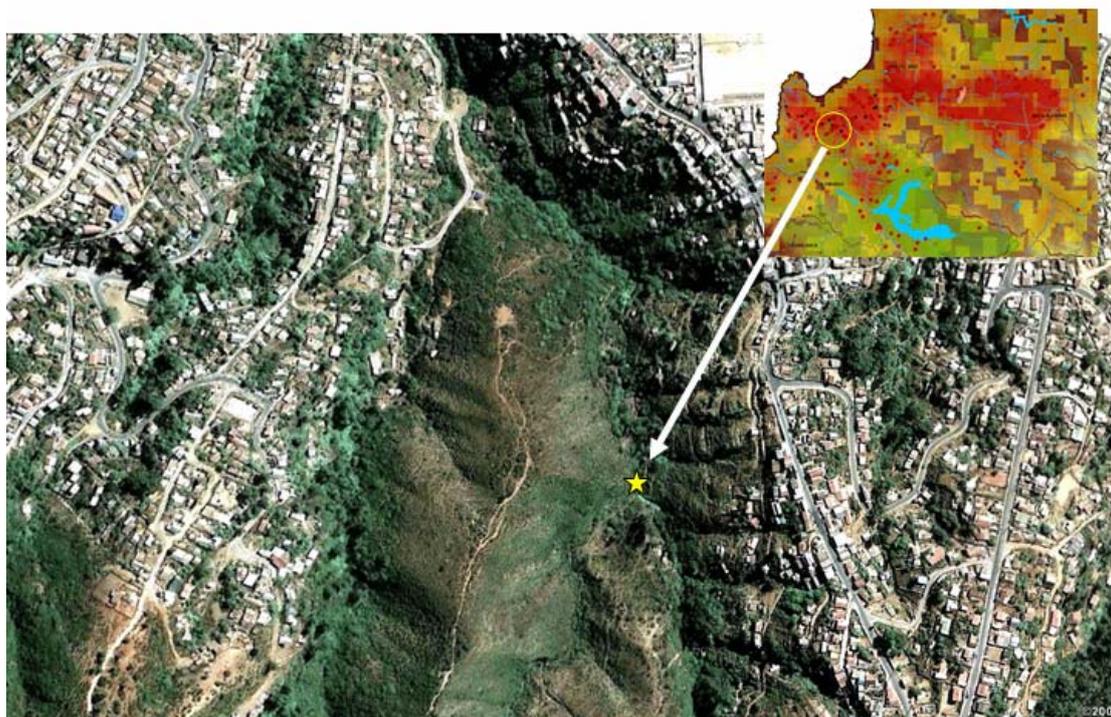


Foto 2.4.a

Área afectada por un grave incendio de interfaz, en la Región de Valparaíso. Incendio ocurrido en 2008.

La conformación de áreas susceptibles al avance del fuego presenta características comunes, entre ellas la alta densidad de viviendas ocupando espacios reducidos, y en áreas no aptas para ello. La Corporación Nacional Forestal de Chile, se ha encargado de cuidar todos los años por mantener las labores de limpieza y remoción de material combustible mediante el refuerzo de fajas cortafuego. La siguiente fotografía muestra las situaciones típicas que se producen en estas áreas.



Foto 2.4.b

Cerro densamente poblado con altas pendientes y en presencia de material vegetal altamente inflamable. Fuente: Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Chile.

Considerando estas condiciones de clima y topografía, y cuando estos efectos combinados se producen en presencia de viento y pendiente – como es el caso de los incendios estudiados en este artículo – la radiación y convección se manifiesta en incendios coronados de rápida propagación, con saltos de materiales encendidos que suelen alcanzar grandes distancias, afectando a laderas opuestas de cerros aledaños.

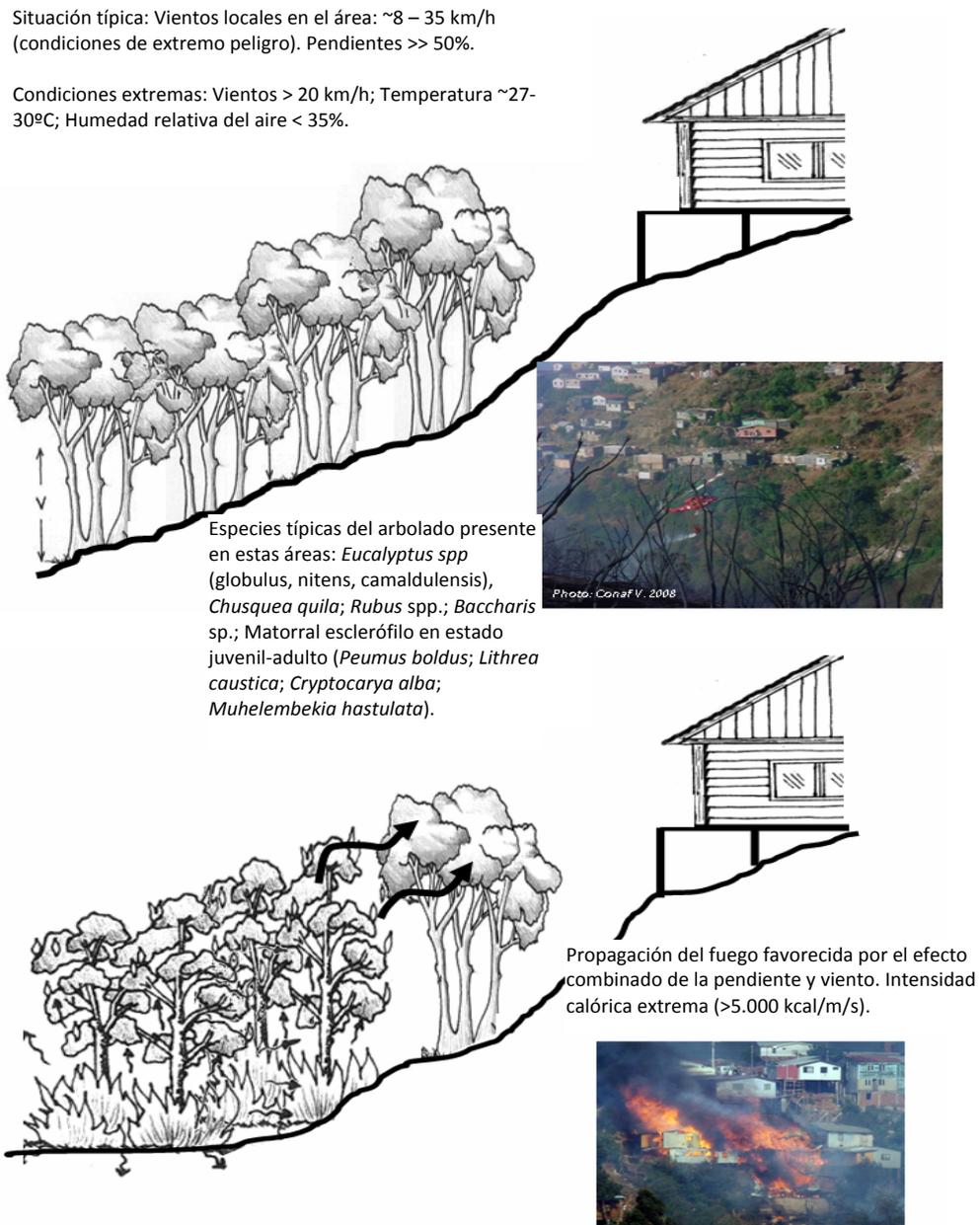


Figura 2.4.c. (superior) y **Figura 2.4.d** (inferior): Se muestra el fenómeno de radiación y convección ocurrido en un gran incendio del año 2008, en donde la presencia de viento y altas pendientes, ocasionó la liberación de una alta carga de energía que se propagó a favor de la pendiente, y en donde las viviendas se encontraban en áreas de alto contacto con la vegetación combustible.

2.4.1 Propuesta de acciones

Conforme a los antecedentes antes expuestos para los incendios estudiados, y considerando las actuaciones históricas que ha realizado la Corporación Nacional Forestal en áreas de alto peligro, se indican aquellos mecanismos de actuación más pertinentes para manejar el combustible vegetal. Las acciones propuestas se enmarcan dentro de un plan integrado de Protección contra incendios forestales que realiza esta Corporación, junto con el apoyo profesional de la Universidad de Chile

2.4.1.1 Línea de acción 1: La inclusión de la población a las labores de manejo de la vegetación combustible.

El área de estudio concentra una población aproximada de 25 mil personas que de una u otra forma, permanecen en contacto directo con las áreas de mayor peligrosidad en incendios forestales, por la cercanía a vegetación altamente combustible. Dado que el factor riesgo principal es la intencionalidad humana, la primera línea que se ha propuesto, es justamente incluir a la población que habita en estas áreas a participar activamente en labores de manejo de la vegetación, tanto en la remoción, como en la elaboración de barreras para la contención y disminución de la carga por unidad de superficie (foto 2.4.1.a). En esta labor participan representantes de las juntas de vecinos adscritas a los Municipios, de manera de formar grupos activos de trabajo que se comprometen, junto a la supervisión técnica de CONAF a realizar este tipo de actuaciones.



Foto 2.4.1.a. Participación activa de las comunidades en las labores de manejo y reducción de combustibles. Fuente: Corporación Nacional Forestal, Quinta Región de Chile.

2.4.1.2 Línea de acción 2: La concentración de labores de limpia en áreas periféricas

Los municipios de las comunas deben velar permanentemente por mantener despejadas de combustibles vegetales las áreas periféricas a espacios habitados, preferentemente en aquellas áreas donde el rápido acceso a unidades terrestres de combate de incendios pueda verse dificultada. Existen numerosas áreas confinadas a sectores con altas pendientes y en donde la falta de agua son factores que inciden en la rápida propagación del fuego. Por ello, es que una vez identificadas las áreas con mayor demanda en limpia, se programan estas labores en forma coordinada entre el personal propio de los Municipios y la asesoría técnica de CONAF respecto a la forma y extensión geográfica que debiesen tener dichas labores. En las faenas de limpia se extrae material seco fino y grueso, junto a restos orgánicos de otras fuentes, basura y cualquier otro material que sea potencialmente combustible y que constituya amenaza a la cercanía de viviendas (foto 2.4.1.b).



Foto 2.4.1.b

Faenas de limpieza de combustibles en áreas periféricas de interfaz. Trabajo combinado entre personal del Municipio y supervisión profesional de CONAF. Fuente: Corporación Nacional Forestal, Quinta Región de Chile.

2.4.1.3 Línea de acción 3: La construcción de cortafuegos perimetrales con maquinaria pesada

Por las características propias de diversidad del material combustible, su carga, tamaño y localización, no es factible de remover grandes cantidades a un coste razonable. Por ello, muchas veces es necesario actuar con el apoyo de maquinaria pesada, de manera de poder efectuar obras mayores de remoción, siguiendo los protocolos de limpia en fajas y

despeje en áreas donde se sabe que la acumulación de basura, escombros y vegetación seca, pueden constituir una real amenaza a las casas producto de la propagación del fuego. En este caso, se utilizan retroexcavadoras, tractores y bulldozers que trabajan coordinados siguiendo rutas específicas que son revisadas técnicamente de acuerdo a los niveles de peligrosidad y antecedentes de incendios anteriores ocurridos en etapas anteriores (foto 2.4.1.c). La factibilidad técnico-económica en la aplicación de este tipo de máquinas dependerá de la cantidad de kilómetros lineales a despajar y el ancho de la faja, ambos aspectos necesarios de comparar previamente con la conveniencia de realizar estas labores con brigadas dotadas de herramientas manuales. Por lo general, se utiliza una combinación de ambos procedimientos.



Foto 2.4.1.c

Labores de despeje con maquinaria pesada. La principal ventaja es la profundidad de la limpieza y la mayor durabilidad de las labores para enfrentar el crecimiento de la vegetación nueva. Fuente: Corporación Nacional Forestal, Quinta Región de Chile.

2.4.1.4 Línea de acción 4: La poda, desbroce y despeje manual a base de cuadrillas del Municipio.

Los tratamientos antes señalados se concentran básicamente en el suelo. No obstante, hay que considerar además la conveniencia de no extraer sino también modelar la vegetación aplicando técnicas de poda y reducción de ramas. Para ello el Municipio se encarga de capacitar a personal que va a terreno y ejecuta labores de poda, desbroce y despeje manual, pudiendo combinarse estas labores con las técnicas anteriormente señaladas (Foto 2.4.1.d).



Foto 2.4.1.d

Se ilustra el trabajo de una cuadrilla efectuando labores de poda y despeje de vegetación densa localizada en cercanía a viviendas. Fuente: Corporación Nacional Forestal, Quinta Región de Chile.

En esta labor, resulta conveniente evaluar permanentemente las condiciones de espaciamiento, dirección de los vientos locales y la accesibilidad, como asimismo en las condiciones que se encuentra la vegetación misma, tanto en altura como en densidad de copas. Como se mostraba en una ilustración anterior, la continuidad horizontal y vertical (piso vegetal y copas respectivamente), son aspectos que deben ser permanentemente controlados para evitar la propagación en ambos planos.

2.4.1.5 Línea de acción 5: Adaptación de barreras cortafuegos en combinación con fines estéticos y paisajísticos.

El efecto estético de estas labores también es considerado al momento de intervenir la vegetación combustible. Por ello, es que se ejecutan acciones de siembra en laderas de interfaz, en donde previamente se ha removido el material combustible mayor, e incluso en áreas desprovistas previamente de vegetación. De esta manera se logran habilitar importantes espacios no solo para protección sino también como factor estético que indudablemente contribuye a mejorar el entorno de vida de los habitantes aledaños a estas áreas.



Foto 2.4.1.e

Trabajos de revegetación y siembra directa en laderas. Fuente: Corporación Nacional Forestal. Quinta Región de Chile.

2.5 Consideraciones finales

Actualmente se reconocen claramente las áreas de mayor peligro de incendios forestales, producto del contexto histórico y espacial en los cuales han ocurrido. Las causas principales de este problema radican desde dos fuentes: por una parte el agente de ignición que corresponde al factor humano derivado de la intencionalidad y de actividades irresponsables en el uso del fuego, y por otra parte, en las condiciones por las cuales se favorece la propagación del fuego, entre ellas, principalmente el viento, la pendiente y la carga de combustible vegetal disponible.

Otros aspectos que contribuyen a enfatizar el peligro lo constituyen la humedad de los materiales vegetales, la cantidad, calidad y disposición de aquellas viviendas localizadas en áreas de peligro, y en un análisis más geográfico, en la forma como el núcleo urbano se ha expandido en los últimos 25 años, principalmente formando enclaves hacia cerros y laderas donde coexisten remanentes de matorral y bosque, junto con el alto grado de intervención humana.

Las medidas aquí descritas tienen como propósito central, contribuir al bienestar de la población en términos de disminuir la probabilidad de ocurrencia de incendios, y por otra parte, en aminorar los niveles de gravedad en la propagación del fuego, por cuanto el comportamiento del fuego en áreas topográficamente irregulares, ocasionan graves problemas para la intervención de medios para la extinción, especialmente cuando la propagación es extremadamente rápida.

Los puntos identificados en la cartografía precedente, corresponden justamente a áreas prioritarias en donde las acciones antes descritas deben mantenerse en el tiempo, en la medida que las condiciones presupuestarias y operativas así lo permitan.

2.6 Referencias

- Adriansen F, Chardon J, de Blust G, Swinnen E, Villalba S, Gulink H, Matthysen E. 2003. The application of 'least cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape Urban and Planning* (64) 233-247.
- Brink A, Mueller C, Kilnipen P, Hupa M. 2000. Combust Flame. 275p.
- Castillo M. 2006. El Cambio del Paisaje Vegetal afectado por Incendios en la Zona Mediterránea Costera de la V Región. Tesis Magíster en Geografía, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Geografía. Santiago. 152 p.
- Castillo M, Rodríguez y Silva F, Molina J.R. 2010. Situación de los incendios forestales de vegetación nativa en la Región de Valparaíso, Chile Central. *Geographicalia* (56) 89-110.
- Cohen J.D. 2000. Preventing disaster: home ignitability in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry*. 98(3): 15-21.
- Collins T. 2005. Households, forests, and fire hazard vulnerability in the American West: A case study of a California community. *Environmental Hazards* (6) 23-37.
- Davis J.B. 1990. The wildland-urban interface: paradise or battleground?. *Journal of Forestry*. 88(1): 26-31.
- Flamm R, Ward L, Weigle B. 2001. Applying a variable shape spatial filter to map relative abundance of manatees (*Trichechus manatus latirostris*). *Landscape Ecology* (16) 279-288.
- Hann W, Strohm D. 2003. Fire regime condition class and associated data for fire and fuels planning: methods and applications. Proceedings of the Conference on Fire, Fuel Treatments, and Ecological Restoration: Proper Place, Appropriate Time, Colorado State University, April 2002. pp. 397-433.
- Institute for Business and Home Safety. 2004. Wildfire. Protect your home against wildfire damage. www.ibhs.org/publications/view.asp?id=125. Fecha consulta: julio de 2011.

- Jackson E.L. 1991. Response to earthquake hazard. *Environmental Behavior* 13(4): 387-416.
- Jiménez M. 2006. Caracterización de la interfase forestal en Chiguayante (Chile). Propuestas para minimizar los daños por incendios forestales en la zona. Trabajo Profesional de fin de carrera. Universidad de Córdoba. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Departamento de Ingeniería Forestal. 199p.
- Julio G. 2007. Formulación de Lineamientos Políticos y Estratégicos para la Protección contra Incendios Forestales en Chile. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España. 341 p.
- Julio G. 2010. Fundamentos de Manejo del Fuego. Apuntes Docentes. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. 335p.
- Kundell J.E, Myszewski M, de Meo T.A. 2002. Land use planning and policy issues. In: Hermansen, L.A.; Macie, E.A. Human influences on forest ecosystems: the southern wildland-urban interface assessment. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 55-58.
- López N. 2009. Plan de protección contra incendios forestales de interfaz urbano-forestal en la Comuna de Tomé, provincia de Concepción (Chile). Trabajo Profesional de fin de carrera. Universidad de Córdoba. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Departamento de Ingeniería Forestal. 224p.
- McGee T. 2007. Urban residents approval of management measures to mitigate wildland-urban interface fire risks in Edmonton, Canada. *Landscape and Urban Planning* (82) 247-256.
- Nowicki B. 2002. The Community Protection Zone: Defending Houses and Communities from the Threat of Forest Fire. Center for Biological Diversity. 8p.
- Porterie B, Consalvi J-L, Loraud J-C, Giroud F, Picard C. 2007. Dynamics of wildland fires and their impact on structures. *Combustion and Flame* (149) 314-328. Science Direct. Elsevier.
- Pyne S.J, Andrews P.L, Laven R.D. 1996. Introduction to wildland fire. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons. 808 p.
- Radeloff V, Hammer R, Voss P, Hagen A, Field D, Mladenoff D. 2001. Human demographic trends and landscape level forest management in the Northwest Wisconsin Pine Barrens. *Forest Science* 47 (2), 229-241.
- Rodríguez y Silva F, Julio G, Castillo M, Molina J.R., Herrera M, Toral M, Cerda C, González L. 2010. Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p.
- Theobald D. 2001. Land use dynamics beyond the American urban fringe. *Geographic Science* (91) 544-564.
- Theobald D, Romme W. 2007. Expansion of the US wildland-urban interface. *Landscape and Urban Planning* (83) 340-354.
- Zhai Y, Munn I.A., Evans D.L. 2003. Modeling forest fire probabilities in the south central United States using FIA data. *Southern Journal of Applied Forestry*. 27(1): 11-17.

CAPÍTULO 3

MODELO DE VULNERABILIDAD FRENTE A INCENDIOS FORESTALES

CAPÍTULO 3: MODELO DE VULNERABILIDAD FRENTE A INCENDIOS FORESTALES.

3.1 Referencias generales

Los incendios forestales constituyen un problema cada vez más complejo por los severos impactos ambientales y sociales que se generan, más aún cuando comprometen áreas y sectores habitacionales localizados en la interfaz urbano-forestal (Radeloff *et al*, 2001; Theobald, D., 2001), con la destrucción de viviendas y los impactos en las personas mismas, con repercusiones y desastres de una cuantía difícil de imaginar (Ashe *et al*, 2007; Handmer *et al*, 2008). Por ejemplo, en Estados Unidos, más de 900 viviendas son destruidas anualmente en promedio, producto de incendios generados en áreas de interfaz, de acuerdo a estadísticas reportadas a partir de 1990 (IBHS, 2004). En Chile, el problema se concentra preferentemente en las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar, situadas en la costa de la V Región de Chile.

Esta zona se caracteriza por una elevada ocurrencia de incendios forestales en sectores densamente poblados, y donde en los últimos 40 años, a pesar de los enormes esfuerzos desplegados por los organismos estatales encargados de la protección y combate, se constata anualmente un alto número de viviendas arrasadas por el fuego y los lamentables perjuicios sobre sus habitantes, incluyendo la pérdida de vidas. En otros países como Australia, ya han surgido estimaciones de pérdidas humanas (Ashe *et al*, 2007), las que sumado a otros indicadores de perjuicios, es posible dimensionar magnitudes de catástrofes ocasionadas por incendios.

En todos los casos en que puedan producirse incendios en estas áreas, los mecanismos de defensa deben tener máxima prioridad para poder mitigar los daños y efectos potenciales producto de la propagación del fuego (Rodríguez y Silva, 2009; Rodríguez y Silva, y González-Cabán, 2010). En el caso específico de Chile, en una importante medida las acciones de defensa forestal se han visto limitadas por la insuficiente disponibilidad de recursos para la prevención y el combate del fuego, lo que podría ser una consecuencia del escaso conocimiento sobre la real magnitud de los daños materiales que se producen y de los impactos sociales y ambientales que derivan.

Por todo lo anterior, el objetivo central de este estudio es proponer y aplicar un modelo integrado de vulnerabilidad contra incendios forestales para la Provincia de Valparaíso en Chile Central, sobre la base de criterios de riesgo, peligro y daño potencial a generar por el fuego, basado en el Método de Prioridades de Protección propuesto por Julio (1992), y posteriormente perfeccionado en 2007, y con el apoyo del simulador de incendios forestales del Sistema KITRAL (Julio *et al*, 1997).

El modelo de vulnerabilidad económica se encuentra asociado a la asignación eficiente de los recursos para la prevención y combate de incendios forestales mediante la integración de riesgo, peligro y daño potencial. Se entiende por *riesgo* el factor que origina o provoca un incendio forestal y por *peligro* la conflictividad que puede alcanzar la propagación potencial de las llamas en base a la meteorología, la topografía y la vegetación. El *daño potencial* refleja las pérdidas económicas, tanto directas (bienes tangibles) como indirectas (bienes intangibles) producto de la propagación de las llamas.

En este modelo únicamente se incorporan las pérdidas directas sobre la vegetación y las viviendas, siendo estos impactos complementados por otros estudios en relación a las pérdidas socioeconómicas provocadas sobre bienes indirectos, como la salud humana y el paisaje. En este capítulo se diseña y aplica un modelo territorial de vulnerabilidad contra incendios forestales en un ecosistema mediterráneo de Sudamérica, considerando tres grandes componentes para el análisis: el riesgo, el peligro en la propagación del fuego, y el daño potencial sobre los valores económicos bajo amenaza.

Para el desarrollo y validación del modelo, se considera como ejemplo un área costera de 22.213 hectáreas, localizadas en una zona mediterránea de Chile Central, y para un período de 14 años (1997-2010). La aplicación del modelo en áreas de alto peligro de propagación del fuego en la interfaz urbano-forestal permite estimar la vulnerabilidad económica del territorio, estableciendo áreas prioritarias de actuación con objeto de la mitigación los impactos económicos provocados por los incendios forestales.

3.2 Modelo de vulnerabilidad aplicado a la Región de Valparaíso. Chile.

3.2.1 Materiales y métodos

3.2.1.1 Área de estudio

La investigación considera un área de 22.213 hectáreas, la que incluye la totalidad de la Comuna de Viña del Mar y el sector norte-centro de la Comuna de Valparaíso, ambas pertenecientes a la Provincia de Valparaíso de la V Región de Chile (Figura 3.2.1.a). El clima se caracteriza por la presencia de neblinas que se desplazan hacia los cerros interiores, conformando una zona templada, con temperaturas que oscilan entre 17 y 25°C, y precipitaciones anuales del orden de 370 mm (DIMECHI, 2005). Las masas forestales nativas en las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar, de acuerdo a lo descrito en el Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (CONAF-CONAMA-BIRF, 1999), corresponden principalmente a bosque mediterráneo, entre formaciones arbóreo-arbustivas y de matorrales, con especies adaptadas a ciclos reiterados de incendios forestales en época de altas temperaturas.

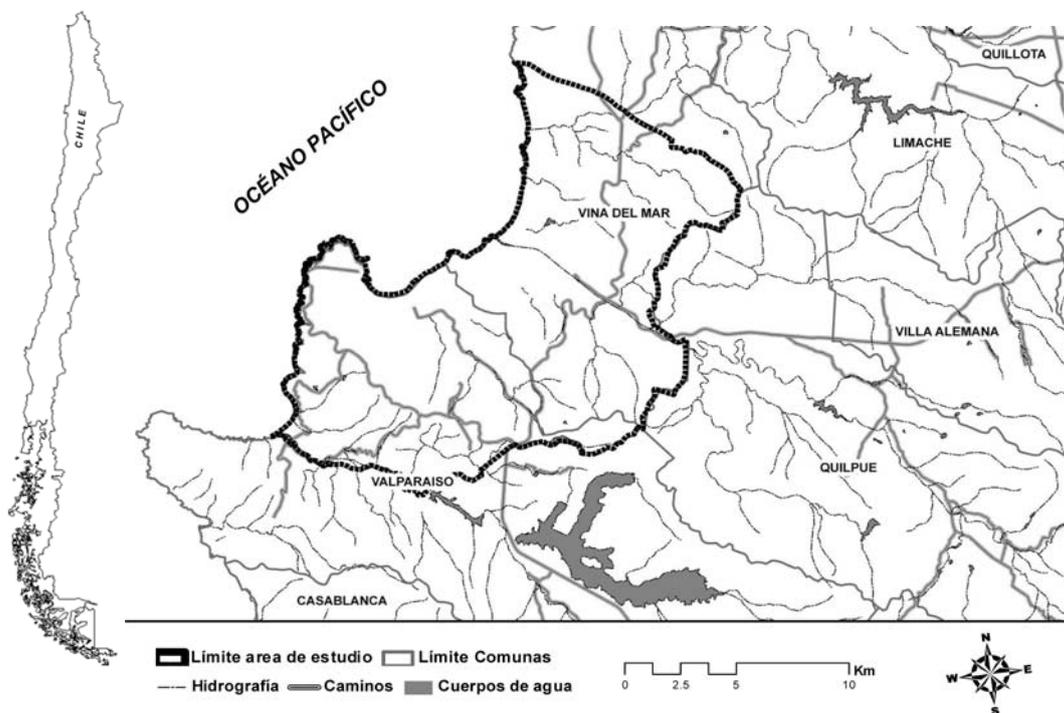


Figura 3.2.1.a.- Área de estudio. Región Central de Chile Mediterráneo, en donde se concentra la mayor parte de los incendios forestales que ocurren anualmente en el país. Fuente: Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Chile.

Las estadísticas de incendios indican una alta concentración de incendios forestales en el área costera de Valparaíso y Viña del Mar. En el cuadro 3.2.1.a, se observa que la ocurrencia anual de incendios en la Zona de Estudio se ha mantenido en un rango relativamente homogéneo durante el período analizado. Sin embargo, se constata una fuerte fluctuación en las superficies afectadas. Por otra parte, los indicadores sobre densidad de incendios y porcentajes de superficies afectadas demuestran los niveles de gravedad de la ocurrencia y propagación del fuego en comparación con los promedios regional y nacional.

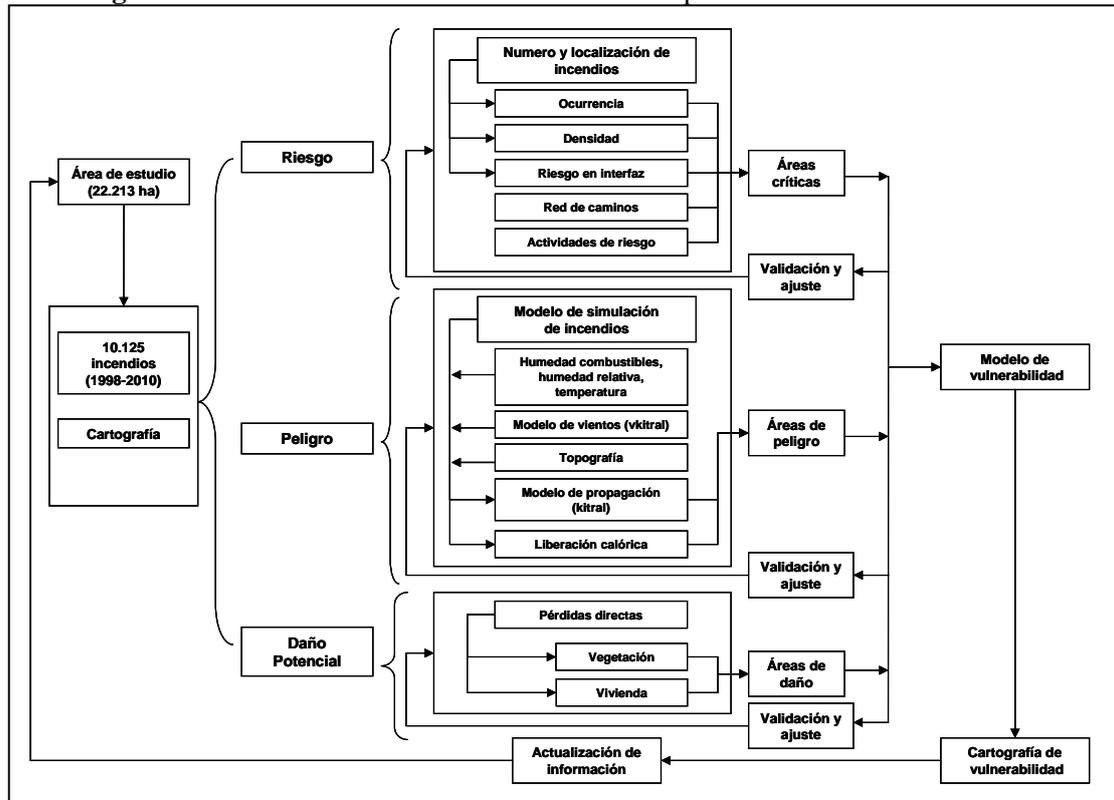
Cuadro 3.2.1.a.
Ocurrencia de Incendios Forestales en la Zona de Estudio. Período 1997-2010.

| Año | Número Incendios | Superficies Afectadas ha) | Densidad Incendios (Nº/Año/100 km ²) | Superficie Afectada %) |
|-------------------|------------------|---------------------------|--|------------------------|
| 1997 | 288 | 171 | 144,52 | 1,07 |
| 1998 | 293 | 127 | 131,90 | 1,32 |
| 1999 | 282 | 340 | 126,95 | 1,53 |
| 2000 | 303 | 94 | 136,41 | 0,42 |
| 2001 | 312 | 137 | 140,46 | 0,62 |
| 2002 | 372 | 162 | 167,47 | 0,73 |
| 2003 | 315 | 922 | 141,81 | 4,15 |
| 2004 | 202 | 1.955 | 90,94 | 8,80 |
| 2005 | 189 | 212 | 85,09 | 0,95 |
| 2006 | 251 | 251 | 113,00 | 1,13 |
| 2007 | 227 | 247 | 102,19 | 1,11 |
| 2008 | 212 | 406 | 95,44 | 1,83 |
| 2009 | 277 | 315 | 77,02 | 1,74 |
| 2010 | 301 | 381 | 67,81 | 1,18 |
| Promedio V Región | 932 | 8.911 | 17,88 | 0,53 |
| Promedio Chile | 5.619 | 52.905 | 3,37 | 0,10 |

3.2.1.2 Desarrollo del modelo de vulnerabilidad

El modelo de vulnerabilidad se compone de tres tipos de variables agrupadas en base a cada uno de los componentes: riesgo, peligro y daño potencial (Figura 3.2.1.b).

Figura 3.2.1.b.- Factores de entrada considerados para el desarrollo de modelo.



Se plantea un modelo aditivo ponderado (Julio, 1992; Castillo, 1997) con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (GIS) con una resolución espacial de 25 x 25 metros (celda), que responde a las necesidades de un estudio de este tipo debido a los errores admisibles en la recolección de algunas variables como los puntos de ignición (Castillo, 2006):

$$V_i = \sum_{i=1}^n X_i * P_i \quad (1)$$

donde: “V_i” es el valor de vulnerabilidad cada celda; “X_i” es cada una de las variables; y “P_i” su ponderación o peso. La generación de los inputs de riesgo, peligro y daño potencial fue dispar, utilizando como datos de entrada registros históricos, caminos, datos meteorológicos, combustibles forestales, modelo digital del terreno y cartografía de vegetación e interfaz generados mediante métodos empíricos, análisis de vecindad y simulaciones mediante V-Kitral (cuadro 3.2.1.b).

Cuadro 3.2.1.b.- Factores de entrada para el modelo de vulnerabilidad

| Factor | Dato de entrada | Método |
|---|---|-----------------------------------|
| Ocurrencia histórica (Julio, 1992) | Base de datos de incendios forestales | Modelos empíricos |
| Ocurrencia potencial (Julio, 1999) | Red de caminos Estudios de campo zonas de interfaz Actividades agrícolas y forestales | Análisis raster focal de vecindad |
| Peligro de propagación (Julio, 1992) | Datos meteorológicos | Simulación V-Kitral |
| Longitud de llama (Albini, 1976) Intensidad calórica (Byram, 1957) Efecto scorch (Chase, 1981) Factor pendiente (Julio, 1996) Factor contenido de humedad (Simmard, 1968; Brumm (1970), Fosberg y Deeming (1971), Deeming <i>et al</i> (1974), Fosberg (1977), (Cheney (1978), Rothermel (1983). Factor modelo de combustible (Julio, 1996) Resistencia al control (Julio <i>et al.</i> , 1995) Propagación lineal del fuego (Van Wagner, 1987; Julio, 1996) | Combustibles forestales | Simulación Kitral |
| Factor pendiente del terreno (Julio, 1999) | Modelo digital de terreno | Topogrid / Kriging |
| Valores socioeconómicos (Rodríguez y Silva <i>et al.</i> , 2007) Valores comerciales de vegetación (Rodríguez y Silva <i>et al.</i> , 2010; Julio, 2009). | Cartografía de vegetación combustible en Chile | Modelo empírico |
| Tasación de viviendas y niveles de impacto por incendios (ONEMI, 2010; CONAF, 2010). | Áreas de interfaz urbano forestal y estudios de campo | |

Componente Riesgo

Las variables de riesgo se relacionaron con las actividades del hombre, ya sea a través de acciones negligentes como también premeditadas o intencionadas, debido a que alrededor del 99% de los incendios de Chile se le asocia causa humana (Castillo, 2006; Julio, 2007). Mediante el empleo de GIS se localizaron las áreas de interfaz urbano-forestal, las áreas circundantes a los caminos y zonas de riesgo potencial. El análisis de la distribución espacial del riesgo se realizó mediante la aplicación de un filtro focal de vecindad, con tal fin se dividió el registro histórico en dos muestras. Una primera que engloba el 75% de los datos (período 1997-2006) para construir el modelo y otra con el 25% de la información (período 2007-2010) para validar la tendencia espacial de ocurrencia. En ambas muestras se determinó la densidad de incendios, y las áreas más sensibles relacionadas con la presencia de interfaz urbano forestal, la cercanía a caminos y actividades de riesgo localizadas en áreas de alta ocurrencia de incendios.

Componente Peligro

El comportamiento potencial del fuego fue estimado mediante la aplicación de las fórmulas de propagación del Sistema KITRAL (Julio *et al*, 1997), diseñado específicamente para los combustibles forestales en Chile. Dicho Sistema se fundamenta en dos ecuaciones para explicar la propagación e intensidad de un incendio:

$$VP = (Fmc) (Fch) (Fp + Fv) \quad (2)$$

En donde “VP” representa la velocidad de propagación lineal ($m s^{-1}$), “Fmc” es el factor modelo de combustible ($m s^{-1}$), “Fch” el factor contenido de humedad de la vegetación fina y muerta (adimensional), “Fp” el factor pendiente (adimensional) y “Fv” el factor viento (adimensional).

$$I = H * w * r \quad (3)$$

En donde “I” representa la intensidad calórica ($Kcal m^{-1} s^{-1}$); H es el poder calorífico del combustible por unidad de peso ($Kcal Kg^{-1}$), “w” la carga o peso del combustible disponible ($Kg m^{-2}$); y “r” la velocidad de propagación lineal del fuego ($m s^{-1}$).

La aplicación de estas ecuaciones mediante KITRAL, requiere de la siguiente información de partida: modelo de combustible, información topográfica e información meteorológica. La identificación de la vegetación mediante análisis remoto, fotointerpretación e itinerarios de campo (Rodríguez y Silva *et al*, 2010), permitió la asignación de modelos de combustibles presentes en Chile (arbolado nativo, pastizales, matorrales y plantaciones forestales, entre otros), a los cuales se les asignó el factor modelo de combustible ($m s^{-1}$), los parámetros de carga ($Kg m^{-2}$), poder calorífico ($Kcal kg^{-1}$), y la resistencia al control que opone cada tipo de vegetación frente al combate del fuego. El efecto de la pendiente es incorporado al modelo de propagación del fuego de KITRAL, a partir de un modelo digital del terreno (de 25 m de resolución espacial). La información meteorológica fue obtenida en base al análisis de 10.125 incendios (período 1998-2010), efectuándose las simulaciones de acuerdo a las condiciones dinámicas de la velocidad y dirección del viento, utilizando el módulo V-Kitral (Julio, 1997). Tras el análisis de cada incendio se obtiene la intensidad y dirección del viento, que posteriormente es utilizada por el simulador de incendios KITRAL. El valor de “VP”

para cada celda es un promedio de las sucesivas simulaciones para los incendios registrados en el área de estudio.

Componente Daño potencial

El daño potencial fue caracterizado por el efecto directo de la propagación potencial del fuego sobre la vegetación (nativa, matorrales y plantaciones comerciales), y el daño a las viviendas que se sitúan en la interfaz urbano-forestal. Los valores comerciales (US\$ ha⁻¹) fueron actualizados a moneda nacional de Chile y antecedentes de pérdidas en relación a daños históricos de incendios en el área de estudio, y las estadísticas oficiales de la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). La validación de sus resultados se realizó mediante el desarrollo de un modelo de regresión lineal, considerando como muestra para la construcción del modelo las superficies de vegetación afectadas por incendios hasta el año 2006, y como test de validación, los antecedentes de áreas quemadas hasta 2010. En el caso de las viviendas, se identificaron las áreas de interfaz, clasificadas en dos categorías en base a la densidad poblacional, la superficie promedio de casa, los habitantes por casa y su valor promedio (cuadro 3.2.1.c), conforme al estudio previo de Rodríguez y Silva *et al*, (2010) para el área de estudio, y el valor promedio de las pérdidas materiales en viviendas reportadas por la Oficina Nacional del Ministerio del Interior (ONEMI) en Chile.

Cuadro 3.2.1.c. Valor promedio de viviendas (construcción y mobiliario), para las dos áreas de interfaz identificadas en el área de estudio. Valores en dólares actualizados a marzo de 2011.

| Clase interfaz | Densidad habitacional (casas ha ⁻¹) | Superficie promedio de casas (m ²) | Habitantes /casa | Valor medio (US\$) | Nº de casas | Nº personas |
|----------------|---|--|------------------|--------------------|-------------|-------------|
| 1 | 26 | 120 | 4 | 32.202 | 16.745 | 50.235 |
| 2 | 37 | 56 | 7 | 18.575 | 35.649 | 142.596 |

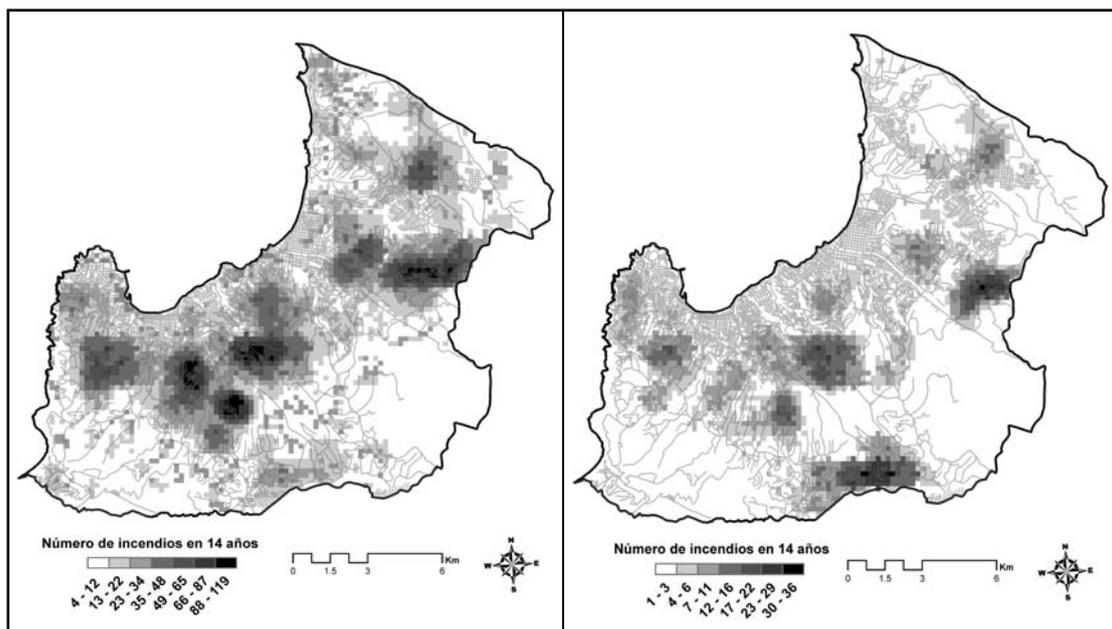
Los impactos económicos fueron sometidos a un test previo de distribución estadística, para luego comparar sus resultados con los antecedentes publicados por Pedernera *et al* (1999) y Julio (2007), para la misma área de estudio, considerando el período 1986-1998 de incendios.

3.2.2 Resultados

Componente Riesgo

Los puntos de ignición se traspasaron a formato raster (*grid*) utilizando un tamaño de celdilla de 625m² (celda de 25 x 25 m), con objeto de poder contabilizar el número de incendios por celda. El análisis de vecindad permitió identificar espacialmente áreas de acumulación de incendios forestales, las cuales fueron clasificadas en categorías (cuadro 3.2.2.a) siguiendo el criterio de segmentación de Jenks (1963), tanto para la muestra del modelo (1997-2006) como para la muestra de validación (2007-2010). Una vez clasificadas ambas muestras se correlacionó la densidad de incendios forestales con su distribución espacial (figura 3.2.2.a).

Figura 3.2.2.a
Áreas de ocurrencia de incendios forestales, para el área de estudio.



Cuadro 3.2.2.a. Rangos de clasificación de Jenks para las áreas de ocurrencia de incendios forestales. Los valores representan el número de incendios ocurridos en el área de estudio, en celdillas de 625m².

| Clase | 1997-2006 | 2007 - 2010 |
|-------|---------------|-------------|
| | 75% (muestra) | 25% (test) |
| 1 | 4 – 12 | 1 – 3 |
| 2 | 13 – 22 | 4 – 6 |
| 3 | 23 – 34 | 7 – 11 |
| 4 | 35 – 48 | 12 – 16 |
| 5 | 49 – 65 | 17 – 22 |
| 6 | 66 – 87 | 23 – 29 |
| 7 | 88 – 119 | 30 – 36 |

Las clases de ocurrencia (cuadro 3.2.2.a) presentaron una correlación de 0.759. La correlación entre el área de influencia de los caminos (a una distancia de 200 m del camino) y la distribución espacial de los incendios forestales disminuyó levemente a 0.711 pero con una concentración espacial de similares características. Por último, la correlación entre el área de influencia de la interfaz (a una distancia de 500 m según Rodríguez y Silva *et al*, 2010) y la distribución espacial de los incendios forestales alcanzó 0.672. Las áreas más críticas tendieron a concentrarse en el área de influencia de los caminos y áreas de interfaz urbano-forestal (cuadro 3.2.2.b).

Cuadro 3.2.2.b.- Correlaciones para el riesgo de incendios, para el área de estudio.

| Relación período 1997-2006 (y), con 2007-2010 (x) | Ecuación | R | Std. Desv. x | Std. Desv. y |
|--|-------------------------|-------|-----------------|-----------------|
| Densidad de incendios | $0,192185 + 0,570239 x$ | 0,759 | 1,37 | 1,03 |
| Cercanía a caminos | $1,083392 + 0,770242 x$ | 0,711 | 1,02 | 0,88 |
| Incendios en áreas de interfaz | $1,124415 + 0,432433 x$ | 0,672 | 0,98 | 0,74 |

Componente Peligro

Basado en la información meteorológica, la topografía y las características de los combustibles forestales, se simuló los incendios considerados en el área mediante el Sistema KINTRAL, en complemento con la información de vientos (Sistema VKINTRAL). Se generaron cinco niveles cualitativos en base a la velocidad de propagación e intensidad calorífica (cuadro 3.2.2.c.) en base al método de Jenks (1963), y posteriormente georeferenciados mediante el GIS.

Cuadro 3.2.2.c.- Valores de VP e I, de acuerdo al modelo KINTRAL.

| Rangos de VP (m/seg) | Promedio observado | Nivel | Rangos de I (Kcal/m/s) | Promedio observado | Nivel |
|-------------------------|-----------------------|---------|---------------------------|-----------------------|---------|
| 0,0010 – 0,0060 | 0,0035±0,0004 | Mínimo | 0,0010 – 50 | 25,00±8,17 | Mínimo |
| 0,0061 – 0,0100 | 0,0081±0,0028 | Bajo | 50,1 – 100 | 75,05±6,77 | Bajo |
| 0,0101 – 0,0400 | 0,0251±0,0017 | Medio | 100,1 – 500 | 300,05±22,04 | Medio |
| 0,0401 – 0,1000 | 0,0701±0,0014 | Alto | 500,1 – 1000 | 750,05±26,41 | Alto |
| 0,1001 – 0,4000 | 0,2501±0,0031 | Extremo | 1000,1 – 16.500 | 8750,05±111,03 | Extremo |

La validación de las simulaciones del comportamiento del fuego de acuerdo a las propagaciones reales fue realizada mediante la prueba de Mann-Whitney y el coeficiente de Rangos y Signos de Spearman (cuadro 3.2.2.d) para incendios de diferente tamaño, condiciones meteorológicas, vegetación y topografía (Castillo, 2008).

Cuadro 3.2.2.d.- Valores de similitud calculados por el Sistema KITRAL de acuerdo al modelo de propagación lineal del fuego.

| Rango (há) | Sup. promedio | % Similitud* |
|---------------|---------------|--------------|
| 0,01 – 0,50 | 0,22 | 34,18 |
| 0,51 – 2,00 | 0,99 | 51,15 |
| 2,01 – 5,00 | 2,23 | 74,08 |
| 5,01 – 20,00 | 7,28 | 83,00 |
| 20,01 – 60,00 | 37,33 | 84,67 |
| > 60,00 | 404,75 | 90,75 |

*Valores calculados mediante la comparación de valores reales y simulados (tamaño y forma de cada incendio), sobre la base de la Prueba Mann-Whitney y coeficiente de Rangos y Signos de Spearman.

Componente Daño Potencial

a) Vegetación

Las pérdidas directas sobre la vegetación del área de estudio fueron determinadas mediante la valoración de las distintas coberturas forestales de acuerdo a los precios medios de mercado. La proporción de la vegetación dañada, y en consecuencia el impacto económico, se obtuvo a base del nivel de intensidad de las llamas (medido en intensidad calórica del fuego). Para ello se utilizaron las referencias procedentes de la modelación de combustibles forestales elaborada por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile (cuadro 3.2.2.e).

Cuadro 3.2.2.e.- Valores de la Pérdida Directa la vegetación en la Zona de Estudio

| Categoría | Valores (US\$/ha) (*) |
|--|-----------------------|
| Plantaciones de Pino Radiata | 4.489 |
| Plantaciones de Eucalipto | 3.091 |
| Arbolado Nativo Denso | 2.181 |
| Arbolado Nativo Ralo y Semidenso | 1.454 |
| Matorral Semidenso | 203 |
| Matorral y Arbolado | 597 |
| Pastizal Ralo/Semidenso | 131 |
| Pastizal y Matorral Denso | 226 |
| Pastizal y Arbolado Nativo | 792 |
| Horticultura y Canchas de Golf | 912 |
| Cultivos de Cereales | 1.143 |
| Viñas | 4.627 |
| Desechos Agrícolas y Forestales | 272 |
| Vegetación en Bordos de Agua, Canteras y Caminos | 131 |

(*) Valores en Chile al 10 de julio de 2012, equivalentes a \$ 494 y 0,82 Euros.

Las pérdidas promedio por cobertura vegetal fueron traspasadas al GIS en las áreas quemadas por los incendios en el período 1997-2010. Al igual que en el riesgo y el peligro se utilizó el 75% de los datos para la creación del modelo y el restante para la validación. La reclasificación de los píxeles dañados en diez intervalos (cuadro 3.2.2.f), permitió alcanzar una correlación del 72.9% (cuadro 3.2.2.g).

Cuadro 3.2.2.f.- Rangos de clasificación de Jenks para el valor comercial de los daños en la vegetación Los valores se expresan en miles de dólares, ocurridos en el área de estudio, en celdillas de 625m².

| Clase | 1997-2006 | 2007 - 2010 |
|-------|--------------------------------|-----------------------------|
| | 75% (muestra) Miles de US\$ | 25% (test) Miles de US\$ |
| 1 | 0 – 3,51 | 0 |
| 2 | 3,51 – 14,05 | 0 – 6,23 |
| 3 | 14,05 – 28,11 | 6,23 – 15,58 |
| 4 | 28,11 – 42,17 | 15,58 – 34,28 |
| 5 | 42,17 – 66,77 | 34,28 – 43,63 |
| 6 | 66,77 – 108,94 | 43,63 – 112,20 |
| 7 | 108,94 – 224,91 | 112,20 – 283,62 |
| 8 | 224,91 – 347,90 | 283,62 – 383,35 |
| 9 | 347,90 – 446,30 | 383,35 – 607,76 |
| 10 | 446,30 – 896,17 | 607,76 – 794,75 |

Cuadro 3.2.2.g.- Correlación para el daño comercial a la vegetación.

| Relación período 1997-2006 (y), con 2007-2010 (x) | ecuación | r | Std. Desv. x | Std. Desv. y |
|--|-----------------------|-------|-----------------|-----------------|
| Daño directo vegetación | 0,413146 + 0,613358 x | 0,729 | 2,06 | 1,74 |

b) Viviendas

Se realizó un filtro de los incendios forestales ocurridos dentro del área de influencia de la interfaz en el período 1997-2010. Se obtuvo una estadística de incendios anuales para cada tipología de interfaz, la superficie quemada y su relación con la pérdida directa en viviendas (cuadro 3.2.2.h).

Cuadro 3.2.2.h.- Incendios en áreas de interfaz y su relación con la pérdida directa.

| Año | Incendios en clase de interfaz | | Total | Sup. Quemada (ha) | Pérdida directa (US\$) | Año | Incendios en clase de interfaz | | Total | Sup. Quemada (ha) | Pérdida directa (US\$) |
|------|--------------------------------|-----|-------|-------------------|------------------------|------|--------------------------------|-----|-------|-------------------|------------------------|
| | 1 | 2 | | | | | 1 | 2 | | | |
| 1997 | 54 | 94 | 148 | 199 | 14.011.025 | 2004 | 47 | 97 | 144 | 1.955 | 14.251.918 |
| 1998 | 65 | 144 | 209 | 132 | 13.886.999 | 2005 | 35 | 97 | 132 | 212 | 11.817.665 |
| 1999 | 60 | 141 | 201 | 345 | 15.738.692 | 2006 | 44 | 100 | 144 | 251 | 8.732.358 |
| 2000 | 78 | 190 | 268 | 96 | 7.787.011 | 2007 | 53 | 86 | 139 | 247 | 12.166.183 |
| 2001 | 78 | 149 | 227 | 139 | 6.420.698 | 2008 | 43 | 58 | 101 | 406 | 8.839.517 |
| 2002 | 105 | 208 | 313 | 162 | 17.419.926 | 2009 | 39 | 40 | 79 | 518 | 8.766.313 |
| 2003 | 65 | 143 | 208 | 922 | 16.245.587 | 2010 | 29 | 60 | 89 | 713 | 10.640.011 |

El número de incendios en la interfaz fue analizado mediante el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con ayuda del software estadístico. Los resultados indicaron que las distribuciones para interfaz 1 y 2 siguen una tendencia de tipo normal ($p < 0,05$) (cuadro 3.2.2.i), al igual que la secuencia de valores para la pérdida directa.

Cuadro 3.2.2.i.- Prueba de Kolmogorov-Smirnov
para los datos de interfaz y sus pérdidas (1997-2010)

| N (años 1997-2010) | | Interfaz 1 | Interfaz 2 | Pérdidas |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 14 | 14 | 14 |
| Parámetros normales | Media | 56,79 | 114,79 | 11.908.850,21 |
| | Desviación típica | 20,389 | 49,446 | 3.462.429,32 |
| Diferencias más extremas | Absoluta | ,129 | ,189 | ,169 |
| | Positiva | ,129 | ,189 | ,169 |
| | Negativa | -,086 | -,131 | -,145 |
| Z de Kolmogorov-Smirnov | | ,484 ^(*) | ,707 ^(*) | ,634 ^(*) |
| Significancia asintótica. (bilateral) | | ,974 | ,699 | ,816 |

(*) Mayor que el nivel crítico 0,05. Se acepta el supuesto de normalidad de los datos.

La pérdida directa total en viviendas se obtuvo como una sumatoria ponderada entre el valor promedio de las casas localizadas en áreas de interfaz 1 (US\$ 32.202/casa) y 2 (US\$ 18.575/casa), y su relación con la cantidad de incendios en cada píxel o subárea. El análisis de la superficie quemada por cada incendio permitió establecer una escala o rango de pérdidas, que adopto la forma de una distribución normal. Las pérdidas directas en viviendas fueron traspasadas al SIG mediante una capa raster reclasificada en seis niveles.

Cuadro 3.2.2.j.- Distribución de las Pérdidas Directas
de acuerdo a niveles de daño por hectárea

| Rango de Pérdidas (US\$/ha/año) | Superficie Afectada (%) | Total de Pérdidas (US\$) | Distribución de Pérdidas (%) |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 0 | 73,29 | 0 | 0 |
| 0,01-100 | 15,24 | 331.761 | 0,23 |
| 100,1-1000 | 5,71 | 3.963.845 | 2,74 |
| 1000,1-5000 | 2,79 | 12.141.812 | 8,40 |
| 5000,1-15000 | 1,67 | 25.347.227 | 17,54 |
| >150000 | 1,29 | 102.708.556 | 71,08 |

3.3 *Discusión del modelo*

La integración de los componentes de Riesgo, Peligro y Daño potencial permite obtener un modelo global de vulnerabilidad económica del territorio frente a incendios forestales (Chuvieco *et al*, 2010). En Chile, el Riesgo tiende a concentrarse en la periferia de los sectores de interfaz con alta densidad de población, así como en la trayectoria de las principales vías de comunicaciones. Este resultado coincide con la permanente amenaza histórica que han tenido esos sectores, desde hace unos 40 o más años, que se traducen en graves daños e impactos, que incluyen la pérdida de vidas

humanas y la destrucción de cientos de casas en las temporadas más críticas. La revisión de los registros de ocurrencia acumulada, comprobó situaciones críticas, con densidades de hasta 74 incendios en 25 hectáreas en el período 1997-2010, lo cual sin duda refleja la alta recurrencia sobre un mismo territorio, y refleja la tendencia establecida por Pedernera (1999) para el período (1986-1998), respecto al daño en áreas de interfaz (figura 3.3.a). Las variables del Peligro reflejan los efectos del comportamiento del fuego (velocidad de propagación e intensidad calorífica) y la resistencia al control como consecuencia de las condiciones topográficas, climáticas y vegetacionales presentes en el área de estudio (Julio *et al*, 1997). Se puede observar como el Peligro, a diferencia del Riesgo, presenta una mayor dispersión de las zonas más conflictivas, concentrándose los sectores más críticos en quebradas transversales a la línea de costa, que conectan directamente los cerros del área de interfaz, con las laderas de mayor pendiente.

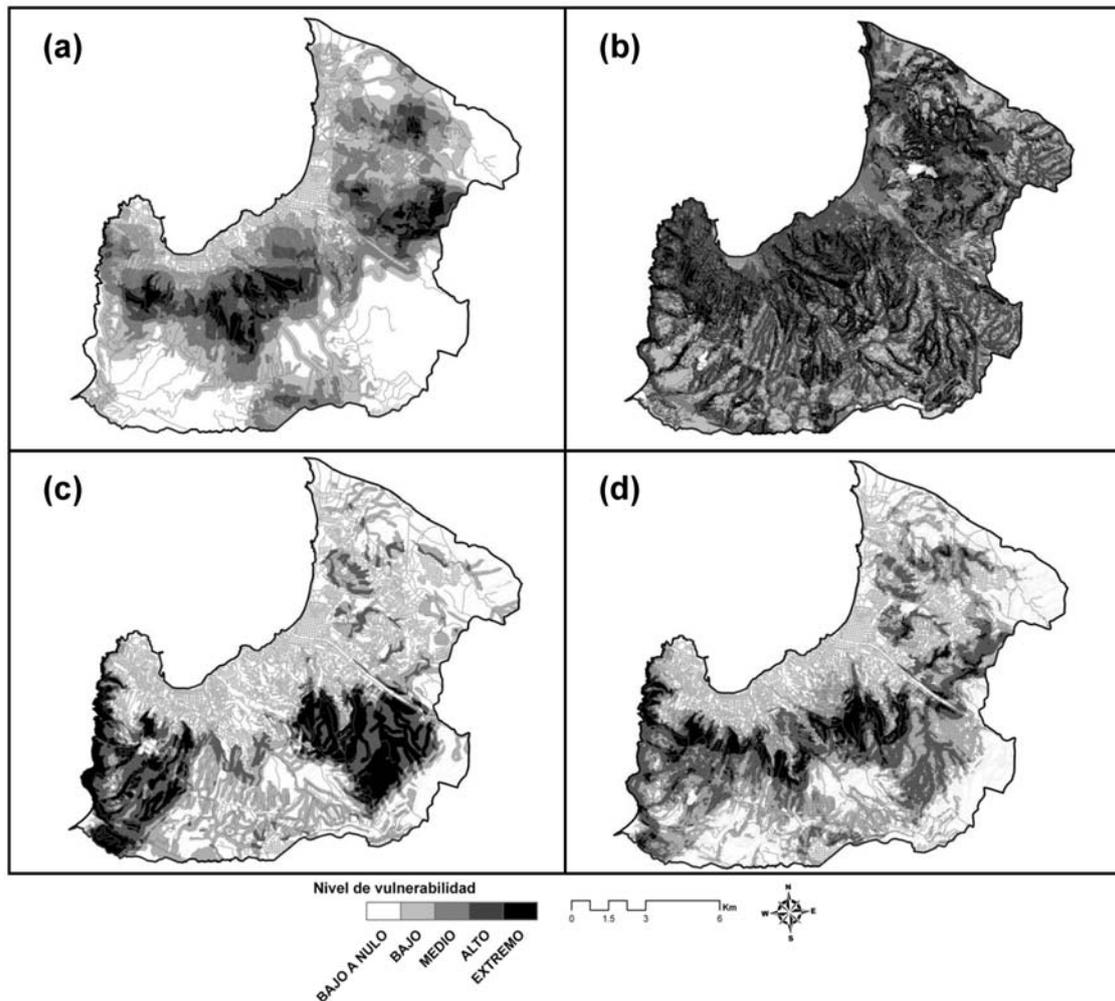


Figura 3.3.a.- Resultado del mapa final de vulnerabilidad contra incendios forestales (d), a base de los componentes de Riesgo (a), Peligro (b) y Daño Potencial (c).

De los antecedentes expuestos cabe señalar que, no obstante las significativas diferencias entre las superficies quemadas anuales, las pérdidas totales se mantienen en un rango relativamente homogéneo. Al analizar los datos del cuadro 3.2.2.j, se constata que en cerca de tres cuartos de la superficie total no se produjeron pérdidas por incendios forestales en el período 1997-2010. En el territorio afectado por el fuego se observa además que en una proporción inferior al 6% de la superficie se concentra alrededor del 97% de las pérdidas directas. Cabe destacar por tanto, que en algunas áreas el impacto económico del paso de las llamas puede encontrarse infra o sobredimensionado debido al empleo de un valor medio de pérdidas.

En el caso particular de las pérdidas sobre viviendas, éstas fueron calculadas con ayuda del GIS en base a los pocos antecedentes disponibles, siendo necesario en sucesivas investigaciones recopilar datos más específicos e identificar mayor tipología de interfaz. Los valores económicos utilizados responden a los costes promedios estimados por organismos públicos de la V Región de Chile y los calculados en Australia (Handmer *et al*, 2008) en relación a la recuperación de las viviendas y enseres de primera necesidad de los afectados. Aún cuando Ashe *et al*, (2007), reportan cifras de afectaciones a vidas humanas, para el caso de Chile se decidió no incluir el valor de las personas fallecidas, por no disponerse de antecedentes confiables.

El modelo de vulnerabilidad permite identificar áreas críticas de incendios con objeto de priorizar actuaciones. La clasificación por categorías de vulnerabilidad mediante el *Método de los Séptimos* (Julio, 1992), prioriza 1/7 del territorio de mayor vulnerabilidad (categoría primera), e identifica 2/7 como de vulnerabilidad media (categoría segunda) y el resto de la superficie como de baja vulnerabilidad (categoría tercera). Estas categorías de vulnerabilidad permiten establecer áreas de oferta y demanda en protección contra incendios forestales, estableciendo de forma objetiva una primera aproximación de la valoración de impactos y pérdidas ocasionadas por la propagación del fuego. En general, la investigación sobre los daños socioeconómicos de los incendios forestales ha sido prácticamente nula en Sudamérica, y la aplicación de modelos ya existentes en otros países (Molina *et al*, 2009) resulta complicada debido a las condiciones específicas de los ecosistemas mediterráneos sudamericanos localizados en áreas de interfaz urbano-forestal o a la falta de información de partida confiable para la creación de un modelo integral de vulnerabilidad.

3.4 Un caso especial: el efecto buffer en áreas de interfaz. Desarrollo de un sub-modelo específico.

3.4.1 Introducción

El efecto en la distribución espacial de los incendios forestales atribuible a la red de caminos puede ser estudiado mediante desagregación o tipificación del tipo y calidad de infraestructura, diferenciados o clasificados en una base de datos en el SIG (Burrough, 1989). En todos los casos, las áreas de influencia se definen basadas en la experiencia de expertos, o con la utilización de herramientas de vecindad y distancia (Bonham-Carter, 1994), para la obtención de un valor numérico homogéneo del fenómeno al interior del área analizada, y con el propósito de representar espacialmente las diferencias del objeto en estudio, respecto a áreas no consideradas en el análisis (Chen & Hwang, 1992). No obstante en la práctica, la distribución espacial de incendios en cercanía a caminos no siempre es posible representarla en el GIS mediante definición de distancias homogéneas (buffer). Lo mismo ocurre con el efecto borde en áreas de interfaz urbano-forestal, al no existir una zona completamente delimitada que indique el límite exacto hasta donde se producen los incendios forestales. En este contexto, Kumar & Goel (1994), han reportado la incidencia de la red de caminos, estableciendo distancias promedio. Sin embargo, no existen referencias suficientes respecto a la definición de distancias alrededor de áreas de interfaz, limitándose el análisis exclusivamente a la definición de búferes regulares (Burrough, 1989; Sasikala & Petrou, 2001; Robinson, 2003). En esta sección, se propone determinar el efecto combinado de la influencia de tres factores que participan en la distribución espacial y riesgo frente a los incendios forestales: el factor más común es la influencia de los caminos. Se agrega a este análisis la localización de incendios, y el efecto de la distancia en áreas de interfaz. Para ello, se proponen dos etapas: la primera, consiste en establecer los umbrales o distancias promedio en las cuales el efecto de la densidad de incendios (número de eventos por unidad de superficie) es significativo, y luego de ello, establecer áreas de influencia en torno al gradiente de ocurrencia, en función de la distancia acumulada. Los resultados sin duda pueden mejorarse, pero representan una referencia útil para optar por otro proceso de análisis de vecindad, complementario al

clásico análisis buffer, presentes en los softwares de sistemas de información geográfica.

3.4.2 Materiales y métodos

3.4.2.1 Área de estudio

El área seleccionada corresponde a la Comuna de Valparaíso. En este caso, el área se extiende a una superficie aún mayor (176.000 hectáreas), la que incluye gran parte de las Comunas de Viña del Mar, pertenecientes a la Provincia de Valparaíso de la V Región de Chile. Para efectos de la validación de los resultados obtenidos, se definió un cuadrante de 29.378 has, correspondiente a la ciudad de Quilpue y alrededores (figura 3.4.2.a), cuyos datos relacionados a incendios forestales y las variables que los condicionan, son perfectamente comparables con los fenómenos existentes en el área mayor.

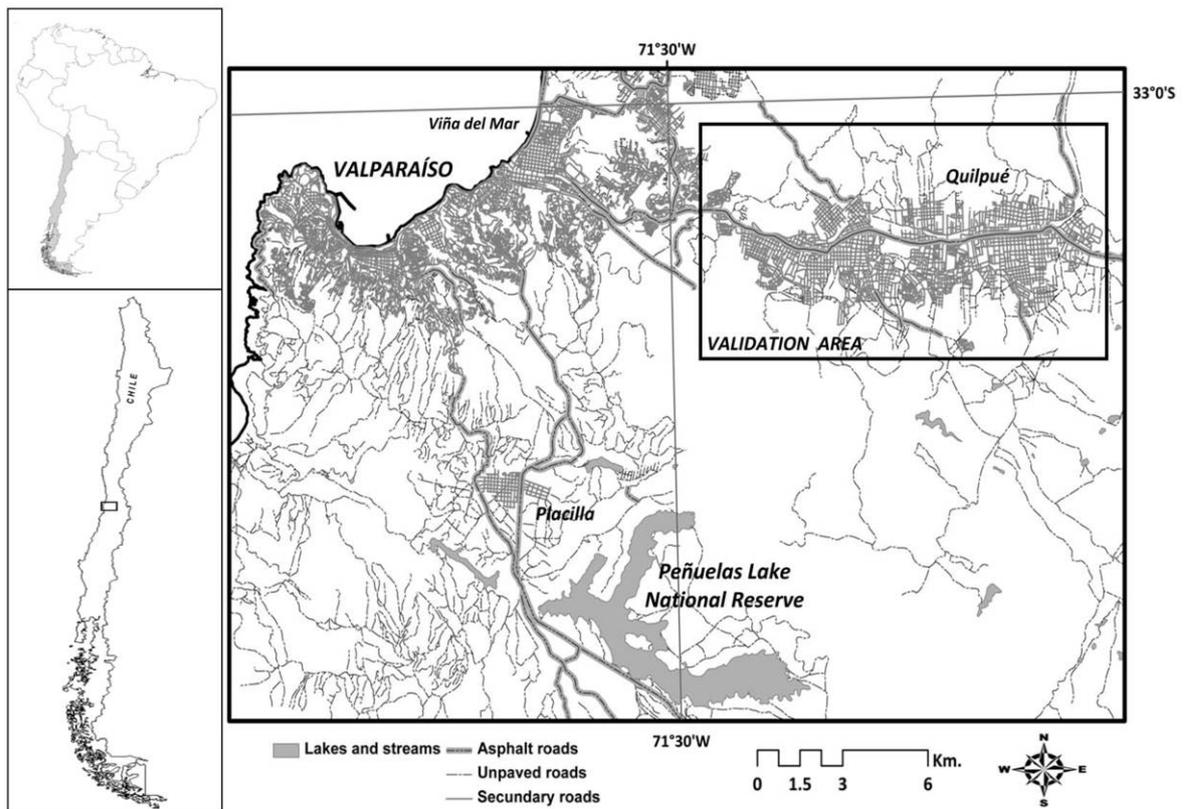


Figura 3.4.2.a.- Área de estudio. Quinta Región de Chile. El cuadro superior de la derecha indica el área en la cual se efectúa la validación estadística de los resultados.

3.4.2.2 Información

Se analizó una base de datos de incendios forestales para el período 1986-2010, procedente de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), y procesadas por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile. En total se incluyeron 13.977 incendios, los cuales fueron analizados en relación a la cercanía a caminos, como un factor de riesgo frente a los incendios forestales. De este total, un 25% (3.499 incendios) fue reservado para efectuar un análisis de comprobación y validación, y que se encuentran dentro del cuadrante descrito en la figura 3.4.2.a. La red de caminos considera una clasificación en tres categorías: carreteras de dos o más vías y doble tránsito, asfalto de dos vías y doble tránsito, y caminos rurales sin asfalto de una vía.

3.4.2.3 Fases del proceso

a) Fase I. Determinación de distancias homogéneas por tipo de caminos

Como primer paso se expresaron todos los registros de incendios en un sistema de información geográfica (SIG), para su representación espacial respecto a los caminos. Posteriormente se establecieron áreas de influencia en torno a cada tipo de vía, considerando las referencias de estudios que proponen búferes con distintos valores en distancia (Rodríguez *et al*, 2010). En este proceso, utilizando los procesos de consulta a la base de datos en el SIG, se contabilizaron todos los incendios que fueron incluidos en cada buffer, estableciendo de esta manera la variación de la frecuencia a medida que se aumenta la distancia hacia la periferia de cada tipo de vía (figura 3.4.2.b), mediante la construcción de histogramas de frecuencia para conocer los puntos críticos en relación a los ejes de caminos. Como resultado de este análisis, se obtuvieron las distancias recomendadas para estudiar la variación espacial de los incendios, de manera de establecer en forma mas objetiva un valor de Buffer que se adecúe a este criterio de zonificación.

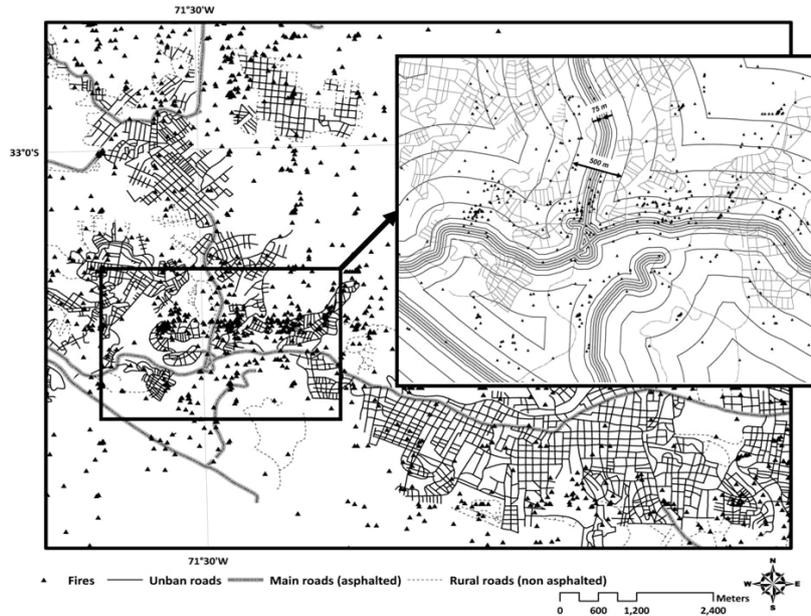


Figura 3.4.2.b.- Proceso de selección de incendios, localizados a distintos valores de distancia a contar de los ejes y por tipo de caminos.

b) Fase II. Determinación de áreas fuzzy

Se aplica un método denominado *Fuzzy*, que consiste en establecer límites graduales entre una categoría de datos y otra que se encuentra localizada en la vecindad local. Funciona a modo de una gradiente borrosa, basado en la definición de funciones de pertenencia a una categoría. Esto se conoce como función de membresía (Burrough, 1989). En esta modalidad existen distintas funciones, la mayoría de ellas aplicadas a estudios de distancias en función de una variable de decisión (x), por ejemplo, la aptitud de un suelo para un tipo de uso, entre otras aplicaciones. Para el caso del modelo de vulnerabilidad expuesto en la sección anterior, puede adaptarse el criterio de “*riesgo*”, incluyendo una nueva modalidad para la ponderación de la variable de “*caminos*”, mediante la aplicación de áreas borrosas fuzzy.

En esta fase, se propone la función $\mu_A(x)$ de membresía, la cual define el grado de pertenencia de una variable, respecto al fenómeno a modelar (Zadeh, 1965; Zhang, 1992; Zimmerman, 1996; Yen, 1999). En este caso, el gradiente fuzzy corresponde al cambio en la densidad de incendios que se produce en áreas cercanas a caminos, principalmente asociadas a zonas de interfaz (Burrough, 1989; Guan, 2004; Iliadis, 2005). En la práctica, y de acuerdo a lo observado en terreno, la mayor concentración de

eventos no siempre ocurre exactamente a orilla de caminos, sino más bien a partir de una distancia, que suele ser variable en función del tipo de vía y de la densidad de ocurrencia. Para ello un primer paso a realizar, es realizar un análisis de frecuencias, de manera de asignar los umbrales o puntos de quiebre (Jenks, 1963) para establecer la función más apropiada. Burrough (1989) sugiere aplicar funciones sigmoideas en caso de gradientes en función de la distancia, mientras que Schmucker (1982) propone establecer funciones J-Shape, decrecientes, especialmente para el estudio de riesgos. Respecto a lo anterior, y considerando las referencias de estudios anteriores respecto a la evaluación del riesgo de incendios, se optó por definir una función sigmoidea (Thole *et al*, 1979), con parámetros a , b , c determinados en función de la distancia de cada foco del incendio respecto a los tipos de caminos. Un esquema de la metodología aplicada se ilustra en la figura 3.4.2.c.

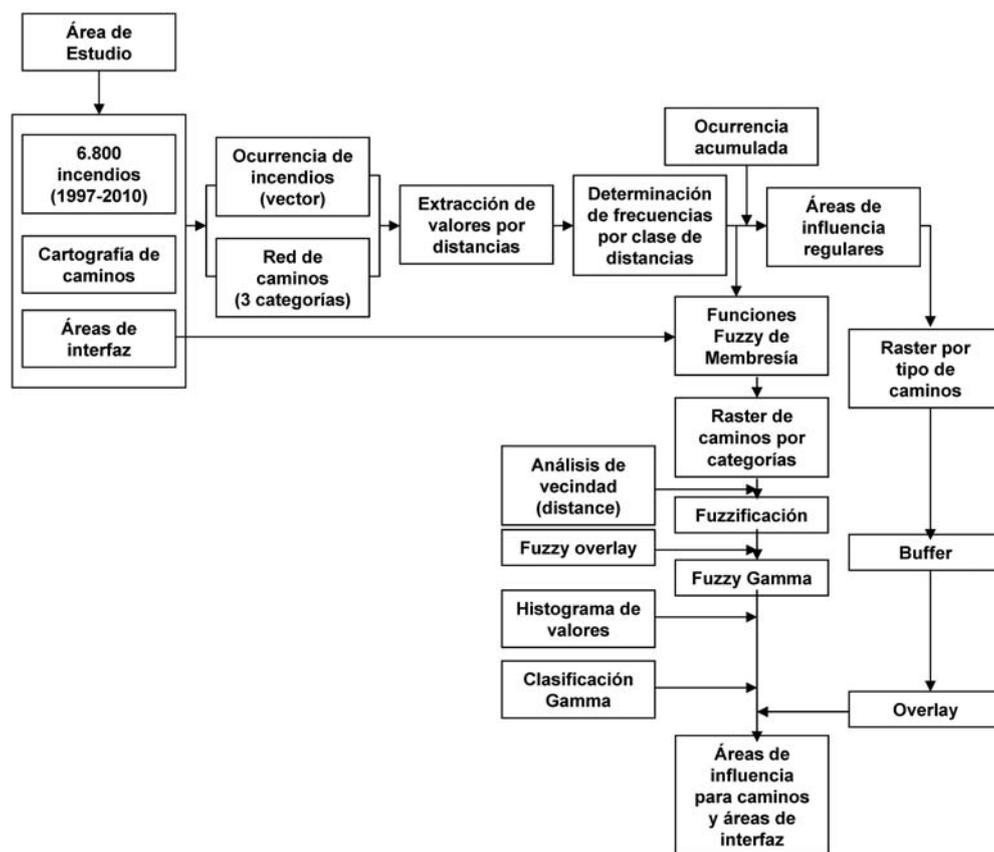


Figura 3.4.2.c.- Esquema de la metodología propuesta.

Para el cálculo de parámetros fuzzy se utilizaron las funciones raster de Idrisi Andes©, particularmente la de cálculo de distancias, mientras que para el análisis de vecindad e intersección de las áreas con incendios se utilizó ArcGis 9.1®, junto con la construcción

de una aplicación en Phyton®, cuyo propósito fue contabilizar intersecciones de incendios que están presentes a lo largo del recorrido de la función $\mu_A(x)$. La función utilizada fue una sigmoídea monótonamente decreciente, tal como se ilustra en el gráfico 3.4.2.a.

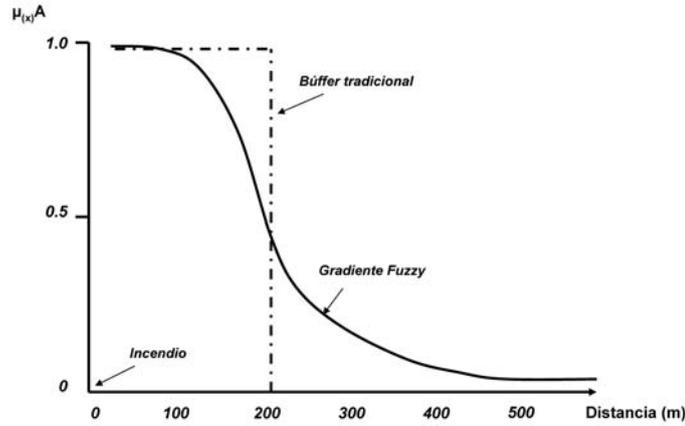


Gráfico 3.4.2.a.- Función sigmoídea monótonamente decreciente para la modelación de densidad de incendios en torno a caminos.

La literatura especializada contempla entre sus estudios la elección de este tipo de función respecto a otras como J-Shape o de Gauss (Bellman & Zadeh, 1970; Dubois & Prade, 1979; Guan, 2004; Iliadis *et al*, 2008;), principalmente porque la función sigmoídea es capaz de representar de mejor manera el cambio gradual en torno a capas vectoriales (Gill & Bector, 1997; Yanar & Akyurek, 2006) – en este caso la red de caminos – y cuya interpretación depende de otras variables explicativas, en este caso, los incendios que se producen en el entorno fuzzy.

Utilizando un tamaño de celdilla de 25 x 25 metros (recomendable para la escala de análisis de la información), se crearon las capas de información descritas en la figura 3, para posterior análisis del valor Fuzzy. El rango admisible para $\mu_A(x)$ contempla el intervalo [0,1] (Schmucker, 1982; Ahmed *et al*, 2000; Duprey & Taheri, 2010), en cuyo caso se determinó la vecindad o distancia admisible (píxeles) sobre la cual los valores se mueven en este rango. El raster generado del análisis fue combinado con el de cercanía a caminos, de manera de combinar ambas capas de información con álgebra de mapas, mediante el overlay difuso:

$$\mu_A(x) = \prod_{i=1}^n \mu_i \tag{1}$$

Donde μ representa la capa raster del criterio i , en la vecindad de $\mu_A(x)$. La intersección de criterios, tanto de distancias como por tipo de caminos, se obtiene calculando el complemento para la función sigmoídea:

$$\mu_A(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (2)$$

De esta manera se aplica en el SIG el overlay difuso utilizando el operador *Fuzzy Gamma* (Schmucker, 1982; Cox, 2005; Wang *et al*, 2006), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\mu_A(x) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right\}^\delta * \left\{ \prod_{i=1}^n \mu_i \right\}^{1-\delta} \quad (3)$$

Donde n corresponde a las capas raster de información, y δ un coeficiente con valores entre 0 y 1. Normalmente este número cuantifica entre valores de 0,5 a 0,8 para lograr el efecto combinado entre suma y producto gamma, expresado como:

$$\mu(x) = \cos^2 \alpha \quad (4)$$

Siendo $\mu(x)$ una función monótonamente decreciente. De este modo, los valores en torno al recorrido de la función corresponden a:

$$\alpha = \frac{x-c}{d-c} * \frac{\pi}{2}, \text{ cuando } x < c; \mu=1 \quad (5)$$

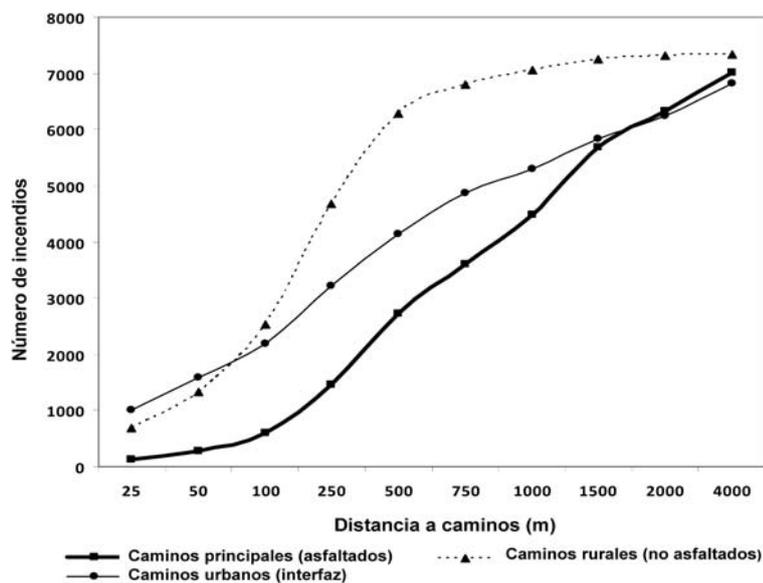
En la expresión anterior, x es el dominio de la función pertenencia, que representa la variación de la densidad de incendios conforme aumenta la distancia desde los caminos. El valor c representa la máxima densidad (umbral superior de pertenencia a la función fuzzy), la cual comienza a disminuir desde el umbral d , monótonamente decreciente a medida que se produce el alejamiento de las zonas con interfaz urbano-forestal. La variable π^2 representa el período u oscilación de la función matemática, que alcanza un valor de 1 , cuando se alcanza la máxima pertenencia fuzzy.

3.4.3 Resultados

a) Análisis de distancias

Como resultado de los pasos descritos en la figura 3.4.2.c, se aplicaron los criterios de selección de registros en el SIG, y que corresponden a incendios cuyos focos se encuentran localizados a orilla de caminos. Se obtuvieron similares valores entre distinto tipo de categoría de vías, extendiéndose el efecto en las carreteras de dos o más vías, especialmente en áreas de interfaz. Este primer análisis confirma los valores reportados por Rodríguez *et al*, (2010), en el sentido de recomendar la definición de bufferes o áreas de influencia en torno a 500 metros para carreteras, con valores levemente decrecientes a 250 y 750 metros; 250 metros para caminos de tipo rural sin asfalto, con valores decrecientes localizados a 100 y 500 metros. Por último, en caminos asfaltados localizados en pueblos y áreas urbanas de interfaz, los valores recomendables para buffer son de 150 metros, considerando 100 y 300 metros como valores vecinos. Una representación de la variación acumulada de incendios respecto a las distancias de caminos se presenta en el gráfico 3.4.3.a.

Gráfico 3.4.3.a.- Variación del número de incendios en función de distancias a partir de los ejes de caminos.



b) Aplicación fuzzy

Los valores antes obtenidos fueron procesados mediante operadores de vecindad y distancia fuzzy utilizando IDRISI Andes©, utilizando como vector de entrada los

caminos. El resultado fue una capa raster sobre la cual se extrajeron los valores de la función de membresía, para su asociación con la frecuencia de incendios y las distancias respecto a cada tipo de camino (ver gráficos 3.4.3.b, a 3.4.3.d).

Gráfico 3.4.3.b.- Valores fuzzy de membresía respecto a carreteras.

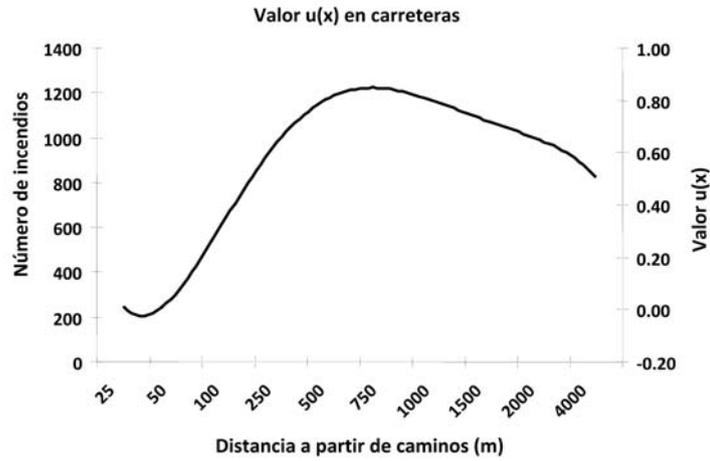


Gráfico 3.4.3.c.- Valores fuzzy de membresía respecto a caminos urbanos en áreas de interfaz.

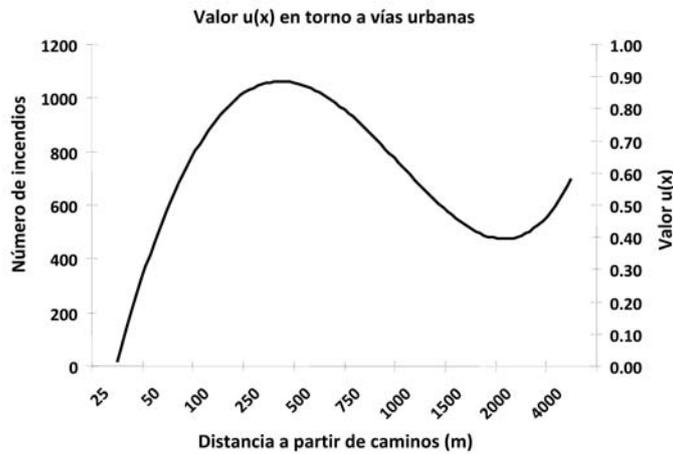
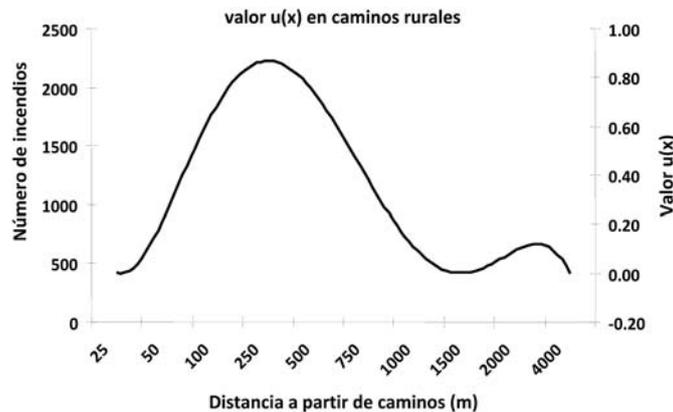


Gráfico 3.4.3.d.- Valores fuzzy de membresía respecto a caminos rurales.



El recorrido de la función $\mu(x)$ en cada caso, depende fuertemente de la concentración de incendios que varía en función de la distancia a los caminos, y en consecuencia, de la localización de las principales áreas de interfaz, que han sido reportadas como una variable explicativa fundamental en la existencia de incendios (Marzano *et al*, 1998; Vakalis *et al*, 2004; Keramitsoglou *et al*, 2004; Julio, 2007; Rodríguez y Silva *et al*, 2010). No obstante $\mu(x)$ no sigue un patrón espacial homogéneo en la trayectoria para cada tipo de red vial. Ello es lógico pues se atribuyen otros efectos en la concentración de incendios, típicos de un análisis espacial de riesgo (Julio, 2007), pues intervienen otros factores tales como localización de centros poblados y las actividades agrícolas y forestales en el área de influencia directa. En todos los casos reportados, existe una correspondencia espacial respecto a las áreas calificadas de alto riesgo de incendios (Chuvieco *et al*, 2003; Rodríguez y Silva *et al*, 2010; Bonazountas *et al*, 2005), basada en métodos multicriterios (Burrough, 1989) que consideran como principales variables, las consideradas en la función sigmoídea fuzzy aquí propuesta.

Considerando estos valores, se obtuvieron los parámetros a , b y c de la función de membresía $\alpha = \{(x-c) \cdot \{d-c\}^{-1} \{\pi/2\}\}$, estableciendo como umbral c , los valores de 250 y 750, monótonamente decreciente a partir de $\mu=1$. El resultado obtenido es un mapa raster con valores $[0,1]$, en donde se verifica que los mayores valores fuzzy no necesariamente se concentran en los ejes mismos de caminos, sino mas bien, en áreas de interfaz con alta densidad de incendios (figura 3.4.3.a). Este resultado contrasta con el criterio tradicional de buffer lineal respecto a un valor de distancia determinado, que sólo logra modelar un efecto promedio en la interfaz asociada a caminos, en donde justamente los niveles de riesgo y peligro de incendios forestales, son más elevados.

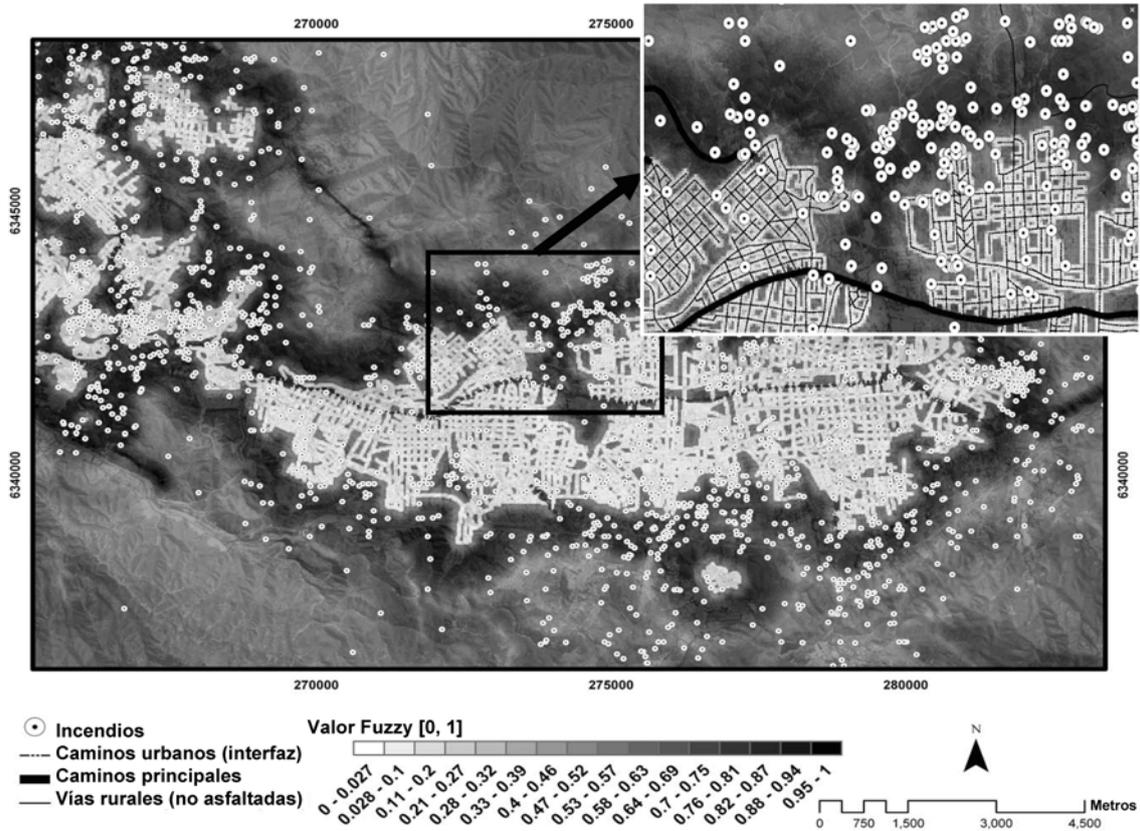
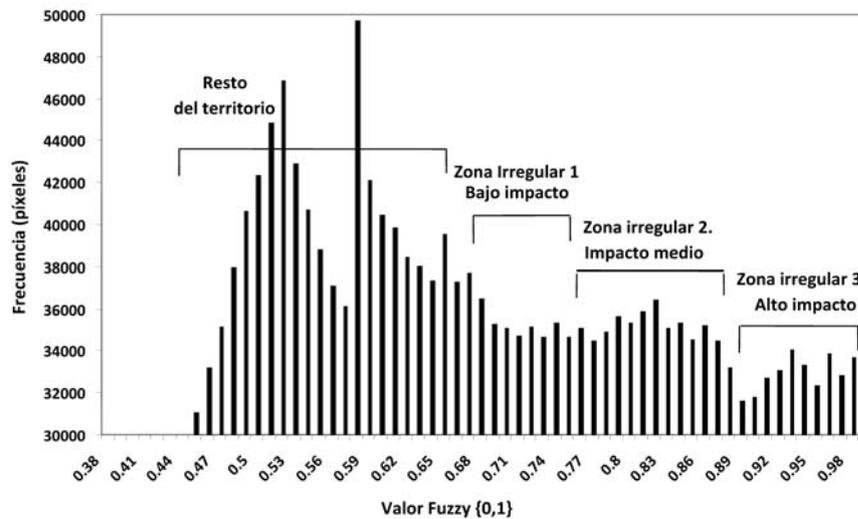


Figura 3.4.3.a.- Efecto de la función sigmoidea Fuzzy en torno a caminos. Se destacan las áreas de interfaz y mayor concentración de valores en torno a los incendios. La diferencia con un buffer normal, es que las áreas son irregulares.

c) Ajuste a gamma fuzzy

Sobre la base de estos resultados, se aplicó Fuzzy Gamma, con el fin de ponderar las capas de caminos en raster (carreteras, calles urbanas y caminos sin asfaltar), junto con el gradiente de la función sigmoidea vinculada al análisis de distancias a partir de ejes, en las áreas de interfaz con gran concentración de incendios. El resultado corresponde una capa que integra estos criterios y permite establecer el histograma de valores fuzzy (gráfico 3.4.3.e), el cual entrega la gama de valores entre 0 y 1. Se aplicó la reclasificación de píxeles de Jenks (16 categorías), (Jenks, 1963; Tahsin & Zuhail, 2006), con el objetivo de identificar y separar, aquellos valores que correspondieran al área fuzzy de influencia descrita en la figura 3.4.2.c. Como estas áreas son irregulares, se analizó los máximos quiebres del histograma, dando como resultado tres categorías de vulnerabilidad: baja-media-alta, con umbrales fuzzy de 0,69 – 0,76 y 0,89 respectivamente (Figura 3.4.3.b).

Gráfico 3.4.3.e.- Histograma de valores Fuzzy, en donde se muestran los valores de corte para el proceso de reclasificación.



La concentración de valores descrita en el gráfico 3.4.2.f, corresponde principalmente a áreas en donde la ocurrencia de incendios forestales se encuentra asociada a zonas de interfaz urbano-forestal, tal como se demuestra en los estudios realizados por Rodríguez y Silva *et al*, (2010). Las áreas determinadas por Fuzzy Gamma consideran el efecto combinado de los factores antes señalados, permitiendo obtener áreas con distinta geometría, que el obtenido mediante asignación de distancias homogéneas mediante un buffer en el GIS.

Las áreas irregulares reclasificadas, fueron asociadas a niveles de impacto, de acuerdo a los antecedentes reportados en Castillo (2006), y Rodríguez y Silva *et al*, (2010), respecto a las áreas de riesgo y peligro contra incendios forestales. Como resultado de esta agrupación de valores, se obtiene un mapa que representa aquellas áreas en donde la recurrencia e impactos generados por el paso del fuego, es considerablemente mayor respecto a áreas más alejadas.

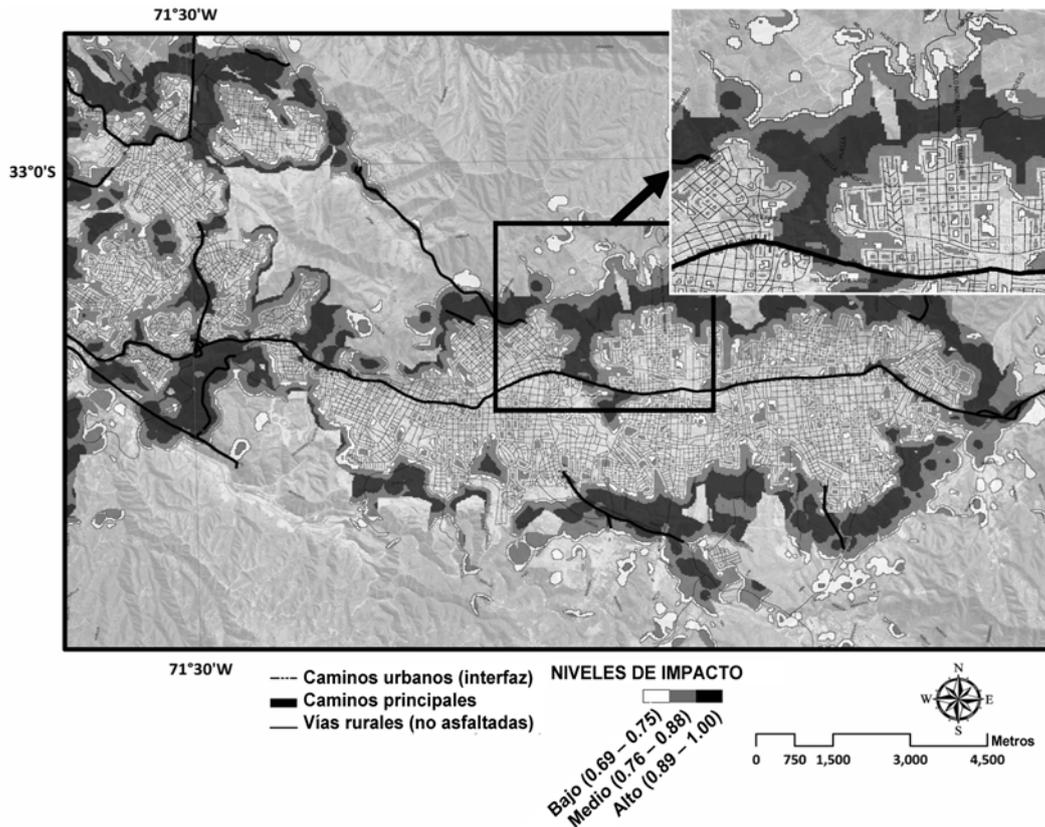


Figura 3.4.3.b.- Mapa fuzzy para el área de validación de resultados. Se muestran los valores de impacto clasificados en tres categorías, de acuerdo a antecedentes disponibles sobre número de incendios, localización y niveles de gravedad. Los valores buffer no adoptan la clásica figura homogénea obtenida de un análisis de distancias con valores fijos, y que los niveles de mayor impacto rodean a otros de menor gravedad, localizados en áreas de interfaz.

3.4.4 Validación y discusión

Se consideró el área de validación y comparación de resultados, indicada en la figura 3.4.2.a., y en cuyo interior se localizan 3.499 incendios, que corresponden al 25% del total del territorio. De esta cantidad de incendios, se compararon los resultados obtenidos entre la aplicación de buffer tradicional, con valores reportados por Rodríguez *et al*, (2010) para este tipo de estudios, y los obtenidos mediante fuzzy gamma para las áreas calificadas con distintos niveles de impacto (figuras 3.4.4.a y 3.4.4.b). Como indicadores de validación se utilizaron el número de incendios por áreas de influencia, la densidad (número de incendios ocurridos en un área de 1 km², y aspectos relacionados a niveles de alerta, como un indicador de comparación entre ambos métodos.

Cuadro 3.4.4.a.- Características de los incendios al interior del área de validación, mediante fuzzy-gamma.

| Nivel de impacto | Área (ha) | Incendios | Densidad de incendios** | Niveles de alerta* | | | Incendios ≥ 10 ha |
|------------------|-----------|-----------|-------------------------|--------------------|----------|------|-------------------|
| | | | | Normal | Amarilla | Roja | |
| 1 (bajo) | 1.411,02 | 167 | 11,83 | 160 | 3 | 4 | 8 |
| 2 (medio) | 2.587,09 | 750 | 28,99 | 721 | 7 | 22 | 24 |
| 3 (alto) | 2.365,87 | 1.153 | 48,73 | 1.120 | 5 | 28 | 18 |

*Niveles de gravedad y prioridad definidos por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de Chile, para calificar y programar la asignación de recursos para el combate y los mecanismos de coordinación con otras agencias para la protección contra incendios forestales.

**Número de incendios presentes en un área de 1 km².

El cuadro anterior muestra los antecedentes básicos a considerar para comparar los resultados con la aplicación de lógica fuzzy, respecto a los valores posibles de obtener mediante aplicación de áreas buffer con valores fijos (anillos de ancho constante). Los niveles de impacto presentes en el cuadro 1, recogen una alta proporción de incendios que fueron calificados de alerta medio (amarilla) a alta (rojo o nivel máximo de gravedad), para el cuadrante considerado para la validación. En el cuadro 3.4.4.b., se expone una comparación con los resultados obtenidos con la aplicación de buffer tradicional.

Cuadro 3.4.4.b.- Calificación y densidad de incendios al interior de áreas con buffer regular.

| Id* | Buffer ** | Área (ha)*** | Incendios **** | Densidad de incendios | Niveles de alerta | | | Incendios ≥ 10 ha | Niveles de impacto | | |
|-----|-----------|--------------|----------------|-----------------------|-------------------|----------|------|-------------------|--------------------|-------|------|
| | | | | | Normal | Amarilla | Roja | | Bajo | Medio | Alto |
| 1 | 500 | 6.292,66 | 1.104 | 17,54 | 1.079 | 9 | 16 | 16 | 42 | 216 | 504 |
| 2 | 150 | 6.501,49 | 1.134 | 17,44 | 1.115 | 7 | 12 | 9 | 0 | 404 | 144 |
| 3 | 250 | 7.658,26 | 1.060 | 13,84 | 1.027 | 9 | 24 | 28 | 144 | 124 | 694 |

*1: carreteras principales asfaltadas, dos o más vías. 2: caminos urbanos asfaltados una o dos vías. 3: caminos rurales con/sin asfalto, una vía/dos vías.

** valores asignados de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis inicial de distancias.

*** valores calculados considerando el descuento buffers más pequeños (suma acumulada).

**** valores calculados descontando el valor acumulado procedente de los buffers más pequeños.

Un análisis comparativo entre los datos de los cuadros 3.4.4.a y 3.4.4.b, permite establecer que existen diferencias entre los valores de densidad de incendios para los niveles de baja gravedad o impacto. La aplicación de valores homogéneos de buffer da como resultado una mayor intersección de incendios (dato útil para el análisis geográfico de riesgo potencial) asociado a carreteras de dos o más vías (densidad de 17,54), que la densidad obtenida de fuzzy gamma (11,83). No obstante, respecto a los valores de densidad más relevantes asociados a las áreas de mayor prioridad e impacto, los valores gamma son superiores en 28,99 para el nivel de impacto 2 (17,44 en buffer tradicional), y 48,73 en nivel de impacto 3 (13,84 en buffer tradicional), lo que significa

una mejoría en los resultados en +66,02% y +252,09%, respectivamente, considerando que en estas áreas se concentra el mayor problema histórico generado por los incendios forestales, y porque sus valores se concentran en áreas mucho menores, lo que implica la posibilidad de mejorar la eficiencia en la asignación económica de corredores para la protección. Además, este análisis comparativo posee la ventaja que considera todos los tipos de caminos, no acotando los resultados al análisis por tipo de vías, error usual que se comete por sobreestimar el efecto de búferes en áreas de sobreposición.

Otro aspecto que reporta diferencias entre ambos métodos y respalda la conveniencia de optar por fuzzy, es la cantidad total de incendios en alerta roja (incendios de extrema gravedad) posibles de capturar en estas áreas. Fuzzy gamma obtiene mejores resultados que en búffer tradicional, por presentar mayor cantidad de datos en una menor superficie (6.393, 98 ha versus 20.452,41 ha en buffer tradicional), lo que significa una mejora en la precisión de los cálculos. Lo mismo ocurre al contabilizar la cantidad de incendios con superficies mayores a 10 hectáreas. Los nuevos cálculos de áreas de influencia capturan mayor cantidad de incendios en menor superficie. En el cuadro 3.4.4.c., se efectúa una comparación de los resultados considerando el cruce entre tipo de caminos, y niveles de alerta.

Cuadro 3.4.4.c.- Número de incendios contabilizados por niveles de alerta en cada zona de impacto y tipo de caminos.

| Id | Incendios | Densidad de incendios* | Número de alertas en zonas de impacto (fuzzy gamma) | | | | | | | | |
|----|-----------|------------------------------|---|----------|------|--------|----------|------|--------|----------|------|
| | | | Alto | | | Medio | | | Bajo | | |
| | | | Normal | Amarilla | Roja | Normal | Amarilla | Roja | Normal | Amarilla | Roja |
| 1 | 762 | 12,11 | 491 | 2 | 11 | 210 | 2 | 4 | 40 | 2 | 0 |
| 2 | 548 | 8,43 | 141 | 1 | 2 | 395 | 3 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 962 | 12,56 | 682 | 3 | 9 | 114 | 2 | 8 | 138 | 2 | 4 |

* valor calculado entre el número total de incendios en zonas de impacto, presentes en las áreas buffer para los tres tipos de caminos.

Desde el punto de vista de la clasificación de caminos, las diferencias entre buffer tradicional y fuzzy gamma son aún mayores. Es posible capturar una mayor proporción de incendios en menor superficie, especialmente los más graves, mientras que la suma total de datos para todas las categorías de alto impacto en incendios graves es también mayor (50 incendios en fuzzy gamma y 40 incendios en buffer homogéneo).

El método aquí descrito para el cálculo de áreas de influencia, también aporta antecedentes respecto a localización de áreas críticas, similar a lo reportado por Iliadis *et al*, (2010) al estudiar el efecto clúster mediante algoritmos fuzzy de clústeres, y Pieczyński & Obuchowicz (2004) mediante la función general *gaussian membership function*. Nadeau & Englefield (2006) estudian efectos similares a esta investigación, pero en el ámbito de la vegetación, mediante la aplicación de fuzzy-sets para estimar mapas de wildfire fuel types para Canadá. Por otra parte, Kahraman *et al*, (2003) aplican análisis multicriterio fuzzy para el cálculo de áreas aptas para ciertos objetivos, en donde se consideran análisis de vecindad, del mismo modo que Sadiq & Hussain (2005), Tangestani (2004), Tsatalzinos (2007), Tsatalzinos *et al*, (2009), y Vadrevu & Eaturu (2010), mediante la aplicación de fuzzy gamma para la estimación de riesgo de incendios forestales.

3.4.5 Conclusiones del método

Estos resultados permiten establecer que este método otorga mayores antecedentes respecto a una definición más detallada de áreas de influencia, usualmente creadas en softwares de sistemas de información geográfica, y porque además, considera no sólo la variable de caminos como parámetro de entrada, sino además el número, densidad y localización de incendios. Por esta razón, es útil la consideración de un mayor número de variables explicativas para el cálculo de áreas de influencia, al permitir estimar de mejor manera, el efecto del riesgo y peligro de incendios en áreas de interfaz. En la práctica, la geometría regular de los anillos o búferes de protección no siempre representan las mejores áreas para concentrar los recursos para la vigilancia. Por esta razón, la metodología puede aportar mejores estimaciones en la construcción de modelos multicriterio basados en fuzzy a través de un GIS, en el cual es posible asignar pesos relativos a las variables que aportan información al cálculo de estas áreas.

Esta modificación al esquema tradicional de cálculo de áreas de influencia, abre la posibilidad de ahorrar gastos en protección para áreas con exceso de vigilancia, como también en poder minimizar los severos daños y efectos que usualmente se producen en el comportamiento del fuego, especialmente en áreas de interfaz.

Se recomienda seguir investigando en este tipo de estudios, con énfasis en zonas de interfaz. Para los nuevos procesos de cálculo basados en lógica fuzzy, es deseable la inclusión de otros parámetros al modelo, tal como las características de los combustibles forestales que inciden directamente en el peligro de la propagación del fuego y en sus niveles de intensidad.

Por los antecedentes de investigaciones en el área del riesgo de incendios, generalmente las áreas irregulares de peligro son una respuesta al tamaño y forma de los ejes de crecimiento urbano en áreas de interfaz, y en mayor medida, a efecto combinado de los caminos con las características de la vegetación combustible.

En futuras investigaciones, estos resultados podrían aportar además, para el efecto espacial de las causas que originan los incendios, especialmente en aquellas áreas en donde la acción humana reporta la mayor cantidad de daños ocasionados por los efectos de la propagación de fuego. Por último, uno de los aspectos más relevantes en donde puede ser útil la aplicación de este método fuzzy, es en el cálculo de áreas críticas para efectuar trabajos en prevención de incendios y manejo de la vegetación combustible, dado que son actividades que en la práctica, necesitan muchos recursos económicos dentro de un programa integrado de protección contra incendios forestales.

3.5 Conclusiones

3.5.1 Modelo de vulnerabilidad

La aplicación del modelo de vulnerabilidad económica en Chile constituye un modelo objetivo de referencia para la priorización de actuaciones de mitigación contra incendios forestales, aún cuando se conoce la falta de información sobre pérdidas económicas y la limitación del componente de daño potencial, que únicamente incorpora los daños directos. El modelo implantado mediante un GIS puede ser fácilmente adaptado al resto de ecosistemas mediterráneos de Sudamérica, donde se presenten problemas de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal debido a la alta densidad de incendios, principalmente de causa humana.

El modelo de vulnerabilidad es totalmente flexible en cuanto a la falta de información para alguna de las variables o la inclusión de nuevas variables, y el criterio con el cual se analizará esta información y su validación estadística. La fiabilidad del modelo, especialmente en los componentes de Riesgo y Peligro, necesariamente deben ser evaluados periódicamente mediante comprobaciones estadísticas de la muestra en estudio, aún cuando la experiencia indica que el tipo de problemas ocasionados por los incendios forestales, tienden a concentrarse en los mismos lugares, variando su tamaño y forma, dependiendo de la dinámica de crecimiento de la población, especialmente en áreas de interfaz urbano-forestal.

3.5.2 Método para el cálculo de áreas de influencia

El método utilizado para la estimación de áreas de influencia en zonas de interfaz, es una variante factible de utilizar e integrar en el modelo de vulnerabilidad descrito en este capítulo. Los efectos espaciales que se derivan del proceso de cálculo, considerando no sólo la distancia a caminos sino que además la localización de incendios en interfaz, proporciona antecedentes más cercanos a la realidad.

Por lo anterior, se plantea la opción de utilizar este método no sólo para el cálculo de áreas de influencia, sino también para ponderar el efecto local de los incendios en las áreas de riesgo y peligro, que se encuentran planteados en el método de Prioridades de Protección (Julio, 1992), y en los resultados presentados en Rodríguez y Silva *et al*, (2010).

3.5.3 Comentarios finales

En este capítulo se desea expresar los agradecimientos al proyecto “Aplicación y adaptación del modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia Valparaíso, Chile” (A/017536/08), financiado por la Agencia Española para la Cooperación Internacional y el Desarrollo (AECID) – Programa de Cooperación Interuniversitaria e Investigación Científica entre España e Iberoamérica, y ejecutado por la Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería Forestal, y la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de

la Naturaleza. Especial reconocimiento para la Unidad de Manejo del Fuego de la Corporación Nacional Forestal, V Región de Chile.

3.6 Referencias

- Ahmed T, Rao K, Murthy J. 2000. GIS based fuzzy membership model for cropland suitability analysis. *Agricultural Systems*, (63): 75-95.
- Ashe B.S., McAneney J, Pitman A.J. 2007. The cost of fire in Australia. Cost of Fire Conference, Sydney, 29-30 may.
- Bellman R, Zadeh L. 1970. Decision making in a fuzzy environment. *Management Scientia*, (17): 141-164.
- Bonazountas M, Kallidromitou D, Kassomenos P. 2005. Fire risk analysis. *Human and Ecological Risk Assessment*, (11): 617-626.
- Bonham-Carter G.F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon press, 398 pp.
- Burrough P. 1989. Fuzzy Mathematical Methods for Survey and Land Evaluation. *Journal of Soil Science*, (40): 477-492.
- Castillo M. 1998. Método de Validación para el Simulador de Incendios Forestales del Sistema KITRAL. Memoria de Título. Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. 123p.
- Castillo M, Rodríguez y Silva F, Molina J. 2010. Situación de los incendios forestales de vegetación nativa en la Provincia de Valparaíso. Chile Central. *Geographicalia* (56): 89-110.
- Cox E. 2005. Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration. Elsevier Inc., USA.
- CONAF-CONAMA-BIRF 1999. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile – Informe Regional V Región. Contempo Gráfica. Santiago. 102 p.
- Chen S, Hwang C. 1992. Fuzzy multiple attribute decision-making. Berlin: Springer.
- Chuvieco E, Allgower B, Salas J. 2003. Integration of physical and human factors in fire danger assessment. In: “Wild land fire danger estimation and mapping. The role of remote sensing data”. New Jersey: World Scientific.
- Chuvieco E, Aguado I, Yebra M, Nieto H, Salas J, Martín M, Vilar L, Martínez J, Martín S, Ibarra P, de la Riva J, Baeza J, Rodríguez y Silva F, Molina J, Herrera M, Zamora R. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, (221):1. 46-58.
- CONAF-CONAMA-BIRF 1999. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile – Informe Regional V Región. Contempo Gráfica. Santiago. 102 p.
- Davis J.B. 1990. The wildland-urban interface: paradise or battleground?. *Journal of Forestry*. 88(1): 26-31.
- DIMECHI (Dirección Meteorológica de Chile) 2005. Antecedentes Estadísticos de Precipitaciones y Temperaturas para las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar. Informe Interno del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Santiago.
- Dubois D, Prade M. 1979. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York: Academic Press.
- Duprey B, Taheri S. 2010. A Fuzzy Based Stability Index Using a Right Sigmoid Membership Function SAE. *International Journal of Commercial Vehicles* 2(2).

- Fengel D, Wegener G. 1984. Word Chemistry-Ultrastructure Reaction. Walter de Gruyer. Berlin. 422 p.
- Gilchrist J, Toral M. 2007. Plan de Manejo Forestal. Reserva Forestal Lago Peñuelas. Región de Valparaíso. Universidad de Chile-Corporación Nacional Forestal. 92 p.
- Gill A, Bector C.R. 1997. A fuzzy linguistic approach to data quantification and construction of distance measures for the part family formation problem. *International Journal of Production Research*, 1366-1388, 35(9): 2565 – 2578.
- Guan W. 2004. Comprehensive fuzzy evaluation on forestry fire-danger scale. *Forest Engineering*, (20)3:17-29.
- Handmer J, Fisher S, Ganewatta G, Haywood A, Robson D, Thornton R, Wright L. 2008. The cost of fire now and in 2020. Voluntary work. Australia. Australian Bureau of Statistics, Canberra. Catalogue n°4441.0.
- Hornsmann E. 1961. Pérdidas de Bosques por Incendios Forestales. Revista Forestal Alemana. Hamburgo. 10 p.
- Iliadis L, Vangeloudha M, Spartalis S. 2010. An intelligent system employing an enhanced fuzzy c-means clustering model: Application in the case of forest fires. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(2): 276-284.
- Iliadis L, Spartalis S, Tachos S. 2008. Application of fuzzy T-norms towards Artificial Neural Networks evaluation: A case from wood industry. *Journal Information Sciences, Informatics and Computer Science Intelligent Systems Applications* 178(20): 3828–3839.
- Iliadis L. 2005. A decision support system applying an integrated Fuzzy model for long – term forest fire risk estimation. *Environmental Modeling and Software* 20(5): 613–621.
- Institute for Business and Home Safety. (IBHS) 2004. Wildfire—protect your home against wildfire damage. <http://www.ibhs.org/publications/view.asp?id=125>.
- INSTITUTO FORESTAL, INFOR 2009. [http:// www.infor.cl](http://www.infor.cl)_ Rendimiento de plantaciones forestales. Consulta Agosto 2008
- Jenks G.F. 1963. Generalization in Statistical Mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, (53): 15–26.
- Julio G, Aguilera R, Pedernera P. 1997. The Kitral System. Proc. International Workshop on Strategic Fire Planning Systems. USDA Forest Service, Fire Research Lab., Riverside, California. 100 p.
- Julio G. 1992. Método de Determinación de Prioridades de Protección. Universidad de Chile, Escuela de Ciencias Forestales, Manual Docente N° 10. Santiago. 28 p.
- Julio G. 2007. Formulación de Lineamientos Políticos y Estratégicos para la Protección contra Incendios Forestales en Chile. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España. 341 p.
- Kahraman C, Ruan D, Dogan I. 2003. Fuzzy group decision-making for facility location selection. *Information Sciences*, (157) : 135-153.
- Keramitsoglou I, Kiranoudis C, Sarimveis H, Sifakis N. 2004. A Multidisciplinary Decision Support System for Forest Fire Crisis Management. *Environmental Management*, (33)2: 212–225.
- Kannegiesser U. 1987. Evaluación de biomasa y boldina en boldo (*Peumus boldus*) VI Región. Escuela de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 97p
- Koslowski T, Algren C. 1974. Fire and Ecosystems. Academic Press N.York. 542 p.
- Kumar S, Goel S. 1994. Fuzzy sets in urban design. *International Journal of Systems Science*, 25(11): 1727 – 1741.

- Marutzky R, Roffael E. 1977. Inorganic Components. *Holz-Zentralblatt*, 103(28):424. Hamburg.
- Marzano R, Camia A, Bovio G. 1998. Wildland-Urban Interface Analyses for Fire Management Planning. Proceedings of the Second International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: A Global View. 311-318.
- Molina J.R, Rodríguez y Silva F, Herrera M, Zamora R. 2009. A Simulation Tool for Socio-Economic Planning on Forest Fire Supresión Management. En: Forest Fires: Detection, Suppression and Prevention. Capítulo 2. pp. 33-88. Nova Science Publishers, Inc. New York.
- Nadeau L, Englefield P. 2006. Fine-resolution mapping of wildfire fuel types for Canada: Fuzzy logic modelling for an Alberta pilot area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120, 127-152.
- Oficina de Planificación Agrícola, ODEPA. 2009. <http://www.odepa.cl> Precios Agrícolas. Consulta Agosto 2010.
- Pedernera P. 1999. Estudio de la ocurrencia y causalidad de incendios forestales en las Comunas de Valparaíso de Viña del Mar. Quinta Región de Chile. Informe técnico de circulación interna. Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Chile. 45p.
- Pieczynski A, Obuchowicz A. 2004. Application of the General Gaussian Membership Function for the Fuzzy Model Parameters Tunning. In: Rutkowski, L., Siekmann, J.H., Tadeusiewicz, R., Zadeh, L.A. (eds.) ICAISC 2004. LNCS (LNAI), (3070): 350–355.
- Radeloff V, Hammer R, Voss P, Hagen A, Field D, Mladenoff D. 2001. Human demographic trends and landscape level forest management in the Northwest Wisconsin Pine Barrens. *Forest Science* 47 (2), 229-241.
- Robinson V. 2003. A perspective on the fundamentals of Fuzzy sets and their use in geographic information systems. *Transactions in GIS*, (7): 3-30.
- Rodríguez y Silva F. 2004. Desarrollo de un Modelo para la Evaluación Económica de los Planes de Defensa contra Incendios Forestales en Ecosistemas Forestales Mediterráneos. Actas II Simposio Internacional sobre Política, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra Incendios Forestales. Córdoba, España. 11 p.
- Rodríguez y Silva F. 2009. Planes de Defensa en España – Procedimientos y Metodología para la Elaboración. In: Vélez, R., La defensa contra Incendios Forestales – Fundamentos y Experiencias. Segunda Edición. McGraw Hill. Madrid. Pág.289-322.
- Rodríguez y Silva F, Julio G, Castillo M, Molina J, Herrera M, Toral M, Cerda C, González L. 2010. Aplicación y adaptación del modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 51p.
- Rodríguez y Silva F, González-Cabán A. 2010. ‘SINAMI’: a tool for the economic evaluation of forest fire management programs in mediterranean ecosystems. *International Journal of Wildland Fire* (19): 927-936.
- Sadiq R, Hussain T. 2005. A fuzzy-based methodology for aggregative environmental risk assessment: A case study of drilling waste. *Environmental Modelling & Software*, (20): 33-46.
- Sasikala K, Petrou M. 2001. Generalized fuzzy aggregation in estimating the risk of desertification of a burned forest. *Fuzzy Sets and Systems*, (118): 121-137.

- Schmucker K.J. 1982. Fuzzy Sets, Natural Language Computations and Risk Analysis (New York: Computer Science Press).
- Sociedad Química y Minera de Chile S.A. SOQUIMICH. 2001. Agenda del Salitre Ed. Soquimich. 1.515 p.
- Tahsin Y, Zuhail A. 2006. The enhancement of the cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176(8): 1067-1085.
- Tangestani M. 2004. Landslide susceptibility mapping using fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan catchment area, southwest Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, (51): 439-450.
- Theobald D. 2001. Land use dynamics beyond the American urban fringe, *Geographic Science*, (91): 544-564.
- Theobald D, Romme W. 2007. Expansion of the US wildland-urban interface. *Landscape and Urban Planning* (83): 340-354.
- Thole U, Zimmerman H.J, Zysno P. 1979. On the suitability of minimum and product operators for the intersection of fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, (2): 167-180.
- Tsataltzinos T, Iliadis L, Spartalis S. 2009. An intelligent Fuzzy Inference System for Risk Estimation Using Matlab Platform: the Case of Forest Fires in Greece. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2009, Volume 296/2009, 304-310.
- Tsataltzinos T. 2007. A fuzzy decision support system evaluating qualitative attributes towards forest fire risk estimation. Proceedings 10th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, Thessaloniki, Hellas. August 2007.
- Urzúa J.D. 1969. Determinación del Valor destinado a la Protección contra Incendios Forestales. Actas V Jornadas Forestales. Asociación Chilena de Ingenieros Forestales. Los Angeles. P.78-87.
- Vadrevu K, Eaturu A. 2010. Fire risk evaluation using multicriteria analysis—a case study. Environmental Monitoring and Assessment. Volume 166, Numbers 1-4, 223-239.
- Vakalis D, Sarimveis H, Kiranoudis C.T., Alexandridis A, Bafas G. 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management II. System architecture and case studies. *Applied Mathematical Modelling* 28 (2004) 411–425.
- Wang, Y, Elhag T, Hau Z. 2006. A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analysis hierarchy process. *Fuzzy Sets and Systems*, 157 (23), 3055-3071.
- Yanar T, Akyurek A. 2006. The enhancement of the cell-bases GIS analysis with fuzzy processing capabilities. *Information Sciences*, 176, 1067-1085.
- Yen J. 1999. Fuzzy logic. A modern perspective. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 11, 153-165.
- Zadeh L. 1965. Fuzzy sets. *IEEE Information and Control*, 8, 338-356.
- Zhang C, Wang H.P. 1992. Concurrent formation of part families and machine cells based on fuzzy set theory. *Journal of Manufacturing Systems*, 11: 61-67.
- Zimmerman H. 1996. Fuzzy set theory - and its applications. Kluwer-Nijhoff publishing, Boston-Dordrecht-Lancaster, 435 pp.

CAPÍTULO 4

**CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN EN ÁREAS DE
RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES.
ESTUDIO DE CASO: VALPARAÍSO.**

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN EN ÁREAS DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES. ESTUDIO DE CASO: VALPARAÍSO.

4.1 Marco general

Con frecuencia los eventos desastrosos producidos por el hombre poseen consecuencias graves e irreversibles, pero sus efectos muchas veces se dejan sentir en forma gradual en el ambiente. Dos ejemplos de ello lo constituyen la contaminación atmosférica y los efectos ambientales y sociales generados por los incendios forestales. Una tendencia general respecto a lo anterior señala que una gran proporción de personas que son objeto de entrevistas relacionadas a este tipo de temas reconocen el problema en cuestión, pero son muy pocos los dispuestos a pagar o colaborar con acciones que les permita vivir en mejores condiciones ambientales.

Los patrones conductuales por los cuales se originan los incendios, son hasta ahora, objeto de estudio por sicólogos, analistas demográficos y por especialistas dedicados a la planificación urbana en áreas de riesgo. Resulta particularmente complejo analizar las relaciones hombre-medio desde el punto de vista conductual, tanto por razones teóricas como por la escasez de datos estadísticos fidedignos en estudios sociales en causalidad de incendios forestales (Capel, 1973). En tal sentido, la geografía de la percepción y el comportamiento han sido estudiadas en numerosos trabajos que abordan el espacio urbano y el paisaje circundante.

Se ha comprobado, por ejemplo, que la inserción del hombre en la diversidad de elementos geográficos induce a distintos comportamientos hacia el medio que lo rodea, incluso sobre los mapas mentales que expresan la estimabilidad residencial de diversas regiones, en el uso y también en el cuidado que se le otorga a los recursos naturales. En este ámbito la intencionalidad por ocasionar incendios pasa muchas veces por un descontento hacia las políticas territoriales y a la falta de oportunidades por acceder a una vivienda digna, y en un área adecuada para este propósito.

Contrariamente a lo que se pudiera esperar respecto a la conducta de la población en áreas insertas en alta ocurrencia de incendios, la presencia del fuego en muchos casos

pasa a ser un componente habitual social y culturalmente aceptado en el entorno de vida de la población, aún cuando ello se traduzca en perjuicios a la calidad de vida (Oliver-Smith, 1996). Ello ocurre principalmente por la capacidad de auto organización del espacio post incendio, y en donde el grado de aceptación en el deterioro ambiental y social, permite la recurrencia y posterior degradación del ecosistema.

En efecto, los incendios forestales ocasionan indudablemente otros daños y efectos muchas veces difíciles de ser cuantificados. Evans y Kantrowitz (2002), han estudiado el sistemático deterioro en la calidad de vida de los habitantes localizados en zonas periféricas en donde se presentan habitualmente episodios de fuego. Una de las primeras manifestaciones de este deterioro es el estrés post traumático al vivir en forma directa el impacto ocasionado por los daños de un incendio forestal.

En estas manifestaciones que se derivan del análisis cualitativo y cuantitativo a los habitantes que viven en áreas de riesgo de incendios, es destacable la valoración que ellos hacen respecto al daño potencial y los conflictos derivados del caos producto de acciones de evacuación, y dos aspectos más que son externos al problema y que están relacionados a cómo se percibe desde la población, el accionar de las instituciones y las políticas económicas y de fomento al bienestar de los residentes.

Collins (2005) analizó el eje de vulnerabilidad contra el fuego al interior de la comunidad de Forest Ranch, ubicada en Sierra Cascada en California, mediante entrevistas a los residentes en esa área, para, entre otras cosas, conocer testimonios acerca de incendios acaecidos en el pasado, y examinar la percepción que poseen los habitantes ante la presencia del fuego en zonas de alto riesgo.

En Edmonton, Canadá, se hizo un estudio a la comunidad inserta en áreas de riesgo, acerca de qué medidas perciben ellos como las más apropiadas a ser implementadas en el entorno geográfico en el cual ellos viven (McGee, 2005). Los resultados indicaron que un 70,2% de los entrevistados consideran altamente prioritario educar a la población de riesgo, especialmente en materia de conciencia ambiental y manejo de combustibles. Un 34,6% sostiene que deben colocarse altas restricciones para el uso del fuego en labores domésticas al interior de las viviendas; otro 23,6% indica la conveniencia que todos los residentes se preocupen permanentemente de mantener

periódicamente la vegetación cercana a sus viviendas mediante podas y despejes. Por último, un 15,3% aprueba la aplicación de quemas prescritas para la reducción de combustibles.

El mismo estudio aborda la valoración o conciencia que poseen los habitantes respecto a la importancia de mantener estas áreas con el menor riesgo posible, como asimismo en quien recae la responsabilidad de llevar a cabo esta tarea. En la ciudad de Edmonton, un 54% de los encuestados atribuyen 100% de compromiso al municipio, mientras que el resto asume que el éxito de esta labor depende en gran medida de la conciencia que ellos deben tener para lograr un adecuado uso del fuego, bajo las normas y leyes actualmente vigentes.

4.2 Situación de la población en la interfaz de Valparaíso

En virtud de los antecedentes antes señalados, en este capítulo se estudia la población inserta en áreas de alto riesgo de incendios forestales en cerros y quebradas del paisaje costero, en la Provincia de Valparaíso, Chile Central. Para ello el estudio considera las poblaciones aledañas a zonas de alta ocurrencia de incendios forestales, que en su perímetro, abarca una superficie aproximada de 14 mil hectáreas, rodeando a los cascos urbanos de Valparaíso y Viña del Mar. El estudio permite identificar cuatro áreas de interfaz, cuyos atributos socioeconómicos y conductuales, sin duda servirán de gran ayuda para apoyar un plan e protección contra incendios forestales que considere abiertamente la participación de la población bajo riesgo en estas áreas.

4.2.1 Antecedentes preliminares

La Región de Valparaíso en Chile Central concentra el mayor número de incendios forestales localizados en áreas de interfaz urbano-forestal de todo el país. En una revisión general de más de 40 años de estadísticas de ocurrencia y causas de este tipo de incendios, es posible constatar que la gravedad del problema, surge, entre otros aspectos, por la actividad humana negligente en áreas de alto peligro de propagación del fuego, y por la escasa regulación en los procesos de crecimiento urbano del territorio hacia áreas no planificadas para ello.

Esta situación ha llevado a las instituciones de protección contra incendios forestales, a adoptar diversos mecanismos de prevención y protección año tras año, elevándose en los últimos 5 años considerablemente el gasto e inversión de recursos. No obstante ello, las estadísticas revelan que los incendios, lejos de disminuir, se han mantenido o aumentado tanto en tamaño como en la gravedad de los mismos, por los cuantiosos daños materiales y ambientales que se han reportado, incluso con el compromiso de vidas humanas.

Por lo anterior, y en el contexto del presente capítulo se ha establecido como objetivo conocer y caracterizar en forma económica, social y conductual la población que habita sectores en donde existe una alta recurrencia de incendios con alto riesgo a viviendas. Para ello se contó con el apoyo de la Unidad de Prevención contra incendios forestales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la Quinta Región de Chile, junto a una extensa labor de campo programada por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile.

4.2.2 Marco conceptual: los incendios de interfaz

La propagación del fuego en áreas cercanas a los asentamientos poblados, constituye un problema constante y de especial gravedad, recurrente en muchos paisajes y ecosistemas en donde la ocurrencia de incendios forestales se instala como un factor de riesgo. Sus daños y efectos repercuten directamente en la calidad de vida de los habitantes en áreas de interfaz, como asimismo en las condiciones de vida de los ecosistemas que ven modificados sus procesos por la recurrencia del fuego (Radeloff *et.al*, 2001; Theobald, 2001).

La bibliografía especializada reporta numerosos antecedentes respecto a los daños ocasionados por el avance del fuego en casas, sin distinguir el nivel socioeconómico ni características de las mismas. Los casos más conocidos se concentran en áreas de paisajes mediterráneos de Chile Central, Sur Oeste de los Estados Unidos, Sur de Australia, España, Portugal, Francia y Grecia, por nombrar los países que presentan graves problemas respecto a incendios en interfaz.

En el caso de Chile Central, la expansión de territorios para ocupación urbana, no ha ido en concordancia con la disponibilidad de áreas aptas para este tipo de uso de suelo. En las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar, situadas en la costa de la V Región de Chile, estas áreas se caracterizan por un elevado daño en el paisaje vegetal mediterráneo, en la infraestructura y consecuentemente, en el entorno habitacional de áreas marginales cercanas a sectores con alta carga de combustible vegetal.

Las áreas de interfaz son reconocidas y calificadas de acuerdo al tamaño de ellas, y la composición de sus elementos que se insertan en el paisaje. Su concepto general lo ha descrito Davis (1990) como una franja o zona en donde el componente humano coexiste en un gradiente espacial, con las tierras ocupadas por actividades agrícolas, forestales, u otro tipo de uso de suelo distinto a la ocupación en infraestructura.

Respecto a la población que habita en áreas de interfaz, la bibliografía reporta numerosos antecedentes respecto a desplazamientos de territorios por falta de oportunidades para el acceso a viviendas formales en áreas urbanas, como asimismo en la concentración de problemas de hacinamiento, y con ello los incendios forestales en donde la existencia de material vegetal combustible, es utilizada para abastecimiento de leña, carbón y otros productos secundarios.

Lo anterior se ha constatado mediante la visita en terreno a áreas recurrentemente afectadas por el fuego, y en donde la percepción general, denota la existencia de familias de escasos recursos económicos, una alta tasa de cesantía y una relación directa con la baja calidad de las viviendas que las hacen muy susceptibles a ser afectadas por la combustión.

Este artículo presenta los resultados derivados de un diseño y aplicación de una encuesta semiestructurada, dividida en dos secciones que buscan caracterizar un grupo aproximado de 25.000 personas que viven en áreas amenazadas y dañadas frecuentemente por incendios. Es el primer estudio formal realizado en Chile, que combina aspectos de percepción social, junto a la caracterización del entorno natural. Los resultados aquí expuestos representan los primeros antecedentes que permitirán focalizar de mejor manera los futuros programas de prevención contra incendios forestales para la Región de Valparaíso.

4.2.3 *Materiales y métodos*

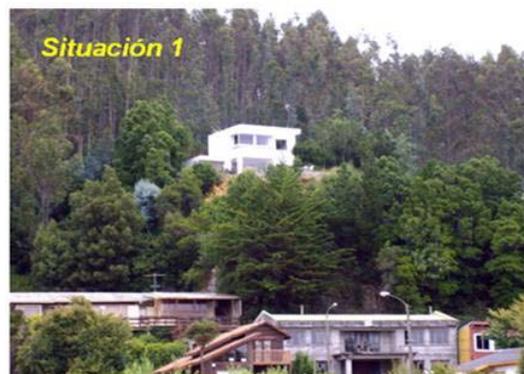
Se trabajó en las áreas de interfaz urbano-forestal correspondientes a las comunas de Valparaíso y Viña del Mar, comprometiendo un área aproximada de 12.500 hectáreas sobre las cuales se efectuó una campaña de terreno dirigida a encuestar a la población residente en cerros y quebradas con alto riesgo de incendios forestales. En la caracterización de la vivienda, se consideraron los materiales de construcción, la superficie edificada, antecedentes del grupo familiar y la localización de esta, en el área de interés. De esta manera, y considerando antecedentes previos de valores promedio para cada tipo de vivienda, y los reportes satelitales respecto a las áreas más críticas de localización respecto al riesgo de incendios, se calificaron en cuatro grupos (cuadro 4.2.3.a). Para ello se diseñó una encuesta organizada en preguntas acotadas y opinión abierta frente a temas relacionados a su calidad de vida y existencia en áreas de interfaz. Entre otros aspectos a medir, se buscó caracterizar atributos básicos de la vivienda y su relación con la percepción de la calidad de vida frente a la existencia de una amenaza constante, que es la propagación del fuego hacia sus casas.

Para la aplicación de esta encuesta, se seleccionaron 23 sectores previamente establecidos entre la Corporación Nacional Forestal y el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile, las que fueron identificadas a través de las estadísticas y causas de incendios, que corresponden a poblaciones, villas o cerros de Valparaíso y Viña del Mar. Estas localidades fueron escogidas de acuerdo a los antecedentes de ocurrencia histórica de incendios provocados en estos sectores, apoyados por datos estadísticos de ocurrencia y causalidad y memorias anuales de estadística temporal de incendios, tomando como un criterio de elección la cantidad de incendios y el nivel de daños reportados en las últimas temporadas (2006-2010), en estos sectores. Las áreas de interfaz fueron caracterizadas mediante la definición de atributos previamente aplicados en otros proyectos ejecutados en la zona (Rodríguez *et al*, 2010), y en cuyo caso se obtuvieron los parámetros más relevantes que fueran de utilidad para el proceso de datos de la encuesta. Entre los más importantes se encuentran: la superficie de la vivienda, tipo de material construido, su localización en interfaz, la densidad de habitantes por casa. Estas variables fueron complementadas con las que contemplaban las encuestas, relacionadas más a la opinión de la población respecto al problema de los incendios forestales.

Cuadro 4.2.3.a.- Caracterización de las cuatro áreas de interfaz urbano-forestal, presentes en las Comunas de Valparaíso y Viña del Mar. Quinta Región de Chile Mediterráneo Central.

Situación de Interfaz 1. Sectores habitacionales consolidados de un nivel socio-económico alto, caracterizados por los siguientes indicadores:

Densidad Habitacional (cantidad de casas por hectárea): 26. Superficie Promedio de casas: 120 m². Cantidad promedio de habitantes por casa: 2 adultos y dos niños. Materiales de construcción (en orden de prioridad): Ladrillo-hormigón-tejas de greda-maderamento. Vegetación circundante: Jardines con riego y arbolado ornamental Índice de Inflamabilidad (basado en los materiales de construcción y en la vegetación circundante): 1,0



Situación de interfaz 2. Sectores habitacionales no consolidados de un nivel socioeconómico medio-bajo, con los siguientes antecedentes: Densidad Habitacional (cantidad de casas por hectárea): 72.

Superficie Promedio de casas: 52 m². Cantidad promedio de habitantes por casa: 3 adultos y 4 niños. Materiales de construcción (en orden de prioridad): Pizarreño-volcanita-madera-ladrillo. Vegetación circundante: Matorrales y pastizales. Índice de Inflamabilidad (basado en los materiales de construcción y en la vegetación circundante): 4,0



Situación de interfaz 3. Sectores habitacionales parcialmente consolidados de un nivel socioeconómico bajo, con los siguientes antecedentes: Superficie Total en la Zona de Estudios: 414, 13 ha. Densidad Habitacional (cantidad de casas por hectárea): 11. Superficie Promedio de casas: 48 m². Cantidad promedio de habitantes por casa: 3 adultos y 5 niños. Materiales de construcción (en orden de prioridad): Madera-volcanita. Vegetación circundante: Matorrales y pastizales. Índice de Inflamabilidad (basado en los materiales de construcción y en la vegetación circundante): 5,0



Situación de interfaz 4. Sectores habitacionales consolidados de un nivel socioeconómico medio, preferentemente rurales, con los siguientes antecedentes: Superficie Total en la Zona de Estudios: 4.656,50 ha. Densidad Habitacional (cantidad de casas por hectárea): 1. Superficie Promedio de casas: 68 m². Cantidad promedio de habitantes por casa: 3 adultos y 4 niños. Materiales de construcción (en orden de prioridad): Cemento-madera-ladrillo-hormigón. Vegetación circundante: Matorrales, pastizales y cultivos agrícolas (frutales, cereales y hortalizas). Índice de Inflamabilidad (basado en los materiales de construcción y en la vegetación circundante): 3,0



El siguiente cuadro, muestra la distribución espacial de las encuestas, considerando dos meses de campaña en terreno, y la accesibilidad hacia los lugares de mayor conflictividad en materia de ocurrencia de incendios. Se consideró en especial medida, que la muestra total fuera representativa para el área estudiada.

Cuadro 4.2.3.b.- Número de encuestas realizadas en cada uno de los sectores seleccionados.

| Sector | Comuna | N° Encuestas Efectuadas |
|-------------------------------|---------------|--------------------------------|
| Achupallas paradero 5 | Viña del Mar | 1 |
| Cerro La Cruz | Valparaíso | 20 |
| Cerro Mariposas | Valparaíso | 14 |
| Ferrari | Valparaíso | 23 |
| Fundo Curaumilla Laguna Verde | Valparaíso | 2 |
| Los Perales | Quilpué | 3 |
| Marina Mercante | Valparaíso | 31 |
| Pajonal | Valparaíso | 16 |
| Peña Blanca, | Villa Alemana | 7 |
| Pezoa Véliz | Valparaíso | 27 |
| Población Argentina | Quilpué | 6 |
| Población Básica | Valparaíso | 17 |
| Población Puerto Montt | Viña del mar | 49 |
| Población Las Palmas | Viña del mar | 17 |
| Población Puerto Aysén | Viña del mar | 25 |
| Pueblo Hundido | Valparaíso | 9 |
| Ramaditas | Valparaíso | 14 |
| René Schneider | Viña del mar | 25 |
| Reñaca Alto | Viña del mar | 19 |
| Rocuant Alto | Valparaíso | 17 |
| Siete Hermanas | Viña del mar | 16 |
| Villa Rapa Nui | Valparaíso | 29 |
| Vista las Palmas | Viña del mar | 16 |
| Total | | 403 |

Complementariamente se registraron antecedentes fotográficos para documentar los daños provocados en la zona, y un GPS para poder identificar específicamente cada uno de los puntos en donde se aplicó cada una de las encuestas.

La encuesta fue prediseñada con antelación al trabajo de campo. Una vez elaborada, se aplicó una primera ronda experimental de entrevistas en el área de interés, para comprobar la pertinencia y diseño de cada una de las preguntas. Posteriormente, se realizaron pequeñas modificaciones (a modo de validación), con el fin de generar la versión formal, la que fue finalmente aplicada en terreno.

Una vez validada la encuesta, se elaboró la campaña de terreno considerando las 23 localizaciones antes señaladas, y para el período febrero-marzo de 2010 (dos meses completos de toma de datos). Como paso inicial, se estimó el tamaño de la población mediante una estimación muestral dada por:

$$n' = \left(\frac{z}{\varepsilon}\right)^2 pq \qquad n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}}$$

Donde n' es la cantidad de elementos teóricos de la muestra, en este caso, el número de encuestas realizadas, mientras que “ n ” es la muestra de la población. “ N ” es la cantidad de elementos de toda la población, y que en este estudio corresponde a una estimación de 5.000 familias localizadas en áreas de interfaz, considerando una población total aproximada de 25.000 personas a un promedio de 5 integrantes por cada familia, de acuerdo a los antecedentes proporcionados por la Corporación Nacional Forestal V Región. Se eligió un nivel de confianza z de 95% ($p < 0,05$), lo que arrojó un “ n ” de 356,75 ~ 357 encuestas. Sin embargo, por facilidades de acceso y tiempo disponible para realizar la fase de campo, se amplió la muestra hasta un $n = 403$. La localización espacial de la muestra se estableció considerando las áreas de mayor ocurrencia y gravedad de los incendios forestales, en el área de interfaz urbano forestal. Es importante destacar que la encuesta se aplicó a los/las jefes/jefas de hogar de cada uno de los sectores estudiados, quienes en la mayoría de los casos pertenecían a la junta de vecinos de la población, villa o cerros de Valparaíso y Viña del Mar insertas dentro de las áreas de interfaz de la Región de Valparaíso, quienes en la mayoría de los casos realizaban actividades para prevenir los incendios forestales.

4.2.4 Resultados y Discusión

Se aplicó el test K-S de Kolmogorov-Smirnov a los datos de la variable “Superficie construida”, para así poder determinar si los datos se distribuían de manera normal, por cada interfaz predeterminada en el estudio. El proceso en el software estadístico indica los siguientes resultados para cada área de interfaz (cuadro 4.2.4.a).

Cuadro 4.2.4.a.- Prueba de Kolmogorov-Smirnov para cada área de Interfaz

| Interfaz | N | Media | Desv. Estándar | Parámetros de K-S | | | Z |
|----------|-----|--------|----------------|-------------------|---------------|---------------|------|
| | | | | Dif. Absolut | Dif. Positiva | Dif. Negativa | |
| I | 28 | 159,46 | 113,21 | 0,24 | 0,25 | -0,20 | 1,31 |
| II | 54 | 91,94 | 51,76 | 0,25 | 0,23 | -0,16 | 1,85 |
| III | 317 | 57,39 | 34,60 | 0,18 | 0,19 | -0,10 | 3,23 |
| IV | 4 | 49,75 | 12,17 | 0,30 | 0,21 | -0,30 | 0,60 |

Un primer análisis de tendencias, muestra agrupaciones en los valores obtenidos para cada área de interfaz, al analizar las frecuencias para cada intervalo de clase. Los resultados gráficos para cada zona son los siguientes:

Gráfico 4.2.4.a.- Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m²” para la Interfaz 1

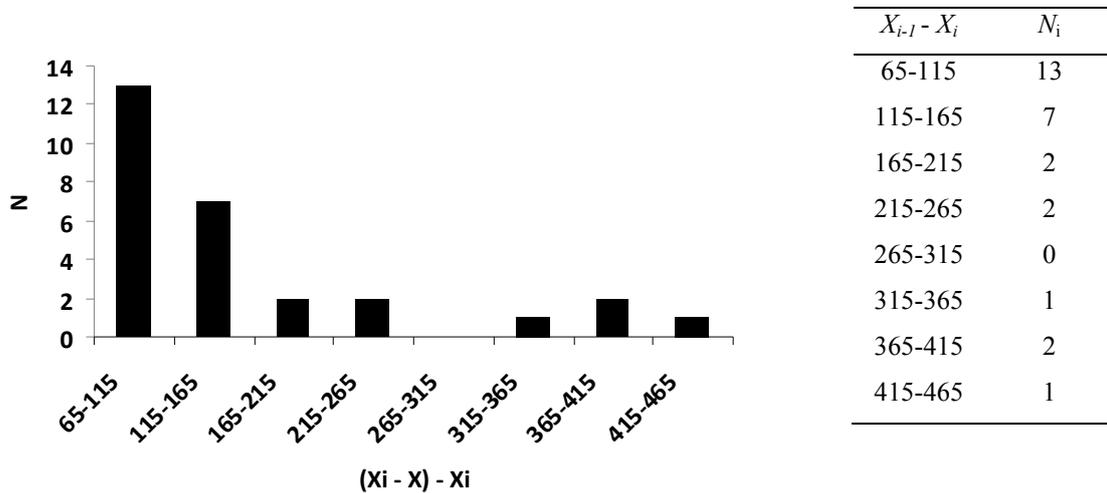


Gráfico 4.2.4.b.- Frecuencias de la variable en estudio “superficie construida en m²” para la Interfaz 2

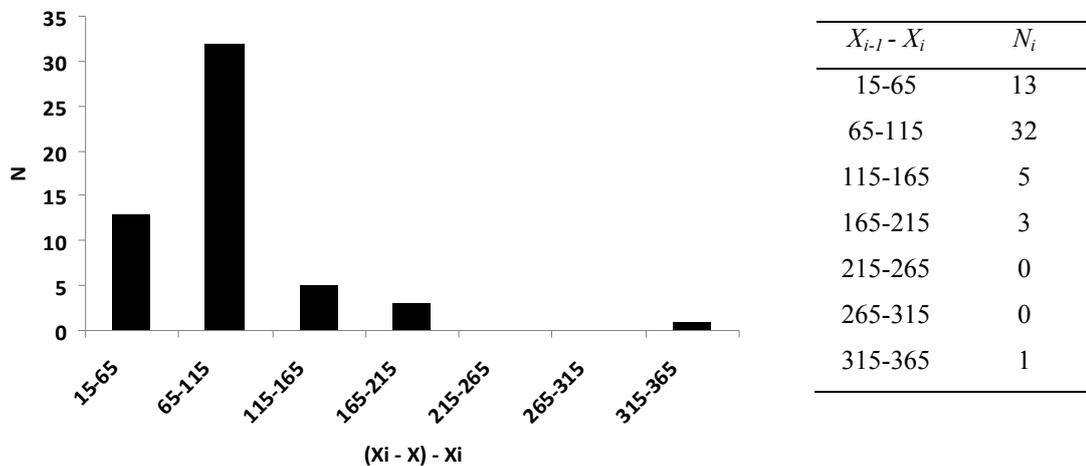


Gráfico 4.2.4.c.- Frecuencias de la variable en estudio
“superficie construida en m²” para la Interfaz 3

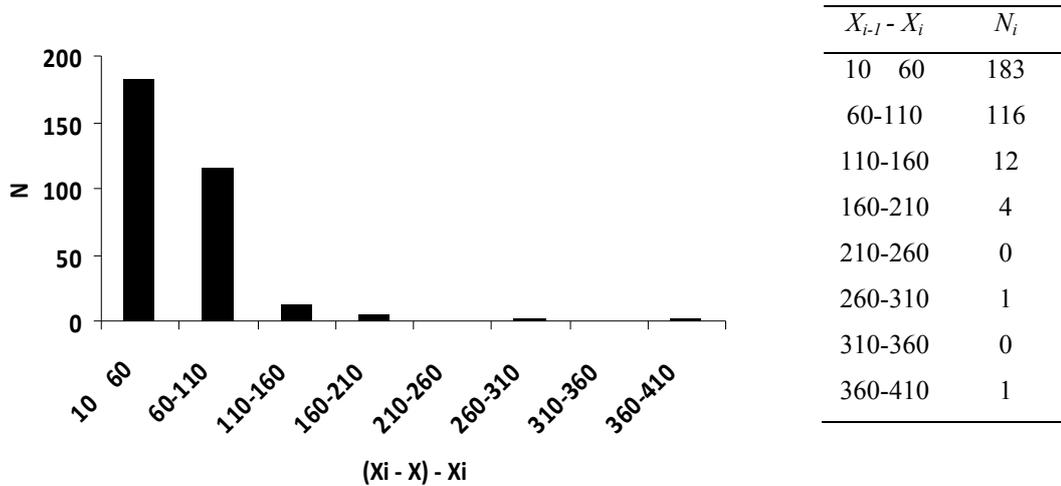
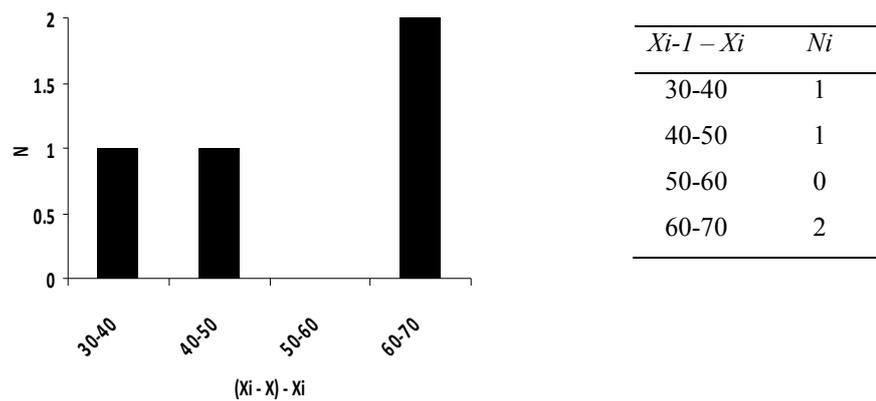


Gráfico 4.2.4.d.- Frecuencias de la variable en estudio
“superficie construida en m²” para la Interfaz 4



Analizando los gráficos es posible observar que las frecuencias, no se distribuyen con la forma de Campana de Gauss, característica de la distribución normal, sino que se distribuyen más bien de forma asimétrica, por lo tanto, fue necesario realizar una transformación para convertir los datos de frecuencia en datos normales. Para esto se aplicó el método que consiste en la utilización del logaritmo natural, el cual hace que los datos pasen de distribuirse de manera asimétrica a una forma simétrica, posterior a este paso, se realizó el cálculo de la prueba de K-S, obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 4.2.4.b.- Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 1.

| $X_{i-1} - X_i$ | N_i | $S_n(x)$ | $S_n(x)$ | $F_o(X)=\phi(x-\mu)/desv$ | ϕ | $Desv.$ | $D+$ | $D-$ | $D\alpha$ |
|-----------------|-------|----------|----------|---------------------------|--------|---------|---------------|--------------|--------------|
| 4,0-4,5 | 9 | 9 | 0,321 | -0,64 | 0,261 | 0,261 | 0,060 | -0,024 | 0,164 |
| 4,5-5,0 | 9 | 18 | 0,642 | 0,20 | 0,579 | 0,318 | 0,063 | -0,027 | |
| 5,0-5,5 | 4 | 22 | 0,785 | 1,05 | 0,853 | 0,534 | -0,067 | 0,103 | |
| 5,5-6,0 | 5 | 27 | 0,964 | 1,90 | 0,971 | 0,436 | -0,007 | 0,042 | |
| 6,0-6,5 | 1 | 28 | 1 | 2,75 | 0,997 | 0,560 | 0,003 | 0,032 | |

Como el valor de $D=0,1031 < 0,1644$ no se rechaza H_0 y se acepta que los datos se distribuyen normalmente

Cuadro 4.2.4.c.- Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 2.

| $X_{i-1} - X_i$ | N_i | $S_n(x)$ | $S_n(x)$ | $F_o(X)=\phi(x-\mu)/desv$ | ϕ | $Desv.$ | $D+$ | $D-$ | $D\alpha$ |
|-----------------|-------|----------|----------|---------------------------|--------|---------|---------------|--------------|--------------|
| 3,0-3,5 | 2 | 2 | 0,037 | -1,94 | 0,026 | 0,026 | 0,010 | 0,007 | 0,120 |
| 3,5-4,0 | 3 | 5 | 0,092 | -0,87 | 0,192 | 0,166 | -0,099 | 0,118 | |
| 4,0-4,5 | 27 | 32 | 0,592 | 0,19 | 0,573 | 0,407 | 0,019 | -0,007 | |
| 4,5-5,0 | 14 | 46 | 0,851 | 1,26 | 0,896 | 0,488 | -0,044 | 0,062 | |
| 5,0-5,5 | 7 | 53 | 0,981 | 2,32 | 0,989 | 0,500 | -0,008 | 0,026 | |
| 5,5-6,0 | 1 | 54 | 1 | 3,38 | 0,999 | 0,498 | 0,004 | 0,018 | |

Como el valor de $D=0,1181 < 0,1200$ no se rechaza H_0 y se acepta que los datos se distribuyen normalmente

Cuadro 4.2.4.d.- Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 3.

| $X_{i-1} - X_i$ | N_i | $S_n(x)$ | $S_n(x)$ | $F_o(X)=\phi(x-\mu)/desv$ | ϕ | $Desv.$ | $D+$ | $D-$ | $D\alpha$ |
|-----------------|-------|----------|----------|---------------------------|--------|---------|--------------|---------------|--------------|
| 2,0-2,5 | 2 | 2 | 0,006 | -2,831 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | -0,008 | 0,050 |
| 2,5-3,0 | 13 | 15 | 0,047 | -1,834 | 0,033 | 0,031 | 0,013 | -0,010 | |
| 3,0-3,5 | 37 | 52 | 0,164 | -0,837 | 0,203 | 0,172 | -0,039 | 0,042 | |
| 3,5-4,0 | 121 | 173 | 0,545 | 0,159 | 0,559 | 0,387 | -0,013 | 0,017 | |
| 4,0-4,5 | 113 | 286 | 0,902 | 1,156 | 0,874 | 0,487 | 0,027 | -0,024 | |
| 4,5-5,0 | 23 | 309 | 0,974 | 2,153 | 0,984 | 0,496 | -0,009 | 0,012 | |
| 5,0-5,5 | 6 | 315 | 0,993 | 3,150 | 0,999 | 0,502 | -0,005 | 0,008 | |
| 5,5-6,0 | 2 | 317 | 1 | 3,549 | 0,999 | 0,497 | 0,002 | 0,002 | |

Como el valor de $D=0,0424 < 0,0501$ no se rechaza H_0 y se acepta que los datos se distribuyen normalmente

Cuadro 4.2.4.e.- Cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Interfaz 4.

| $X_{i-1} - X_i$ | N_i | $S_n(x)$ | $S_n(x)$ | $F_o(X)=\phi(x-\mu)/desv$ | ϕ | $Desv.$ | $D+$ | $D-$ | $D\alpha$ |
|-----------------|-------|----------|----------|---------------------------|--------|---------|---------------|--------------|--------------|
| 3,5-4,0 | 2 | 2 | 0,5 | 0,454 | 0,673 | 0,673 | -0,173 | 0,423 | 0,428 |
| 4,0-4,5 | 2 | 4 | 1,0 | 2,727 | 0,996 | 0,323 | 0,003 | 0,246 | |

Como el valor de $D=0,4236 < 0,4286$ no se rechaza H_0 y se acepta que los datos se distribuyen normalmente

Para las cuatro situaciones de Interfaz se aceptó que los datos se distribuían de manera uniforme, por lo que los datos pudieron ser utilizados para establecer comparaciones entre cada grupo de encuestados. Luego de haber normalizado los datos, y haber realizado el test K-S se realizó la prueba de contraste Chi-Cuadrado de Pearson, de manera de poder determinar si existe independencia entre las variables a estudiar. Para ello, se elaboró una tabla de contingencia, en donde se agruparon los datos tanto por

Interfaz, como por rango de superficie, para así tener una primera tabla con los valores de frecuencia observados, la cual se presenta a continuación.

Cuadro 4.2.4.f.- Tabla de contingencia de las frecuencias observadas por rango e Interfaz.

| Interfaz | Rangos (frecuencias observadas) | | | | | | | | | Totales |
|----------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| | 2,0-2,5 7-12 | 2,5-3,0 12-20 | 3,0-3,5 20-33 | 3,5-4,0 33-54 | 4,0-4,5 54-89 | 4,5-5,0 89-148 | 5,0-5,5 148-244 | 5,5-6,0 244-403 | 6,0-6,5 403-664 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 4 | 5 | 1 | 28 |
| 2 | 0 | 0 | 2 | 3 | 27 | 14 | 7 | 1 | 0 | 54 |
| 3 | 2 | 13 | 37 | 121 | 113 | 23 | 6 | 2 | 0 | 317 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Totales | 2 | 13 | 39 | 126 | 151 | 46 | 17 | 8 | 1 | 403 |

Posteriormente se calcularon las frecuencias esperadas, para poder determinar la dispersión de los datos y de esta manera estimar los residuos. Se emplea el tamaño total de la muestra, respecto al valor de la frecuencia para cada categoría de interfaz. Con estos cálculos resultó la siguiente tabla de valores esperados:

Cuadro 4.2.4.g.- Tabla de contingencia de las frecuencias esperadas por rango e Interfaz.

| Interfaz | Rangos (estimados) | | | | | | | | |
|----------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 2,0-2,5 7-12 | 2,5-3,0 12-20 | 3,0-3,5 20-33 | 3,5-4,0 33-54 | 4,0-4,5 54-89 | 4,5-5,0 89-148 | 5,0-5,5 148-244 | 5,5-6,0 244-403 | 6,0-6,5 403-664 |
| 1 | 0,138 | 0,903 | 2,709 | 8,754 | 10,491 | 3,196 | 1,181 | 0,555 | 0,069 |
| 2 | 0,267 | 1,741 | 5,225 | 16,883 | 20,233 | 6,163 | 2,277 | 1,071 | 0,133 |
| 3 | 1,573 | 10,225 | 30,677 | 99,111 | 118,776 | 36,183 | 13,372 | 6,292 | 0,786 |
| 4 | 0,019 | 0,129 | 0,387 | 1,250 | 1,498 | 0,456 | 0,168 | 0,079 | 0,009 |

Finalmente para la obtención del valor de Chi-cuadrado se utilizó la siguiente fórmula:

$$\chi^2 = \sum_i^I \sum_j^J (E_{ij} - O_{ij})^2 / E_{ij}$$

El valor final para Chi-cuadrado es de 137,28, y haciendo la comparación con el valor obtenido de tabla estadística 36,41 con 24 gl (grados de libertad) y un α de 0,05, se rechaza la hipótesis de independencia (H_0) y por lo tanto, se infiere que sí existe dependencia (hipótesis H_1) entre la interfaz y la superficie construida (las variables no son independientes). Si la hipótesis de independencia se rechaza, se pueden detectar los niveles de los factores que causan la asociación mediante la comparación de las frecuencias observadas y esperadas. Mediante la siguiente fórmula se calcularon los residuos estandarizados de Pearson, expresándose sus resultados en el cuadro 4.2.4.h.

$$P = \frac{f_{obs_{ij}} - f_{esp_{ij}}}{\sqrt{f_{esp_{ij}}(1 - p_{i+})(1 - p_{+j})}}$$

Cuadro 4.2.4.h.- Tabla de residuos estandarizados de Pearson

| Interfaz | Rangos (residuos estandarizados) | | | | | | | | |
|----------|----------------------------------|---------|--------------|---------------|---------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| | 2,0-2,5 | 2,5-3,0 | 3,0-3,5 | 3,5-4,0 | 4,0-4,5 | 4,5-5,0 | 5,0-5,5 | 5,5-6,0 | 6,0-6,5 |
| | 7-12 | 12-20 | 20-33 | 33-54 | 54-89 | 89-148 | 148-244 | 244-403 | 403-664 |
| 1 | -0,387 | -1,001 | -1,795 | -3,699 | -0,603 | 3,575 | 2,747 | 6,535 | 3,664 |
| 2 | -0,557 | -1,441 | -1,595 | -4,379 | 2,044 | 3,603 | 3,435 | -0,081 | -0,393 |
| 3 | 0,738 | 1,909 | 2,600 | 5,740 | -1,451 | -5,040 | -4,459 | -8,181 | -1,922 |
| 4 | -0,141 | -0,366 | -0,657 | 0,812 | 0,520 | -0,721 | -0,421 | -0,290 | -0,100 |

Aquellos valores destacados en negrita son valores mayores que 2 en valor absoluto, los cuales indican claramente que la frecuencia de estas celdas no se ajusta a un modelo en el que se supone independencia entre las variables con un nivel de confianza p igual al 95%. Además estos valores resaltados indican una fuerte relación entre las variables ya sea de manera positiva como negativa. Se puede decir que existe una relación fuerte y positiva entre aquellos entrevistados que están clasificados en la Interfaz 1 y que tienen superficies de casa construida entre los 89 y 600 m², por el contrario se puede decir que existe una relación fuerte pero negativa para aquellos entrevistados que pertenecen a la Interfaz 3 y la superficie construida entre los 89 y 403 m², en esta misma interfaz se presentan relaciones positivas para los rangos de superficie que van entre los 20 y los 54 m². El coeficiente “ V ” de Cramer, fue aplicado en estos resultados, para cuantificar el sentido positivo o negativo de la tendencia estadística, mediante la expresión:

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{n \cdot [\min(r; c) - 1]}}$$

El coeficiente de Cramer (V) toma valores en el intervalo [0, 1]. El valor de V para este caso es de 0,3369, con $X^2 = 137,288$, $n = 403$, $r = 4$, $c = 9$. Este valor quiere decir que existe buena asociación entre el tipo de interfaz y la superficie construida en m².

Estos antecedentes permiten caracterizar de mejor manera la situación de las áreas de interfaz, en cuyo caso se ha visto una formación de núcleos que responden a tipos de áreas construidas. No obstante, por los antecedentes recopilados de las encuestas, no es

posible establecer relaciones más detalladas respecto al nivel de percepción que tienen los habitantes de cada área de interfaz respecto al peligro generado por los incendios.

Existen fuentes de error externas que los autores pretenderán mejorar en una futura versión de la encuesta, especialmente al sesgo producido por las respuestas relacionadas al nivel de ingresos de los encuestados, y su relación con el entorno en el cual viven. Aún así, fue posible establecer ciertas tendencias respecto a la visión que tienen los aproximadamente 25 mil habitantes que conforman el área de estudio, respecto a la valoración que ellos le dan a los recursos naturales renovables que puedan verse amenazados por los incendios.

En este proceso, se constató que la mayoría de los encuestados, independiente a su localización en áreas de interfaz 1 a 4, los habitantes conocen la importancia de la protección de los recursos forestales y los bienes y servicios que ellos otorgan al medio ambiente. Estos resultados confirman lo verificado por Antúnez (2012) para este universo de encuestas. En su mayoría, los habitantes han visitado áreas protegidas cercanas a su residencia, y estarían dispuestos a pagar un monto en dinero por colaborar en la manutención y existencia de las mismas, como una forma de elevar la calidad de vida a la comunidad (figura 4.2.4.a). En general, se percibe una alta preocupación en la población por la recurrencia de eventos año tras año, aún cuando la percepción general es de escaso cuidado por parte de sus propios vecinos, que se traduce en altas tasas de intencionalidad en la ocurrencia de incendios, especialmente en áreas de difícil acceso y en donde las labores de contención del fuego resultan complicadas.

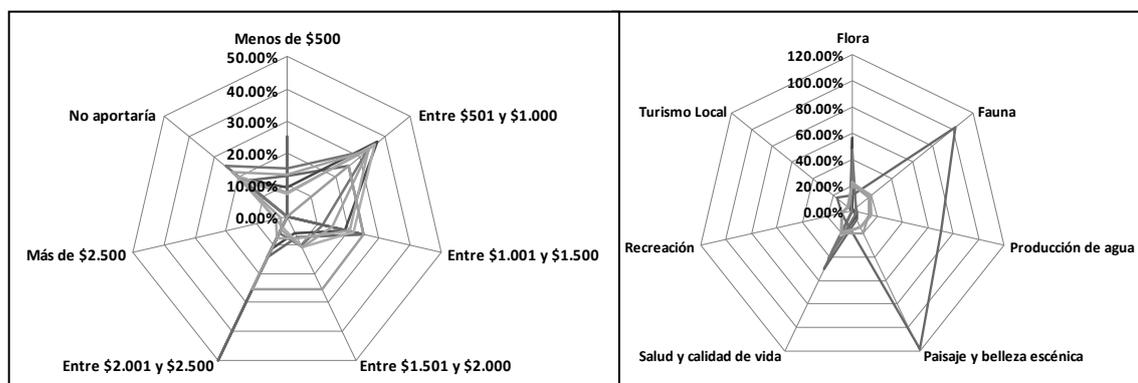


Figura 4.2.4.a.— Izquierda: tendencia general a la disposición a pagar por participar en la protección de áreas mediante el aporte de un fondo voluntario que vaya en directa ayuda a las áreas protegidas consideradas en la encuesta. Se aprecia que el rango fluctúa entre \$500 y \$2.000 ($N=403$). Derecha: Componentes de la naturaleza que surgen mayor atención por parte de los encuestados. Las líneas ilustran los porcentajes por cada tipo de respuesta, y por segmentos de la población encuestada.

4.2.5 Conclusiones

El análisis estadístico de los datos basados en información procedente de cuatro tipos de área de interfaz, permite, por un lado, caracterizar el estado de población en función de la relación existente entre el tipo de vivienda, su localización y la superficie construida. Existe una relación fuerte entre la categoría de área de interfaz y la superficie construida. Las áreas con mayor densidad de casas y menor superficie promedio están asociadas a sectores con mayor densidad de incendios y topografía más abrupta. Por el contrario, aquellos sectores caracterizados por viviendas de mayor valor, disponen de mayores barreras para la contención del fuego en interfaz, aún cuando los valores de ocurrencia son elevados.

Existe una percepción general de la población respecto al temor que se vean involucrados nuevamente por el efecto de un incendio en cercanías de sus hogares. Las juntas de vecinos logran conformar protocolos básicos de atención contra posibles emergencias que puedan ocurrir, frente a la eventualidad potencial de la ausencia oportuna de recursos estatales para el combate del fuego.

En general se percibe que la gente desea preservar un entorno de naturaleza que les sirva de entorno para sostener su calidad de vida. Ello se ve reflejado en la disposición a pagar, tanto para visitar como también para aportar hipotéticamente en fondos voluntarios que vayan a la preservación de áreas protegidas presentes en la Quinta Región de Chile.

A pesar que estos resultados distan aún de lograr una valoración contingente de los servicios ambientales presentes en áreas de riesgo de incendios, esta investigación representa el primer aporte concreto en la caracterización de aquellas áreas habitadas que constituyen una alta sensibilidad frente a la propagación del fuego. Los gestores de información territorial pueden contar con estos resultados para incorporar nuevos criterios para la zonificación y priorización de actuaciones para la prevención contra incendios.

4.3 Referencias

- Antúnez J. 2012. Sensibilidad de la población respecto al problema ocasionado por los incendios forestales en áreas de interfaz, en la Región de Valparaíso. Memoria de Título Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. 49p.
- Capel H. 1973. Percepción del medio y comportamiento geográfico. *Revista de Geografía*, (3),1-2: 58-150.
- Collins T. 2005. Households, forests, and fire hazard vulnerability in the American West: A case study of a California community. *Environmental Hazards*, (6): 23-37.
- Davis J.B. 1990. The wildland-urban interface: paradise or battleground?. *Journal of Forestry*, 88(1): 26-31.
- Evans G.W., Kantrowitz E. 2002. Socioeconomic status and health: the potential role of environmental risk exposure. *Annual Review of Public Health*, (23): 303-331.
- McGee T. 2005. Completion of recommended WUI fire mitigation measures within urban households in Edmonton, Canada. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, (6),3: 147-157.
- Oliver-Smith A. 1996. Anthropological research on hazards and disasters. *Annual Review of Anthropology*, (25): 303-328.
- Radeloff V, Hammer R, Voss P, Hagen A, Field D, Mladenoff D. 2001. Human demographic trends and landscape level forest management in the Northwest Wisconsin Pine Barrens. *Forest Science* (47),2: 229-241;
- Rodríguez y Silva F, Julio G, Castillo M, Molina J.R., Herrera M, Toral M, Cerda C, González L. 2010. Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p. ISBN 978-84-693-0740-3;
- Theobald D. 2001. Land use dynamics beyond the American urban fringe. *Geographic Science* (91): 544-564.

4.4 Anexo

| |
|---|
| Número de encuesta: Lugar (población, villa o cerro): Fecha: Hora: |
|---|

Encuesta de percepción de la población frente a incendios forestales en áreas de interfaz, y evaluación de servicios ambientales proporcionados por el bosque y áreas protegidas frente al impacto del fuego.

Antecedentes generales:

Tipo de vivienda:

Ladrillo-Concreto-Cemento Mixta (madera) Material ligero

Superficie construida (valor aproximado en m²): _____

Situación interfaz: 1 2 3 4

Coordenadas UTM (GPS): X: _____ Y: _____

Segmento: Habitantes en áreas de interfaz. Estratos socioeconómico medio-bajo.

Confidencialidad:

Buenos días (tardes), mi nombre es _____ y trabajo para la Universidad de Chile. Estamos llevando a cabo un proyecto sobre percepción de la población frente a los daños y efectos que ocasionan los incendios forestales, particularmente en su barrio o comuna. Nos interesa de sobremanera conocer su valiosa opinión frente a los últimos episodios de incendios que han impactado fuertemente a la población y que en muchos casos ha significado la pérdida total de viviendas, y en casos extremos, de vidas humanas.

Esta encuesta tiene una duración máxima de 7 minutos. La información recopilada será utilizada en forma estrictamente confidencial y para los fines de este estudio, sin ulterior compromiso para el encuestado. No hay respuestas correctas ni incorrectas. La entrevista se enfocará exclusivamente en su percepción.

¿Está dispuesto(a) a participar? _____

Identificar si es hombre ___ o mujer ___.-

SECCIÓN I

La Región de Valparaíso, es por lejos, la más afectada por los incendios forestales en términos del impacto social y económico directo que compromete seriamente la calidad de vida de su población. Esta es una situación que ocurre con frecuencia, especialmente en épocas de verano, cuyo principal foco se concentra en los sectores de cerros y quebradas de Valparaíso y Viña del Mar.

1. ¿se siente usted afectado(a) por la ocurrencia de incendios forestales?

SI NO

¿De qué manera?

| |
|--|
| |
|--|

2. ¿A su juicio, cuál de los siguientes componentes de su entorno cree usted que es más perjudicado frente a un incendio forestal?

| | |
|---|--|
| Vegetación | |
| Animales | |
| Producción de agua | |
| Paisaje y belleza escénica | |
| Salud y Calidad de vida para la familia | |
| Recreación | |
| Turismo local | |

3. De la pregunta anterior, si tuviera que ordenarlos todos, de mayor a menor importancia, indique cómo sería su criterio.

| | |
|---|--|
| Flora | |
| Fauna | |
| Producción de agua | |
| Paisaje y belleza escénica | |
| Salud y Calidad de vida para la familia | |
| Recreación | |
| Turismo local | |

4. Si usted se viera seriamente comprometido a sufrir los daños directos de un futuro incendio en su vivienda o entorno inmediato, ¿estaría dispuesto a formar parte de un fondo voluntario para financiar un programa local de prevención de incendios en su barrio o comuna?

SI NO ¿Porqué? _____

Si su respuesta es afirmativa, indique un tramo:

_____ menos de \$500 _____ entre \$501 y \$1.000 _____ entre \$1.001 y \$1.500
_____ entre \$1.501 y \$2.000 _____ entre \$ 2.001 y \$2.500 _____ más (indicar)

5. ¿Estaría dispuesto a colaborar voluntariamente en una campaña de prevención local de incendios en su barrio o comuna?

SI NO ¿Porqué? _____

Si su respuesta es afirmativa, indique de qué forma usted podría realizarlo:

| | |
|--|--|
| Con dinero (cuota voluntaria no obligatoria) | |
| Con labores de difusión en terreno | |
| Con trabajo en terreno (podas, limpieas, cortafuegos, etc) | |
| Con otro tipo de ayuda que usted considere útil | |

6. ¿cuánto cree usted que vale su casa actualmente (incluido el terreno)?

_____ menos de \$3.000.000
_____ entre \$3.000.001 y \$5.000.000
_____ entre \$5.000.001 y \$7.000.000
_____ entre \$7.000.001 y \$10.000.000
_____ más (indicar): _____

7. Considere las siguientes actividades que podrían aplicarse en beneficio de mitigar el riesgo y peligro por incendios forestales en su barrio:

- (1) construcción de áreas verdes para niños en sitios eriazos
- (2) habilitación de pequeños parques y plazas de juegos
- (3) limpieza de basurales en quebradas
- (4) limpia, corte y desbroce de matorral en cercanía de casas
- (5) apoyo a la mantención de cortafuegos
- (6) trabajos voluntarios de vigilancia, control o denuncia

Considerando sólo estas opciones y no otras, ordénelas de mayor a menor importancia:

| |
|---|
| Mayor _____ - _____ - _____ - _____ - _____ - _____ Menor |
|---|

8. Respecto a la pregunta anterior, si usted tuviera la opción de aportar voluntariamente a un fondo común que vaya en beneficio de materializar estas actividades y en consecuencia elevar la plusvalía de su espacio habitable por una mejora en el entorno, ¿Cuánto estaría dispuesto a aportar?

_____ no aportaría
_____ menos de \$500 _____ entre \$501 y \$1.000 _____ entre \$1.001 y \$1.500
_____ entre \$1.501 y \$2.000 _____ entre \$ 2.001 y \$2.500 _____ más (indicar)

SECCIÓN II

Los incendios forestales y las áreas silvestres protegidas

Los daños y efectos que puedan ocasionar los incendios forestales no solo comprometen los bienes materiales tales como viviendas, infraestructura, fuentes laborales sino también aquellas áreas de patrimonio silvestre que se ven seriamente afectadas por la propagación del fuego, reflejado en daños a las cuencas hidrográficas, en la erosión de suelos y quebradas, la deforestación, pérdida de biodiversidad, de flora, fauna y vegetación.

1. ¿Conoce los siguientes lugares de la Región? Puede mencionar las que quiera.

- Reserva Nacional Lago Peñuelas
- Parque Nacional La Campana
- Reserva Nacional Río Blanco
- Santuario de la Naturaleza Laguna El Peral
- Reserva Nacional El Yali

2. ¿Recuerda haber visitado alguna vez alguna(s) de estas área(s)?

SI Aproximadamente ¿en qué año? _____ NO

3. Si tuviera que rescatar algún recuerdo o imagen de su(s) visita(s), ¿cuál de estos aspectos le parece familiar? Puede seleccionar más de una.

- (1) Paisaje (belleza escénica / Paisaje agradable)
- (2) Agua (ríos / esteros / aguas limpias / pesca / baño)
- (3) Caminatas y recreación
- (4) Tranquilidad
- (5) Contacto con la naturaleza
- (6) Aire limpio

4. Intente ahora ordenarlos de mayor a menor importancia, de acuerdo a su percepción:

| |
|---|
| Mayor _____ - _____ - _____ - _____ - _____ - _____ Menor |
|---|

5. Estaría dispuesto a visitar nuevamente alguna de estas áreas protegidas?

SI NO ¿porqué? _____

Si su respuesta es afirmativa, indique qué área(s) protegida(s)

| |
|--|
| |
|--|

6. Elija un rango de precio como entrada a las áreas que usted ha visitado. Piense en la belleza y que con su aporte en dinero aportará a la protección de ellas.

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| ___ Debiera ser gratis | ___ No más de \$500 |
| ___ Entre \$501 y \$1.000 | ___ Entre \$1.001 y \$1.500 |
| ___ Más de \$1.500 | ___ Aporte voluntario |

7. De la misma pregunta anterior, si usted tuviera que pagar por entrar, ¿Cuánto pagaría?

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| ___ Debiera ser gratis | ___ No más de \$500 |
| ___ Entre \$501 y \$1.000 | ___ Entre \$1.001 y \$1.500 |
| ___ Más de \$1.500 | ___ Aporte voluntario |

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROTECCIÓN EN ÁREAS CRÍTICAS DE INCENDIOS FORESTALES

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROTECCIÓN EN ÁREAS CRÍTICAS DE INCENDIOS FORESTALES

5.1 Marco general

En los capítulos precedentes se señalaban los distintos aspectos técnicos vinculados a los mecanismos de estimación del riesgo y peligro de incendios forestales, en una zona que históricamente ha sido afectada permanentemente por graves siniestros que han ocasionado enormes pérdidas.

En este capítulo se efectúa una cuantificación de tipo económica, considerando los antecedentes publicados por Rodríguez y Silva *et.al* (2010) y Castillo (2006) para un área de la zona costera de Valparaíso (Chile Central), y que ahora en este capítulo, se amplía para un área de mayor extensión (250 mil hectáreas aproximadamente), con el propósito de extender los resultados preliminares de estos antecedentes, y colocando énfasis en proponer con mayor certidumbre una cuantificación de los daños y efectos ocasionados por la propagación del fuego.

Una primera sección aborda la construcción de una nueva cartografía de modelos de combustibles para Chile Central, considerando los antecedentes derivados del diseño e implementación del simulador de incendios forestales del Sistema KITRAL, como también de las innumerables campañas de campo, entre evaluaciones postfuego y actualizaciones de cartografía vegetal. Como resultado de ello, en la sección 5.2 se presentan cinco componentes que aportan al desarrollo de un modelo integrado de evaluación económica del daño.

5.2 Área de Estudio

El área geográfica se extiende a una superficie aproximada de 262.000 hectáreas, siempre en la región costera de Valparaíso y Viña del Mar, con el propósito de abarcar una mayor diversidad de información territorial, especialmente útil para el análisis de valoración económica y estimación de pérdidas.

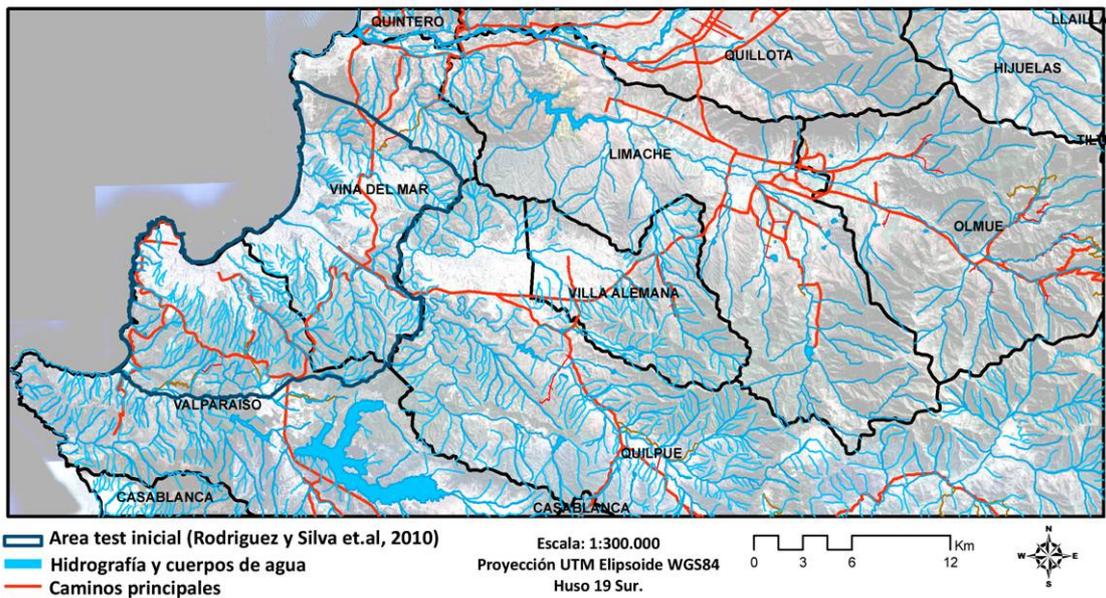


Figura 5.2.1.- Área de estudio. Región de Valparaíso. Chile Central.

Se utilizaron capas de información, tanto de información de tipo vectorial, registros disponibles en bases de datos institucionales e información satelital. Para el análisis geográfico de los datos se consideró la cartografía a Escala 1:50.000 con información de centros poblados, red de caminos, curvas de nivel, hidrografía y cuerpos de agua, límites de comunas e información de toponimia. Adicionalmente se consideró una amplitud mayor de incendios forestales, que corresponden a 7.345 incendios ocurridos entre los años 1997 y 2011, para efectos de calibrar las estimaciones de riesgo, peligro y daños ocasionados por incendios. Para efectos de estudiar la vegetación combustible y su relación con el ambiente, se consideró una serie satelital de escenas procedentes del Sensor MODIS (aqua y terra), y cuyos resultados se indican más adelante.

5.3.- Fase I: Análisis del riesgo y daños ocasionados por incendios, en áreas críticas de ocurrencia.

- Estudio de las variables del comportamiento del fuego: velocidad de propagación lineal del fuego, intensidad calórica y longitud de las llamas. Validación de resultados de Rodríguez y Silva *et.al* (2010), para un área mayor.
- Seguimiento del comportamiento espectral de la vegetación combustible y su relación con la ocurrencia y distribución espacial de los incendios, considerando

índices normalizados de vegetación incluido en el sensor MODIS, y para un período de 7 temporadas de incendios.

- c) Estimación del riesgo de incendios forestales utilizando técnicas de lógica difusa (*fuzzy*), como un método alternativo al tradicional análisis de distancias mediante operadores de vecindad (búfer).
- d) Estimación de pérdidas directas e indirectas en viviendas localizadas en áreas de interfaz urbano-forestal, considerando las actuales normas de valorización y tasación vigentes en la normativa chilena.
- e) Finalmente se expone una estimación matemática para el cálculo de las pérdidas directas ocasionadas por el fuego en los principales tipos de combustibles presentes en Chile Central. Como resultado de esta actividad, se construyen funciones estadísticas que pueden ser incorporadas a un sistema de información geográfica, dentro de un análisis de mayor complejidad.

5.3.1 Variables del comportamiento del fuego

a) Conceptos y métodos aplicados

El Comportamiento del Fuego es un aspecto de gran trascendencia en la iniciación y propagación de los incendios forestales y quemas controladas. Conceptualmente corresponde al "conjunto de efectos, principalmente de carácter físico-mecánicos y químicos, que se observan en el ambiente afectado por la propagación del fuego" (Julio, 2007).

En la práctica, lo anterior se expresa en indicadores numéricos que intentan estimar, entre otros parámetros, la velocidad de avance del fuego, la cantidad de energía liberada, la longitud de las llamas y los mecanismos de transferencia del calor. Conociendo estos valores, es posible disponer de mayores antecedentes para la definición de la modalidad de combate de un incendio forestal y, en el caso de una quema, de las técnicas de encendido y de control de la propagación. En todos los casos, es necesario conocer la topografía del terreno, para pronosticar la dirección de avance y la velocidad que alcanza el fuego en cada tramo de propagación. Si los factores topográficos (pendiente y exposición) y ambientales (velocidad y dirección del viento, principalmente) han sido evaluados correctamente como paso previo, es posible

pronosticar o simular las características que tendrá el incendio forestal. La simulación del comportamiento del fuego ha adquirido una alta connotación en los últimos tiempos, representa un importante apoyo en la toma de decisiones en diversas operaciones de manejo del fuego, especialmente en lo referido a la asignación de recursos en el despacho y en la definición de estrategias y tácticas de combate.

En el capítulo 3, se detalla un modelo de vulnerabilidad contra incendios forestales, considerando la simulación del comportamiento del fuego mediante la utilización del modelo KITRAL. Sus resultados permitieron construir la primera carta de vulnerabilidad a base de un análisis multicriterio para Valparaíso. No obstante, fue necesario ampliar la extensión del área de trabajo, incorporando mayores antecedentes, que es lo que se desarrolla en este capítulo.

Se explican a continuación, tres variables del comportamiento del fuego, que tienen directa relación con los niveles de conflictividad de los incendios, según las condiciones por las cuales se inicien y propaguen. Ellas son: la velocidad de propagación lineal del fuego, la longitud de llamas y la intensidad calórica del fuego.

a.1) Velocidad de Propagación.

Es la tasa de incremento del incendio, que puede ser estimada en términos lineales, perimetrales o en superficie. Es interesante conocerla porque permite estimar el lapso que posiblemente transcurrirá para que un sector del frente del incendio alcance un determinado punto amagado, tal como una casa, bosque valioso, etc. Se acostumbra a estimar la velocidad de avance, en este caso, en metros por segundo o minuto, o bien, en kilómetros por hora.

Según Frandsen (1971), la velocidad de propagación lineal es el resultado de una compleja asociación de variables, en la que intervienen el flujo de calor absorbido por el combustible afectado, la densidad de la cama del combustible, el calor de preignición y la gradiente de intensidad vertical. Este concepto permitió a Rothermel (1983) diseñar un modelo teórico para la velocidad de propagación lineal, aún vigente, basado en el principio de la conservación de la energía en una unidad de volumen de combustible inmediatamente adelante de un frente de avance del fuego, que se expande a través de

una cobertura vegetal homogénea. Estas funciones están incorporadas al simulador de incendios BEHAVE (Burgan y Rothermel, 1984), elaborado por el Servicio de Forestal de Estados Unidos, y también han sido adaptadas para el simulador CARDIN construido en España (Martínez Millán *et.al*, 1990), y posteriormente en una actualización para Visual CARDIN (Rodríguez y Silva *et.al*, 2010).

Para efectos prácticos, el cálculo de la velocidad de propagación puede hacerse de acuerdo a lo propuesto por Julio *et.al* (1995), que señala que ella depende principalmente del modelo de combustible afectado por el incendio, el contenido de humedad de las partículas finas y muertas, la intensidad del viento y la inclinación del terreno. Tentativamente, en terreno, para los casos en que no se disponga de un simulador, puede emplearse una fórmula simplificada de la velocidad de propagación lineal, consistente en:

$$Vp = (Fmc) (Fch) (Fp + Fv)$$

Vp : Velocidad de Propagación (en metros por segundo)
Fmc, Fch, Fp y Fv : Factores *Modelo de Combustible, Velocidad del Viento, Pendiente y Contenido de Humedad de la Vegetación Fina*. Los valores de estos factores se determinan mediante el empleo de tablas.

a.2) Intensidad calórica

Otro parámetro que se estudia en el comportamiento del fuego, corresponde a la intensidad calórica, y que se define como la tasa de energía liberada por unidad de tiempo y unidad de longitud del frente de avance del incendio. Su cálculo se acostumbra efectuarlo de acuerdo a la fórmula de Byram (1957):

$$I = H * w * r$$

I : Intensidad Calórica (kilocalorías/metro/segundo)
H : Poder Calorífico del Combustible (kilocalorías/kilogramo)
w : Peso del Combustible Disponible (kilogramo/metro²)
r : Velocidad de Propagación Lineal (metro/segundo)

a.3) *Longitud de llama*

El proceso de combustión, depende de las condiciones de ignición o encendido de los gases combustibles que se liberan en la destilación de los materiales leñosos cuando se encuentran sometidos a altas temperaturas. Tanto en incendios como en quemas, se generan básicamente dos etapas: a) el *Flujo de Calor Radiante Horizontal*, responsable del presecado y precalentamiento de los materiales combustibles cercanos a la llama y b) la *Longitud de la Llama*, la cual mantiene una relación directa con la intensidad calórica, y afecta significativamente al dinamismo de la columna de convección. Se acostumbra a calcularla mediante la fórmula modificada de Albin (1976):

$$L = 0.1477 * (I)^{0.46}$$

En la expresión anterior, L es la longitud de la llama, en metros; e I , la intensidad calórica, en kilocalorías por metro y por segundo.

b) *Resultados*

Se exponen las comparaciones estadísticas para estos tres parámetros, considerando el desarrollo del Proyecto SEVEIF (Rodríguez y Silva *et.al*, 2010), y la actualización de información considerando el área descrita en la figura 5.2.1. Los valores generados fueron analizados mediante una prueba no paramétrica de Wilcoxon para datos apareados, considerando 2 muestras: los resultados generados por el proyecto SEVEIF para cada una de las variables, y los obtenidos de las sucesivas simulaciones con datos ampliados, utilizando el simulador de expansión de incendios forestales KITRAL y con el propósito de determinar si existe una tendencia general sobre la base de antecedentes locales, es decir, si los fenómenos de propagación del fuego presentan similitudes al comparar dos escalas geográficas: 1: 50.000 y 1:250.000.

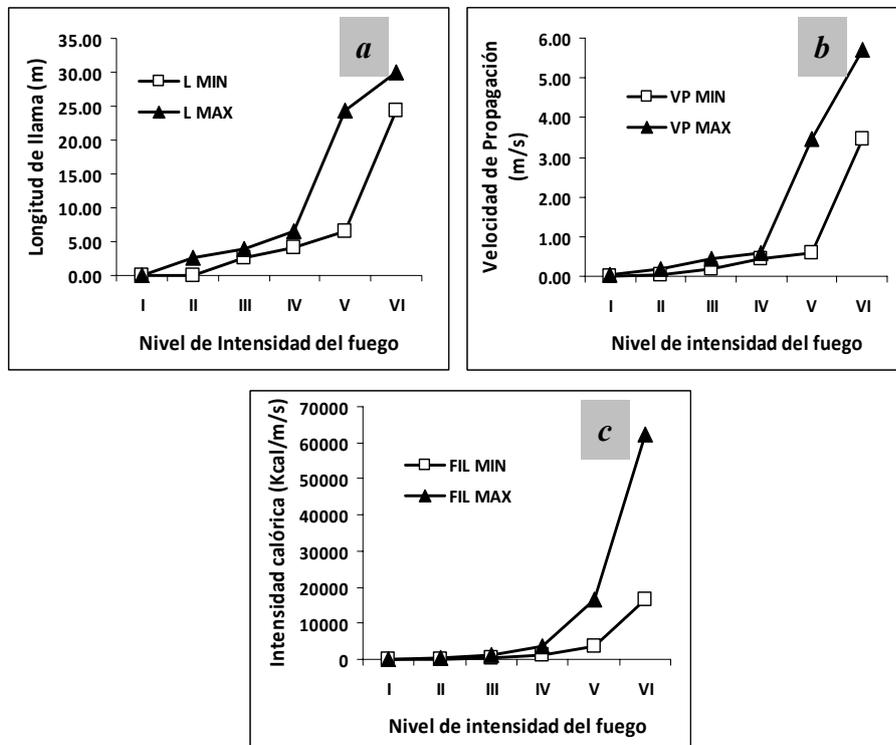
En el cuadro 5.3.1.a, se exponen los resultados para las dos escalas geográficas. No obstante se aprecian similitudes en la comparación estadística (ver Anexo1), conviene señalar que la tendencia espacial confirma que las áreas más conflictivas, se localizan en torno a la interfaz, con extensiones variables dependiendo de la conformación de la topografía y el material vegetal combustible. Los niveles de intensidad calórica (NIC) fueron clasificados en seis categorías, para poder determinar los niveles de variación de

la velocidad de propagación lineal del fuego (VP) y la longitud de llamas (L). A una escala de 1:250.000, el comportamiento del fuego muestra niveles bajos (NIF I a IV), asociados principalmente a sectores con topografía plana a ondulada, y vegetación de tipo matorral abierto. En las áreas asociadas a cercanía de caminos, cursos de agua e interfaz, el comportamiento tiende a mostrar niveles más altos (gráficos 5.3.1.a, b, y c). Se ilustra un ejemplo en la figura 5.3.1.a., mediante una muestra de los sectores de Valparaíso y Quilpue.

Cuadro 5.3.1.a.- Valores de Intensidad del fuego, segmentados en 6 clases.
Área de trabajo: 242.000 hectáreas. Región de Valparaíso.

| NIF | L (m) | | VP (m/s) | | NIC | |
|-----|-------|-------|----------|------|-----------|-----------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX |
| I | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 58,41 |
| II | 0,10 | 2,59 | 0,02 | 0,19 | 58,41 | 506,31 |
| III | 2,60 | 4,02 | 0,19 | 0,44 | 506,31 | 1.322,98 |
| IV | 4,03 | 6,52 | 0,44 | 0,58 | 1.322,98 | 3.770,87 |
| V | 6,53 | 24,45 | 0,58 | 3,45 | 3.770,87 | 16.770,00 |
| VI | 24,45 | 30,00 | 3,45 | 5,70 | 16.770,00 | 62.428,00 |

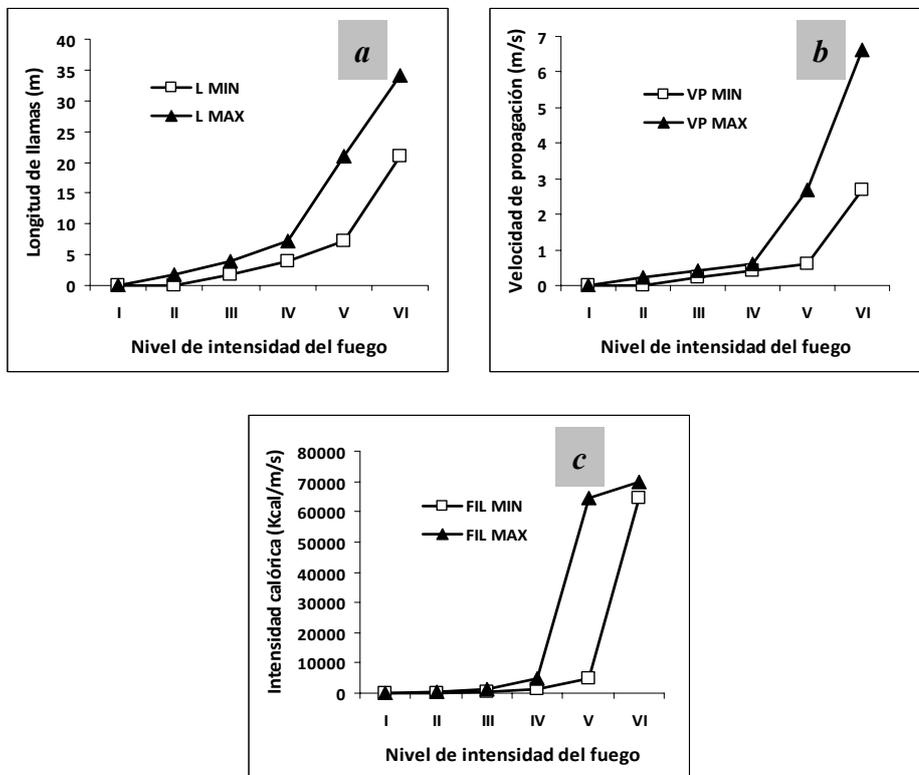
Gráficos 5.3.1.a, b, c. Valores mínimos y máximos para los parámetros de comportamiento del fuego. Escala: 1:250.000.



Cuadro 5.3.1.b.- Valores de Intensidad del fuego, segmentados en 6 clases.
Área de trabajo: 22.000 hectáreas. Región de Valparaíso.

| NIF | L(M) | | VP(M/S) | | NIC | |
|-----|-------|-------|---------|-------|-----------|-----------|
| | MIN | MÁX | MIN | MÁX | MIN | MÁX |
| I | 0,00 | 0,088 | 0,00 | 0,017 | 0,00 | 71,07 |
| II | 0,088 | 1,77 | 0,017 | 0,212 | 71,07 | 444,52 |
| III | 1,77 | 3,99 | 0,212 | 0,411 | 444,52 | 1.277,04 |
| IV | 3,99 | 7,12 | 0,411 | 0,601 | 1.277,04 | 4.812,37 |
| V | 7,12 | 21,01 | 0,601 | 2,67 | 4.812,37 | 64.331,01 |
| VI | 21,01 | 34,04 | 2,67 | 6,61 | 64.331,01 | 70.000,00 |

Gráficos 5.3.2.a, b, c. Valores mínimos y máximos para los parámetros de comportamiento del fuego. Escala: 1:250.000. Área SEVEIF (Rodríguez y Silva *et.al*, 2010).



La comparación estadística para los tres parámetros (anexo I), muestra que no existen diferencias significativas entre el comportamiento del fuego a escala 1:50.000 como a 250.000. Ello se atribuye principalmente a que las condiciones del entorno por las cuales se efectúan las simulaciones, presentan una continuidad espacial que sólo se ve alterada por la incidencia del número de incendios en áreas de interfaz. En las siguientes figuras se ilustra el efecto combinado de la velocidad de propagación y los niveles de intensidad calórica que alcanza el fuego. En ambos casos los mayores valores se concentran en áreas densamente pobladas, principalmente porque la cantidad de energía disponible en los materiales combustibles es mucho mayor para estos sectores.

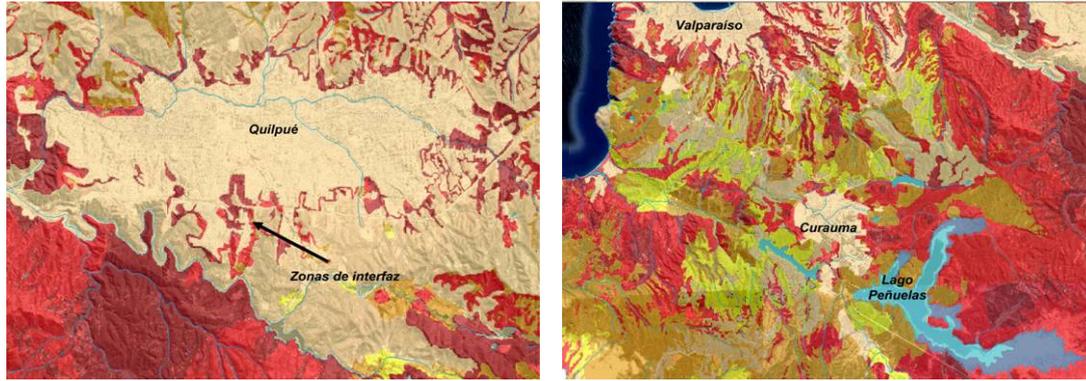


Figura 5.3.1.a.- Valores de Niveles de Intensidad Calórica (NIC) para dos áreas test de la Región de Valparaíso. Izquierda: se enfatizan las áreas de interfaz. Derecha: una visión a menor escala, en donde se ve la concentración de valores altos en los cerros de Valparaíso. Las áreas más rojas indican mayor actividad en cuanto a velocidad de propagación del fuego y longitud de llama. En ambas escalas (SEVEIF), no existen diferencias significativas, por lo cual los valores calculados en ambas etapas son representativos para el área completa bajo estudio.

5.3.2. Comportamiento espectral de la vegetación combustible

La ocurrencia de incendios forestales en la región, no solo puede ser estudiada por los registros históricos, sino que además, por los antecedentes reportados a través de imágenes de satélite e información meteorológica asociada. En áreas permanentemente afectadas por el fuego es posible identificar patrones de comportamiento espectral de la vegetación, interpretada a través de la actividad fotosintética y la medición de áreas quemadas. De esta manera, es posible medir y cuantificar grados de afectación post fuego, incluso semanas después de haber ocurrido el incendio.

En este estudio, se efectuó un seguimiento de la actividad fotosintética de la vegetación combustible sobre la base de imágenes del Sensor MODIS (Aqua, Product MYD13Q1), considerando las bandas 1 y 2 (250 - 500 metros, respectivamente), en proyección sinusoidal transformada a UTM. Las bandas antes mencionadas contienen información respecto a los indicadores EVI y VI quality, a una resolución temporal de 16 días. La elección de este tipo de producto ha sido basada en referencias científicas de Huete *et.al*, (2002), Gu *et.al*, (2009), y Veraverbeke *et.al*, (2010), quienes comparan la actividad fotosintética de distintas cubiertas vegetales afectadas por incendios, y también en áreas aptas para cultivos agrícolas, considerando entre otros aspectos, variables de tipo biofísicas y radiométricas.

MODIS permite obtener el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y el índice de realce de vegetación (Enhanced Vegetation Index – EVI). El NDVI actúa como una extensión al análisis de la reflectancia proporcionada por el Sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). En síntesis, este índice se expresa como $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$, donde ρ_{NIR} y ρ_{red} corresponden a las bandas de reflectancia de MODIS. Una variante a lo anterior es un indicador que incluye corrección atmosférica mediante la inclusión de parámetros que reducen los efectos de fondo en la imagen y las superficies de aerosoles. La expresión, denotada por $EVI = G\{(\rho_{NIR} - \rho_{red}) / [\rho_{NIR} + C_1(\rho_{red}) - C_2(\rho_{blue}) + L]\}$, cuyos parámetros nuevos corresponden a factores de ajuste ($L=1$), y coeficientes de aerosoles (C_1 y C_2) utilizados a una resolución de 500 en la banda azul para corregir las influencias de la banda roja. G es un factor de ganancia, estipulado para estas imágenes, en un valor de 2,5.

La captura de imágenes se realizó entre los años 2004 y 2009, considerando 16 días espaciados, considerando la temporada de incendios forestales presente en la región bajo estudio (cuadro 5.3.2.a). En cada caso se efectuaron los procesamientos y georeferencias necesarias para construir un mosaico continuo de imágenes. Un ejemplo de estas escenas MODIS, y la base de datos de incendios considerada, se ilustra en la figura 5.3.2.a.

Cuadro 5.3.2.a.- Secuencia de imágenes MODIS para el área bajo estudio.
Bandas 1 (EVI); 2 (VI Quality). 250-500m. Aqua (MYD13Q1). Proyección UTM, Elipsoide WGS84 Huso 19s.

| Año | Día del año (0-360) |
|------|--|
| 2004 | 345 (Dic), 361 (Dic) |
| 2005 | 009 (Ene), 025 (Ene), 041 (Feb), 057 (Feb), 345 (Dic), 361 (Dic) |
| 2006 | 009 (Ene), 025 (Ene), 041 (Feb), 057 (Feb), 345 (Dic), 361 (Dic) |
| 2007 | 009 (Ene), 025 (Ene), 041 (Feb), 057 (Feb), 345 (Dic), 361 (Dic) |
| 2008 | 009 (Ene), 025 (Ene), 041 (Feb), 057 (Feb), 345 (Dic), 361 (Dic) |
| 2009 | 009 (Ene), 025 (Ene) |

Para cada temporada de incendios, y considerando los valores EVI (rango -1, +1), se estudió una base de datos histórica de incendios forestales ocurrida en el período bajo análisis, considerando especialmente aquellos incendios de gran magnitud y aquellos catalogados como alerta roja. Los valores EVI adquiridos en cada imagen del cuadro 5.3.2.a, se presentan en el anexo II. De esta manera, fue posible establecer aquellas áreas críticas por las cuales el paisaje vegetal sufre permanentes alteraciones en el

estado de las cubiertas vegetales. En primera instancia, estos resultados iniciales pueden contribuir a valorizar de mejor forma el estado inicial del territorio bajo múltiples objetivos de protección.

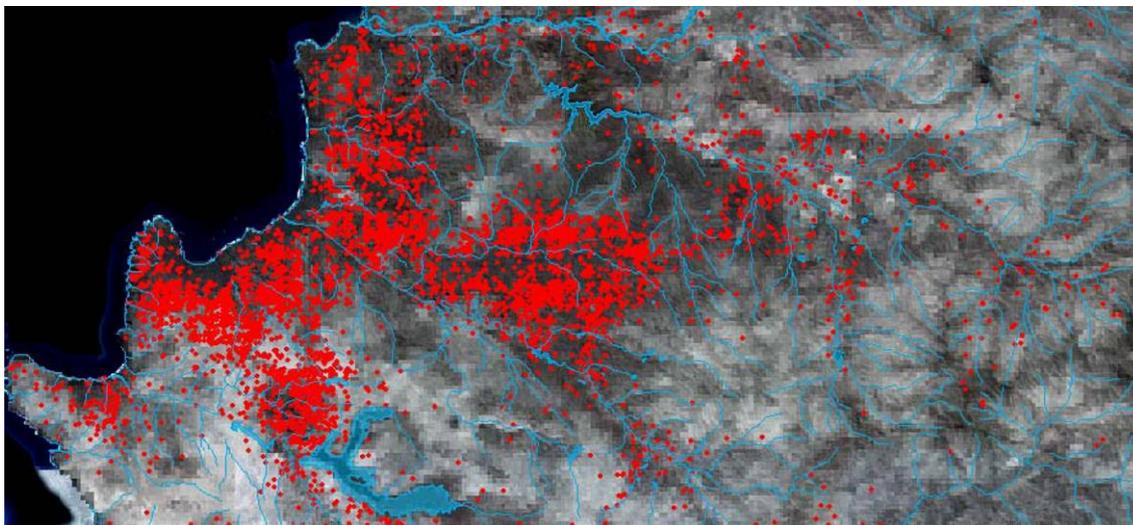
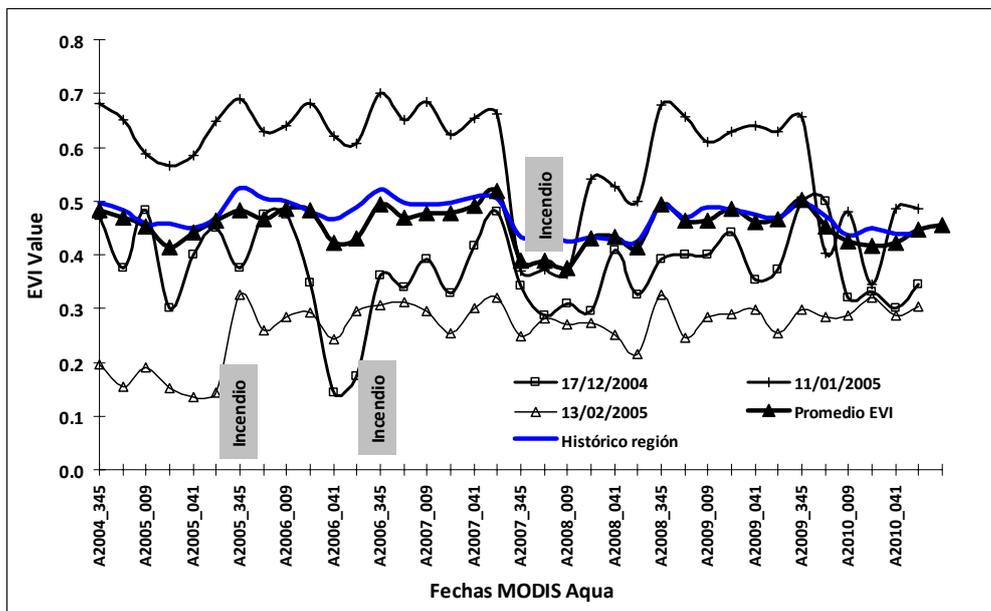


Figura 5.3.2.a.- Escena MODIS (Aqua) para el año 2004. En rojo se muestra la concentración histórica de incendios forestales. Un grupo de ellos – los que presentaron mayor conflictividad – son incorporados al análisis EVI. Las áreas más oscuras representan áreas con baja actividad, o permanentemente afectadas por el fuego. Fuente: Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Chile.

El propósito de este análisis fue establecer algún patrón de comportamiento de EVI post fuego, considerando que la vegetación en el área de estudio presenta alta actividad regenerativa – a base de las visitas a campo – especialmente en aquellos sectores de vegetación nativa densa repoblados con matorral arbustivo bajo (Castillo, 2006; Quintanilla y Castillo, 2009).

La base cartográfica de incendios contempló una selección de 158 eventos catalogados de alta conflictividad y alerta roja, con tamaños superiores a 5 hectáreas, y con principales afectaciones a matorral nativo y vegetación arbórea densa. En el análisis se localizó cada foco de inicio, superponiendo los valores de EVI en períodos sucesivos, para determinar el comportamiento de la recuperación vegetal a base de la actividad fotosintética en las bandas 1 y 2 de MODIS. El siguiente gráfico muestra una tendencia, a modo de ejemplo, para tres incendios forestales de magnitud, que afectaron localizaciones de la región costera de Valparaíso.

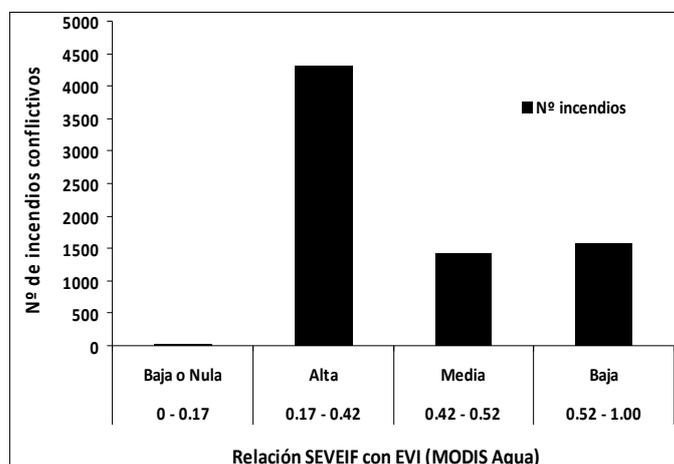
Gráfico 5.3.2.a.- Tendencia de valores EVI antes y después de incendios. Tres casos de análisis. Se ilustra el promedio para la Región y su valor histórico.



Una revisión de los valores EVI, muestra un comportamiento estacional en los meses de verano (día 345, en diciembre – día 41, en febrero), que es altamente variable, dependiendo de las condiciones meteorológicas que repercuten en el estado de la vegetación combustible viva. Entre estas fechas aproximadamente, ocurre la mayor cantidad de incendios forestales en la Región de Valparaíso, acrecentando la estadística de densidad de incendios por unidad de superficie. Haciendo un seguimiento a tres incendios forestales localizados en distintas posiciones del área bajo estudio, se describe un alza en la variación de EVI post incendio, precedido de bajos valores, presumiblemente por la susceptibilidad de la vegetación a la ignición e inflamabilidad. Veraberbeke *et.al*, (2010) efectúan estudios de similares características, aplicando índices de diferencia normalizada (*dNBR*) muestran oscilaciones en las condiciones de severidad antes y post incendios, debido presumiblemente a la oscilación natural que presentan los ecosistemas de tipo mediterráneo. Realizando una medición a través de toda la serie MODIS, se encuentra una media de $0,424 \pm 0,017$ y $0,523 \pm 0,031$, valores presumibles de encontrar en ecosistemas con alta capacidad de regeneración postfuego. Por otro lado, las afectaciones y el nivel de daño producido, podría estimarse en forma indirecta considerando la relación de la cantidad de incendios sucesivos ocurridos en un área determinada y los valores EVI alcanzados antes y después del fuego. En el gráfico

5.3.2.b, y cuadro 5.3.2.b, se ilustran los valores, clasificados en 4 categorías, separados por la desviación estándar de la muestra (número de incendios).

Gráfico 5.3.2.b.- Comparación de los valores EVI (MODIS Aqua), en función de la cantidad de incendios conflictivos. Área de 225.000 hectáreas.



Los valores EVI en densidad alta de incendios, tienden a concentrarse en los sectores densamente poblados de Valparaíso y Viña del Mar, como asimismo en la interfaz de Quilpue. Lo anterior coincide espacialmente con lo reportado por Rodríguez y Silva *et.al*, (2010), para los mismos sectores, pero sin considerar información satelital.

Cuadro 5.3.2.b.- Relación EVI y número de incendios, de acuerdo al proyecto SEVEIF y los antecedentes reportados para los incendios más conflictivos.

| Rango EVI | Asociación con SEVEIF | Nº incendios |
|-------------|-----------------------|--------------|
| 0 - 0.17 | Baja o Nula | 30 |
| 0.17 - 0.42 | Alta | 4314 |
| 0.42 - 0.52 | Media | 1416 |
| 0.52 - 1.00 | Baja | 1573 |

En general, la cantidad de incendios, sus grados de afectación y la localización de ellos respecto a la variación de valores de actividad fotosintética podrían ser considerados para la construcción de un índice de severidad estacional, tal como se ha hecho para el estudio de la productividad en cultivos (Sakamoto *et.al*, 2010; Wardlow y Egbert, 2008), y la comparación que estos mismos autores realizan respecto a las diferencias posibles de encontrar entre EVI y NDVI.

5.3.3 *Estimación del riesgo de incendios. Análisis ampliado.*

El área considerada para el proyecto SEVEIF (Rodríguez y Silva *et al*, 2010), estima el riesgo de incendios forestales a base de un modelo de vulnerabilidad que considera, entre otras variables, la ocurrencia histórica y la red de caminos. En un análisis posterior, se explicaba la metodología fuzzy para el territorio que compromete las áreas de Valparaíso y Viña del Mar. En esta sección, se amplía el cálculo del riesgo hasta una extensión de 225.000 hectáreas, que cubre además de las áreas señaladas, sectores protegidos como la Reserva Nacional Lago Peñuelas, al sur del cuadrante de análisis, y localidades como Curauma y Quilpue, entre otras, con una alta ocurrencia de incendios forestales.

El proceso se inicia de la misma forma que lo explicado en el capítulo 3. Se consideran las capas de información vinculadas al Riesgo de inicio de incendios, relacionado a las tres variables antes mencionadas, pero ahora con el objetivo de comparar sus resultados con los obtenidos a una escala menor. En este caso, se comparan los resultados SEVEIF escala 1:50.000 con el área ampliada, escala 1:250.000. Los valores de impacto para el componente de Riesgo fueron determinados de acuerdo al siguiente conjunto de pasos:

- a) Extracción de la base de datos de incendios, aquellos registros calificados con niveles de alerta normal, amarilla y roja. En los tres casos, los protocolos de atención para las labores de defensa y combate son distintos, pues considera, entre otros criterios, la asignación de recursos y la valoración potencial de los daños en función de la propagación del fuego y bienes involucrados.
- b) Cálculo de la metodología fuzzy para el área ampliada (escala 1:250.000): se aplican las funciones de pertenencia (membresía), en función de las distancias obtenidas para el análisis a escala 1:50.000, y los ponderadores aplicados para el umbral de la función sigmoidea (ver capítulo 3). Como resultado se obtiene una primera aproximación de las zonas de riesgo.
- c) Reclasificación de los valores obtenidos mediante la construcción de un histograma de frecuencias. En función de las clases obtenidas, se efectúa la comparación de resultados entre ambas escalas de análisis. Para este propósito se plantea la hipótesis de igualdad de medias, utilizando comparaciones pareadas de Wilcoxon.

- d) Generación de la cartografía de riesgo potencial, a escala ampliada. Estos resultados presentan la ventaja que pueden ser integrados a un modelo de mayor complejidad, tal como se ha hecho con el análisis de vulnerabilidad propuesto por Rodríguez y Silva *et al*, 2010.

Resultados

Se consideraron 1991 incendios calificados en las tres categorías, formando una base de datos ilustrada en el cuadro 5.3.3.a. Para cada registro, se efectuó una extracción de los valores fuzzy obtenidos, y también, la calificación obtenida de SEVEIF, con el propósito de comparar valores.

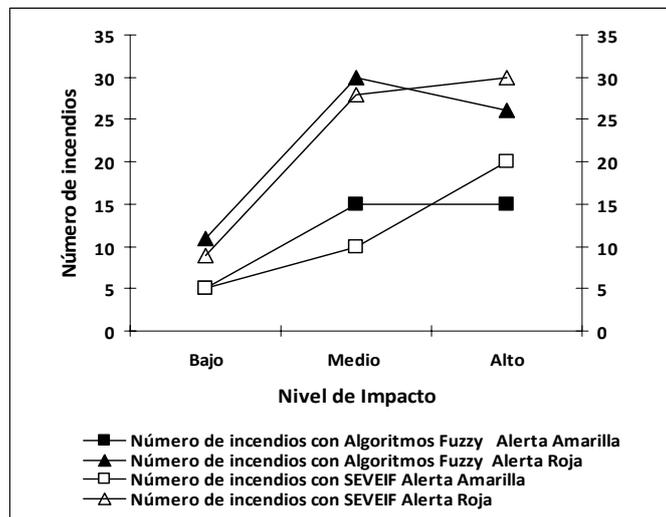
Cuadro 5.3.3.a.- Base de datos de incendios. Ejemplo para los primeros 18 de 1991 registros.

| Temporada | Categoría | Utm_X | Utm_Y | Sup_quem | RangoSup | Impacto Fuzzy | Nivel | Raster Value | Seveif | Prioridad |
|-----------|-----------|--------|---------|----------|-------------|---------------|-------|--------------|--------|-----------|
| 2001 | NORMAL | 258505 | 6332675 | 0.100000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 31 | 3 | Baja |
| 2007 | NORMAL | 259909 | 6332724 | 0.020000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 149 | 2 | Media |
| 2006 | NORMAL | 259722 | 6332740 | 0.250000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 149 | 2 | Media |
| 2007 | NORMAL | 259988 | 6332782 | 0.120000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 149 | 2 | Media |
| 2009 | NORMAL | 259945 | 6332814 | 0.070000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 149 | 2 | Media |
| 2005 | NORMAL | 259601 | 6332826 | 0.200000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 149 | 2 | Media |
| 2005 | NORMAL | 259391 | 6332863 | 0.020000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 139 | 2 | Media |
| 2006 | NORMAL | 259572 | 6332924 | 0.040000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 139 | 2 | Media |
| 2007 | NORMAL | 259061 | 6332984 | 0.200000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 91 | 2 | Media |
| 2006 | NORMAL | 259154 | 6333227 | 0.060000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 119 | 2 | Media |
| 2009 | NORMAL | 258116 | 6333244 | 0.010000 | 0,01 a 5,00 | 1 | Bajo | 41 | 3 | Baja |
| 2009 | NORMAL | 258487 | 6333337 | 1.500000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 31 | 3 | Baja |
| 2001 | NORMAL | 260423 | 6333354 | 0.020000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 91 | 2 | Media |
| 2005 | NORMAL | 259314 | 6333357 | 0.120000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 119 | 2 | Media |
| 1999 | NORMAL | 259126 | 6333403 | 0.020000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 109 | 2 | Media |
| 2005 | NORMAL | 251801 | 6333453 | 0.300000 | 0,01 a 5,00 | 2 | Medio | 61 | 3 | Baja |
| 1997 | NORMAL | 259040 | 6333465 | 0.030000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 109 | 2 | Media |
| 2007 | NORMAL | 259036 | 6333495 | 0.040000 | 0,01 a 5,00 | 3 | Alto | 109 | 2 | Media |
| : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | : |
| : | : | : | : | : | : | : | : | : | : | : |

En el cuadro anterior, la columna SEVEIF corresponde al nivel de calificación del riesgo para ese estudio, *RasterValue* es el valor fuzzy del píxel o celdilla para la localización del incendio, *RangoSup* es el rango o tamaño de clase que alcanzó el incendio. Por último, la columna *Prioridad*, califica el incendio en función de la aplicación del modelo de vulnerabilidad, aplicado a escala 1:50.000 (Rodríguez y Silva *et al*, 2010).

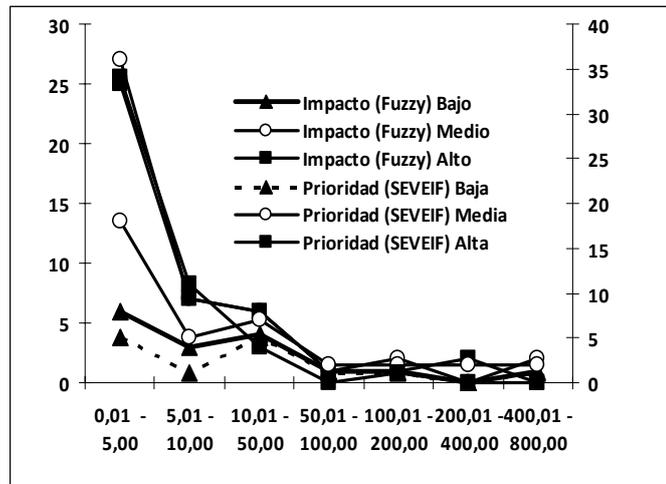
Mediante la elaboración de una tabla dinámica, se efectuaron las contabilizaciones de incendios, tanto por categoría de tamaño, como por nivel de impacto para el área fuzzy, ahora considerando un área equitativa, para efectos de efectuar comparaciones bajo una misma base geográfica. Los resultados presentados inicialmente, presumen una similitud en el comportamiento de las frecuencias, para cada tipo de nivel de impacto (gráfico 5.3.3.a). Estos resultados tienden a corroborar la tendencia espacial de la ocurrencia de incendios forestales, reportada en otros estudios para el área (Castillo *et al*, 2011)

Gráfico 5.3.3.a.- Comportamiento espacial del nivel de impacto en el área de estudio, clasificado por número de incendios. Base muestral: 1991 incendios (temporadas 1997-2011).



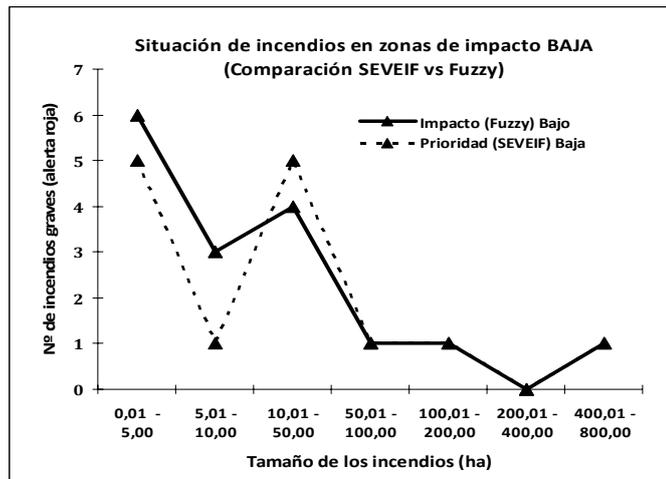
Se aprecia que el nivel de impacto tiende a concentrarse en la categoría “*medio*”, atribuible principalmente a la localización de la ocurrencia en áreas de alta frecuencia, y que ya han sido castigadas por frecuentes incendios. Por lo general, la calificación “*alto*” está más asociada a incendios de rápida propagación y que comprometen principalmente grandes extensiones de matorral y arbolado nativo. En otros casos, suele ser calificado de esta manera cuando existe la amenaza a áreas de interfaz. En el siguiente gráfico se ilustra el comportamiento de la Prioridad de Protección aplicada para SEVEIF, en función del número de incendios y también de la categoría de tamaño de los mismos. Tal como se ve en el gráfico 5.3.3.a, se aprecia una similitud en las tendencias.

Gráfico 5.3.3.b.- Tendencias del número de incendios localizados en áreas de impacto. Se ilustra el impacto fuzzy versus el nivel de prioridad calificado en SEVEIF.



Las categorías más importantes de analizar son justamente aquellas que concentran incendios de gran tamaño. Por lo general, ambos métodos coinciden en demostrar que el nivel de prioridad se concentra en áreas de escasa ocurrencia pero de altos impactos para aquellos incendios de gran tamaño. Estos resultados son previsibles, al revisar la tendencia en la región para los últimos 25 años, en donde el tamaño medio de los incendios forestales no superan las 13,5 hectáreas; no obstante, la ocurrencia concentra más de un 85% de los daños en aquellos pocos incendios que superan las 50 hectáreas, y que generalmente se encuentran asociadas a propagación rápida del fuego, en áreas de interfaz, o bien afectando a extensas áreas de matorral y arbolado nativo. Similar análisis, pero ahora considerando la relación “*nivel de alerta*” con “*clase de tamaño*” de los incendios, es analizada para cada nivel de impacto, tanto en SEVEIF como en el área ampliada utilizando la metodología fuzzy. Las tendencias tienden a ser algo distintas al revisar clases de incendios pequeñas, para luego establecerse algunas relaciones espaciales a medida que los incendios son de mayor tamaño. En el gráfico 5.3.3.c se ilustra lo que ocurre en aquellos registros calificados en “*alerta roja*”. El nivel de impacto (“*bajo*” para la primera gráfica), considera más incendios en alerta roja, hasta la clase 5-10 hectáreas, mientras que al aumentar la clase de tamaño, ambos criterios tienden a establecer una misma tendencia. Ello supone una vía alternativa para modelar el riesgo de incendios considerando los niveles de alerta. En la actualidad no existen referencias en Chile que consideren esta relación desde una perspectiva geográfica.

Gráfico 5.3.3.c.- Tendencia de la zona de impacto “baja”, para las categorías de tamaño y número de incendios en alerta roja.



Respecto a la categoría de impacto “alta”, los análisis muestran una tendencia similar, concentrando ambas metodologías sus resultados a áreas mayores, que justamente conforman la menor cantidad de incendios en “alerta roja”. Una revisión a la base de datos inicial, muestra que espacialmente estos sectores se localizan en el cinturón de la interfaz en áreas de Valparaíso. Viña del Mar, y Quilpué (figura 5.3.3.a). En el siguiente gráfico, las clases de tamaño por tipo de alerta tienden a estabilizarse para incendios entre 5-10 hectáreas, con una frecuencia del orden de 7 incendios en alerta roja. Con estos antecedentes es posible construir una capa geográfica de datos que permite estimar monetariamente las pérdidas potenciales considerando el nivel de riesgo y el nivel de alerta que alcanzan los incendios.

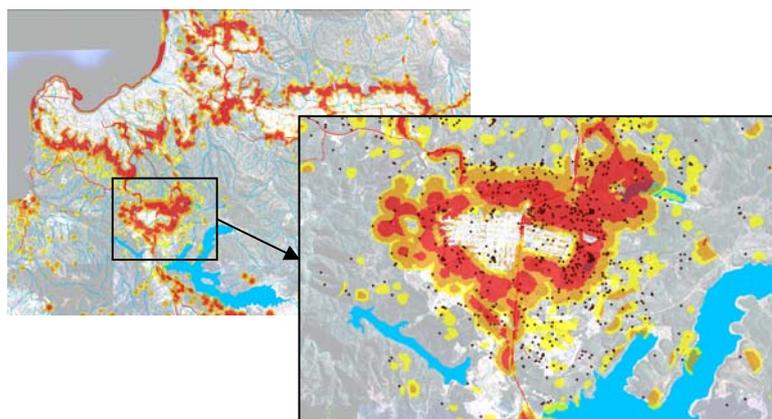
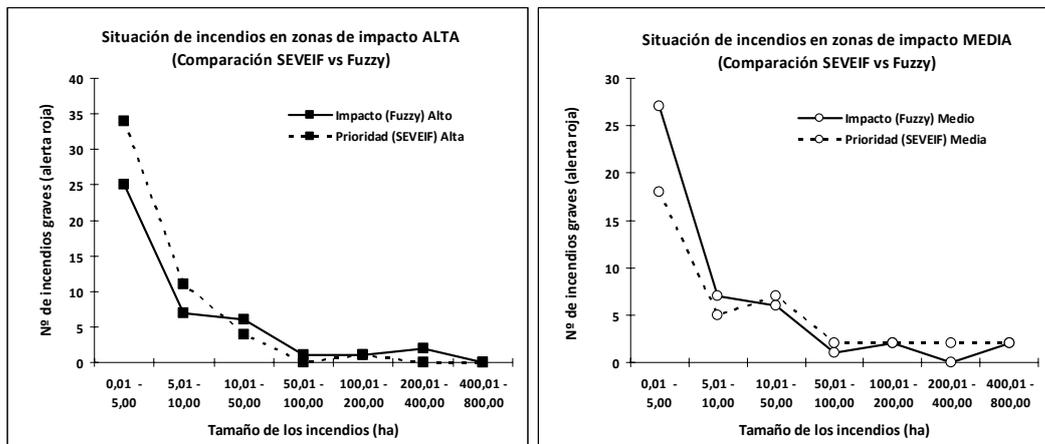


Figura 5.3.3.a.- Realce de las principales áreas de riesgo de incendios forestales para la zona de Valparaíso. En cuadro ampliado se muestra el efecto de la interfaz en la calificación del riesgo. Las áreas más oscuras (tonalidades rojas) están asociadas a terrenos con alta ocurrencia y cercanía de viviendas. Los incendios (marcados con puntos) tienden a concentrarse en las vías de comunicaciones y áreas de mayor vulnerabilidad.

Gráfico 5.3.3.d.- Tendencia de la zona de impacto “alta” (izquierda), y “media” (derecha), para las categorías de tamaño y número de incendios en alerta roja.



Considerando ahora la combinación comparativa de los tres niveles de alerta, es posible señalar que el método fuzzy para el área de estudio presenta valores más equilibrados para las tres categorías, lo que en la práctica supone una ganancia en la eficiencia monetaria para la determinación de las áreas de riesgo. Por lo general, los mayores niveles de gasto se concentran justamente al tratar de proteger territorios cuyo valor potencial a proteger supera por muchas veces el nivel de presupuesto disponible para la prevención y combate. Por tal razón es de suma importancia considerar la eficiencia en el gasto, mediante la expresión espacial del riesgo y también el peligro, este último expresado en el comportamiento potencial que alcanza el fuego una vez que se ha iniciado.

El análisis estadístico de los datos considera en primer lugar, la comparación de medias pareadas obtenidas de los dos tipos de análisis (cuadro 5.3.3.b), de acuerdo a las categorías de tamaño para los 1991 incendios analizados. Se calculó la varianza de T de Wilcoxon teniendo en cuenta las diferencias absolutas. Los resultados estandarizados respecto a la ley normal y $p=0,05$ indica que no existen diferencias significativas entre ambas muestras (anexo II). Dicho de otro modo, las predicciones basadas en las dos metodologías llegan a resultados muy similares, lo cual ratifica el trabajo de Rodríguez y Silva *et al* (2010).

Cuadro 5.3.3.b.- Prueba de comparación de muestras pareadas entre Fuzzy y SEVEIF.

| Tamaño del incendio (ha) | Impacto (Fuzzy) | | | Prioridad (SEVEIF) | | |
|--------------------------|-----------------|-------|------|--------------------|-------|------|
| | Bajo | Medio | Alto | Baja | Media | Alta |
| 0,01 - 5,00 | 6 | 27 | 25 | 5 | 18 | 34 |
| 5,01 - 10,00 | 3 | 7 | 7 | 1 | 5 | 11 |
| 10,01 - 50,00 | 4 | 6 | 6 | 5 | 7 | 4 |
| 50,01 - 100,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 100,01 - 200,00 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 200,01 - 400,00 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 400,01 - 800,00 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 |

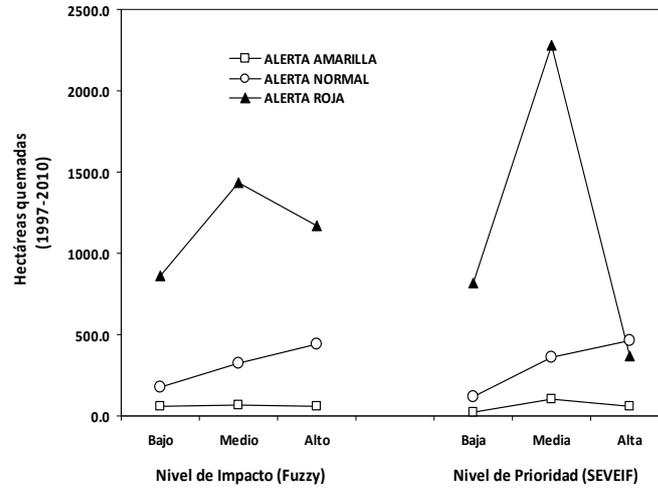
Similares resultados se obtuvieron mediante la comparación de k muestras independientes (Kruskal-Wallis), asumiendo una distribución tipo Chi-cuadrado. Considerando $p=0,05$, también se concluye que la diferencia entre ambas muestras – en este caso la frecuencia de incendios para las categorías baja/media/alta, entre ambos métodos – no es significativa. Los niveles de alerta son comparados entre sí. Se verifica que la aplicación de la metodología fuzzy permite un ahorro en las áreas de gestión en el territorio, calificando de igual manera el riesgo de incendios para los eventos calificados en los tres niveles de alerta (cuadro 5.3.3.c).

Cuadro 5.3.3.c.- Superficie estimada por categorías de impacto, para ambos métodos.

| Nivel de alerta | Fuzzy | | | SEVEIF | | |
|-----------------|---|----------------|----------------|---|----------------|--------------|
| | Sup. quemada por categorías de impacto (ha) | | | Sup. quemada por categorías de prioridad (ha) | | |
| | bajo | medio | alto | baja | media | alta |
| Normal | 174,9 | 325,7 | 441,7 | 119,3 | 358,3 | 464,6 |
| Amarilla | 61,0 | 67,8 | 58,2 | 23,5 | 102,4 | 61,1 |
| Roja | 857,4 | 1.435,0 | 1.167,8 | 817,0 | 2.276,6 | 366,3 |
| Totales | 918,4 | 1.502,8 | 1.226,0 | 840,5 | 2.379,0 | 427,4 |

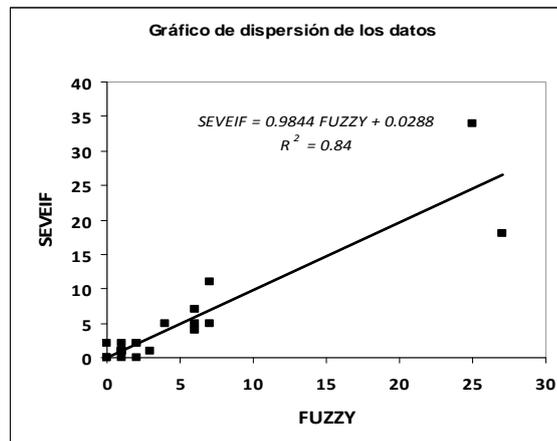
El cuadro anterior muestra claramente que las mayores intersecciones logradas para la determinación de las áreas de riesgo de incendios en incendios calificados en alerta roja, se logran con la metodología fuzzy, en relación a lo determinado con SEVEIF. Ello considera entonces la conveniencia de establecer claramente los umbrales de distancias por los cuales la variación en la densidad de incendios se hace significativa, conforme aumenta o disminuye la cercanía con las áreas de interfaz y los caminos. Esto mismo se ve reflejado en el gráfico 5.3.3.e.

Gráfico 5.3.3.e.- Tendencias en el número de incendios considerado para los distintos niveles de alerta de incendios, en relación a la superficie afectada.



Como comentario general, puede indicarse que ambos métodos aportan significativamente a la modelación de la vulnerabilidad contra incendios forestales a base de un análisis multicriterio. Los resultados han sido probados a dos escalas, mostrando similares tendencias espaciales, en donde la variable más significativa en la modelación de los resultados, es la relación de la cantidad de incendios conflictivos, versus la categoría de tamaño y la cercanía a las zonas de interfaz. En síntesis, es posible establecer una relación matemática entre las estimaciones Fuzzy y SEVEIF en relación a la cantidad de incendios que es posible de estimar en zonas de riesgo, ya sea por uno u otro método. En ambos casos, los resultados son admisibles para ser incorporados dentro de un análisis integrado de Riesgo de incendios forestales. El gráfico 5.3.3.f, muestra esta relación.

Gráfico 5.3.3.f.- Relación SEVEIF versus Fuzzy para la modelación del riesgo considerando el número de incendios en alerta roja.



De esta manera, es posible efectuar una abstracción de la metodología del cálculo del componente “riesgo” en el modelo de vulnerabilidad expuesto en Rodríguez *et al* (2010) para el área de Valparaíso, obteniéndose con mayor precisión aquellas áreas con mayor demanda en recursos para la protección.

5.3.4 Estimación de pérdidas directas e indirectas en viviendas

Se llevó a cabo un análisis exploratorio de las pérdidas generadas por el paso del fuego en las áreas de interfaz urbano-forestal. Ya en el capítulo 3 se explicó la incidencia del componente de “daño potencial” en un modelo integrado de vulnerabilidad potencial, considerando cuatro áreas tipo de interfaz, y con los atributos básicos del tipo de viviendas que conforma cada una de estas áreas. El resultado obtenido es una capa geográfica de datos que detalla el valor monetario potencial a perder por unidad de superficie, considerando aspectos asociados al daño directo e indirecto. Dado que la metodología abordó un área aproximada de 22 mil hectáreas, en esta sección se analizan las tendencias a un área mayor (225.000) hectáreas, en donde se incorporan otros antecedentes para mejorar los resultados obtenidos en Rodríguez y Silva *et al* (2010).

Respecto a lo anterior, se consultaron fuentes actualmente vigentes en Chile en relación a las actuales metodologías y criterios para la tasación de viviendas, emitidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, y también por la Tesorería General de la República, y también por el Servicio de Impuestos Internos. En los tres casos, se adaptan las escalas, criterios y valores promedio, a los datos existentes para el análisis del daño en viviendas.

Pasos ejecutados

Se exponen los siguientes pasos, conducentes a generar una estimación directa de los daños:

- a) En primer lugar se consideran los polígonos ya generados y valorizados en el Proyecto SEVEIF, considerando en este caso, los factores de actualización para cada tipo de viviendas. Las coberturas geográficas son en consecuencia, actualizadas.

- b) Se incorporan al SIG las nuevas áreas de interfaz, siendo las áreas más relevantes a adicionar, los centros poblados de Quilpue y Curauma (figura 5.3.3.a, ampliada).
- c) Se incorporan nuevos factores técnicos para el cálculo de valores en viviendas, considerando las fuentes institucionales antes señaladas.
- d) Se efectúan las estimaciones y recálculos, para su nueva incorporación al SIG. De esta manera se obtiene una capa geográfica que considera mayores antecedentes para la valoración de las pérdidas.

Métodos aplicados

Se plantea el proceso de cálculo del valor del metro cuadrado de construcción, del Servicio de Impuestos Internos (SII). Su expresión es:

$$VC = VCC * DP * FC * CCC, \text{ donde:}$$

VCC = Valor de clase-calidad. Actúa el material predominante y la calidad del mismo.

DP = Depreciación del inmueble. Factor definido en función del tipo de vivienda y su localización.

FC = Factor de ajuste comunal

CCC = Coeficiente comercial de construcción, si es que se localiza en zona comercial o es de destino comercial.

Por otra parte, se consideró el valor por metro cuadrado de terreno, mediante la expresión:

$$VM = VB * CG * CCT, \text{ donde:}$$

VB = Valor base. Corresponde al valor unitario de terreno asignado a cada zona.

CG = Coeficiente guía. Corrige VB en función de la zona.

CCT = Coeficiente corrector del terreno. Corrige el valor unitario por las características físicas del terreno.

En relación a los criterios utilizados para la tasación comercial, se establece una simple suma entre *VC* y *VM*, de manera que T (tasación) = $VC + VM$. En consideración a estas

expresiones, se efectuaron los nuevos cálculos para una superficie aproximada de 225.000 hectáreas, dando como resultado una tabla de valores de pérdidas, clasificadas por áreas de interfaz. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.3.4.- Valores de pérdidas directas en viviendas, actualizados a marzo de 2012.

| Zona tipo | Estrato Socioecon. | Densidad de casas [casas/ha] | Superficie promedio [m ²] | Tasación media [\$/casa] | Valor del suelo [\$/ha] | Valor enseres [\$/casa] | Valor total [\$/casa] | Fsp [s/u] | Fvd [s/u] | Fsd [s/u] |
|-----------|--------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Alto | 26 | 120 | 46.560.000 | 425.285,54 | 6.000.000 | 52.985.286 | 1 | 1 | 0,1 |
| 2 | Medio | 20 | 48 | 13.555.200 | 304.132,04 | 1.000.000 | 14.859.332 | 0,4 | 0,03 | 0,9 |
| 3 | Bajo | 48 | 52 | 7.800.000 | 171.927,08 | 1.500.000 | 9.317.193 | 0,44 | 0,34 | 1 |
| 4 | Rural | 1 | 68 | 19.203.200 | 2.521.003,71 | 2.500.000 | 24.224.204 | 0,53 | 0,05 | 0,8 |

| Zona tipo | Seguro afecto [\$/casa/año] | Factor de depreciación [s/u] | Factor espacial [s/u] | Índice de inflamabilidad [s/u] | Coficiente de salud [s/u] | Pérdida Directa [UF/ha] | Pérdida Indirecta [UF/ha] | Pérdida Total [UF/ha] |
|-----------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1 | s/i | 0,8 | 3,21 | 1 | 0,3 | 61.608,0 | 710,9 | 62.318,9 |
| 2 | s/i | 0,8 | 10,42 | 5 | 1 | 13.290,4 | 664,5 | 13.954,9 |
| 3 | s/i | 0,8 | 4,01 | 4 | 1 | 20.000,2 | 416,7 | 20.416,9 |
| 4 | s/i | 0,8 | 68 | 3 | 0,7 | 1.083,3 | 758,3 | 1.841,7 |

En el cuadro anterior, “*Fsp*” corresponde al factor de superficie promedio; “*Fvd*” es el valor susceptible al daño, y “*Fsd*” es el factor de riesgo al daño en viviendas. Factores y valores adaptados de Rodríguez y Silva *et al* (2010), para el área de Valparaíso. Los valores son expresados en *Unidades de Fomento* (UF), que corresponde a una medida reajutable basada en la variación del *Índice de Precios al Consumidor* (IPC). Este último, mide la variación de los precios de una canasta de bienes y servicios, consumida por un hogar urbano del Gran Santiago, en Chile. Su propósito es estimar la inflación (o deflación según sea el caso) doméstica.

En relación a las pérdidas de tipo indirectas, no fueron tratadas en este análisis por no disponer de antecedentes suficientes. Por lo anterior, se asume que los resultados generados en el Proyecto SEVEIF (Rodríguez y Silva *et al*, 2010), son los que actualmente representan la realidad de la vulnerabilidad en el área estudiada. A la fecha de esta investigación no se han reportado objeciones o cambios, tanto a la metodología aplicada, como a los valores obtenidos respecto a las pérdidas indirectas potenciales.

Como comentario general de los valores obtenidos, puede verificarse que la tendencia espacial, es en la mayor acumulación de casas por unidad de superficie en las zonas de

estrato bajo, y en donde justamente se producen los problemas más graves de daños históricos y potenciales. La alta densidad, el hacinamiento y la vecindad directa con áreas de alta carga de material vegetal combustible, hacen que los niveles de peligro sean muy elevados, en comparación a áreas en donde se presenta igual o mayor carga vegetal, pero menor densidad de viviendas, producto entre otras cosas, de la menor actuación del agente causal de los incendios.

5.3.5 Estimación de pérdidas en vegetación.

Corresponde a uno de los principales análisis necesarios para establecer con cierto grado de certidumbre, el riesgo, peligro y vulnerabilidad contra incendios forestales. En el capítulo 3 se realizó la modelación del daño potencial producto de los distintos grados de afectación a la vegetación presente en el área del SEVEIF. Debido a la ampliación del área de investigación, se incorpora una nueva base de datos de modelos de combustibles, la cual abarca otras zonas de especial relevancia, y que son consideradas como territorios valiosos para la protección contra incendios. Para este propósito, se establecieron los siguientes pasos:

- a) Construcción de una base de datos ampliada de modelos de combustibles, a 225.000 hectáreas, para la zona de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpue y localidades vecinas.
- b) Incorporación de una base de datos actualizada de incendios forestales, entre las temporadas 1984-1985 y 2010-2011.
- c) Clasificación de los combustibles en función de las estadísticas de incendios reportadas por las empresas forestales en Chile, y la Corporación Nacional Forestal.
- d) Incorporación de los valores comerciales actualizados para cada tipo de vegetación.
- e) Construcción de funciones de estimación de pérdidas, para la serie temporal de incendios.

De acuerdo a lo anterior, el proceso se inició mediante la elaboración de la cartografía de modelos de combustibles, inicialmente construida y atribuida en el Sistema

KITRAL desarrollado en Chile en 1995, y posteriormente perfeccionado en versiones sucesivas.

En lo que respecta a la modelación de combustibles forestales, ésta se encuentra organizada en variables de carga, densidad, poder calorífico y otros atributos, que permiten estimar el comportamiento del fuego bajo condiciones meteorológicas y topográficas modeladas por el simulador de expansión de incendios forestales.

En este contexto, la nueva información generada corresponde a una base de datos ampliada a 225.000 hectáreas, la cual no sólo permite generar una nueva cartografía, sino que además da la posibilidad de unir los atributos de la vegetación combustible a los valores económicos que estos poseen, sobre la base de las estimaciones hechas por empresas forestales y la Corporación Nacional Forestal. Por otra parte, la existencia de una glosa por áreas quemadas en cada incendio – registros generados a contar del año 1997 – permiten establecer parámetros de cuantificación de los daños en función de los modelos de combustibles que ya se han estudiado.

Para este propósito, se consideraron imágenes satelitales del sensor Landsat TM, años 2008-2009-2010, para las bandas 2-3 y 4. El objetivo fue realizar combinaciones de bandas para obtener realce de bordes que representan los tipos de vegetación. A base esta primera interpretación, se generó una cobertura (mosaico) con macro unidades, las cuales fueron analizadas a una escala mayor (1:15.000) a base de escenas del sensor Terrametrics de Google Earth. El resultado de este proceso fue la generación de una primera base de datos de polígonos digitalizados y reclasificados, sobre la cual se incorporaron los parámetros de los modelos de combustibles del Sistema KITRAL (figura 5.3.5.a).

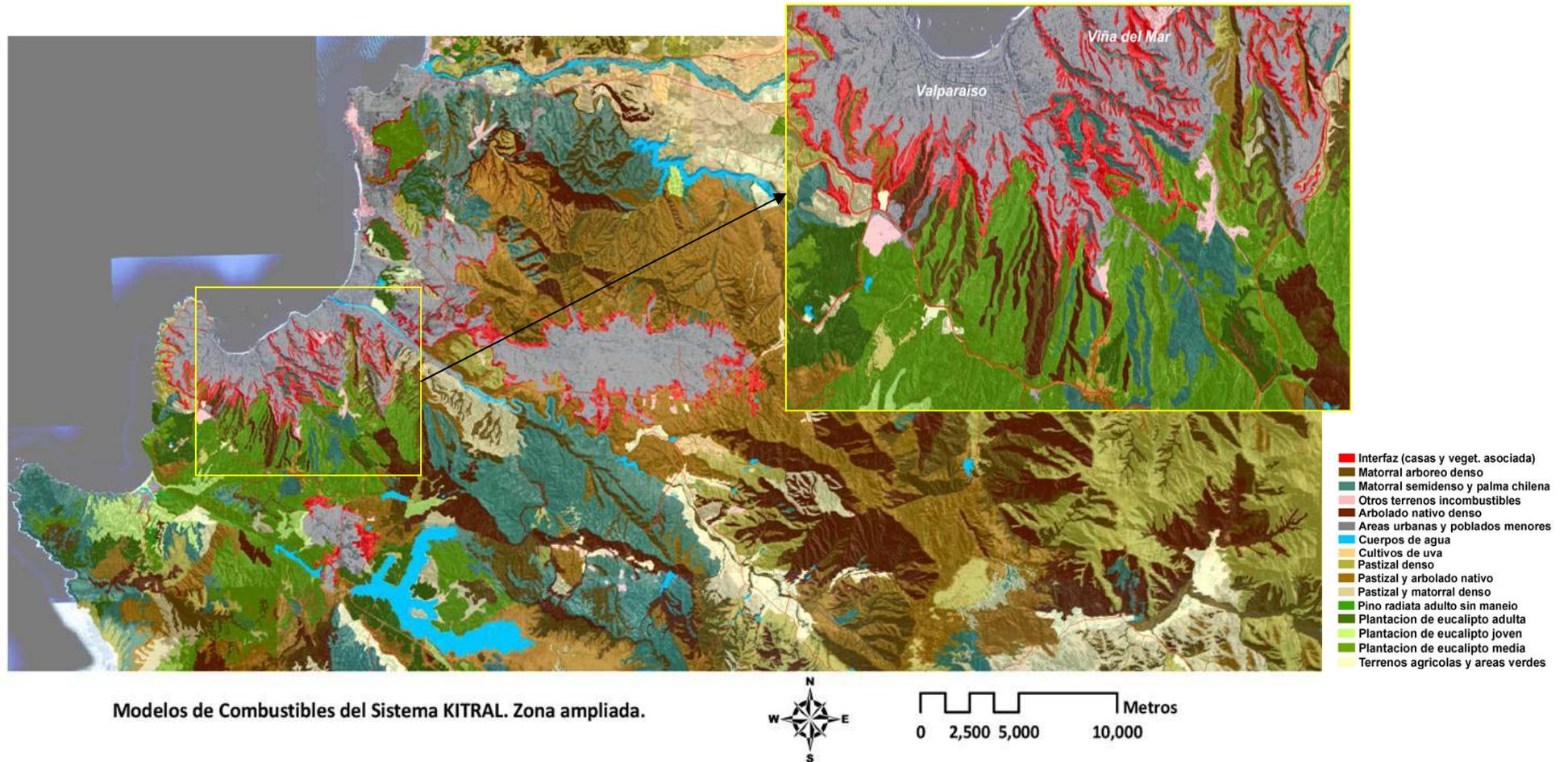
Este material sirvió, entre otros aspectos, para actualizar las modelaciones de la propagación del fuego en aquellas áreas especialmente críticas de interfaz. Todo el material ya reclasificado y atributado, fue adaptado a la nomenclatura de las bases de CONAF, y empresas forestales. En el siguiente cuadro se describe las distintas nomenclaturas existentes.

Cuadro 5.3.5.a.- Nomenclatura utilizada para el registro de la vegetación afectada por el fuego. Empresas forestales y CONAF. Actualización 2012 en ambos casos.

| CONAF | Empresas Forestales* |
|--|--|
| Pino radiata 0 – 10 años (<i>Pinus Radiata</i> D.Don) | Pino joven (<i>Pinus Radiata</i> D.Don) |
| Pino radiata 11 – 17 años (<i>Pinus Radiata</i> D.Don) | |
| Pino radiata igual o mayor a 18 años. (<i>Pinus Radiata</i> D.Don) | Pino adulto (<i>Pinus Radiata</i> D.Don) |
| Eucalyptus sp. (no indica sub-especie) | <i>Eucalyptus globulus</i> (Labill.) <i>Eucalyptus nitens</i> (Deane & Maiden.) |
| Arbolado nativo | Bosque Nativo |
| Matorral | --- |
| Pastizal | --- |

* Considera una nomenclatura típica, que puede variar de una empresa a otra. No considera ajustes por tipo de manejo silvícola.

La cartografía de combustibles generada, y la nomenclatura existente entre las tres fuentes: KITRAL, Empresas y CONAF, permitieron construir una base de datos de incendios forestales en cuyos registros se detalla el grado de afectación por cada tipo de combustible. El análisis, efectuado para las temporadas de incendios 1984/85 a 2010/11, permitió generar una primera estadística (cuadro 5.3.5.b), la cual fue posteriormente llevada al detalle mediante la asignación de los valores directos, en dólares/hectárea.



Modelos de Combustibles del Sistema KITRAL. Zona ampliada.

Figura 5.3.5.a.- Modelos de combustibles del Sistema KITRAL. Elaborado y actualizado a toda el área de la investigación (225.000 ha). Se destaca un cuadrante en donde prevalece la interfaz, como el combustible más valioso desde el punto de vista de la prevención contra incendios.

Cuadro 5.3.5.b.- Estadísticas de incendios para la vegetación afectada en el área de estudio, considerando la clasificación de combustibles desde distintas fuentes.

| Temporada | N° de incendios | Superficies afectadas (hectáreas) | | | | | | | Total afectado |
|------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Pino radiata | | | Eucalipto* | Arbolado Nativo | Matorral | Pastizal | |
| | | 0 - 10 años | 11 -17 años | 18 y más | | | | | |
| 1984-1985 | 1.501 | 510,56 | 0,00 | 0,00 | 307,33 | 3.027,53 | 3.764,43 | 3.670,14 | 11.279,99 |
| 1985-1986 | 1.105 | 806,59 | 125,02 | 92,10 | 430,54 | 5.179,93 | 3.251,61 | 2.793,74 | 12.679,53 |
| 1986-1987 | 1.033 | 384,46 | 77,62 | 3,26 | 285,14 | 2.840,21 | 6.069,36 | 5.967,78 | 15.627,83 |
| 1987-1988 | 1.180 | 15,11 | 59,42 | 2,80 | 144,41 | 329,88 | 639,31 | 690,29 | 1.881,22 |
| 1988-1989 | 1.028 | 19,00 | 105,57 | 196,97 | 763,90 | 10.009,01 | 7.045,18 | 8.398,46 | 26.538,09 |
| 1989-1990 | 824 | 50,51 | 115,85 | 71,06 | 258,23 | 1.785,58 | 2.066,24 | 1.450,85 | 5.798,32 |
| 1990-1991 | 870 | 60,06 | 33,49 | 3,20 | 102,39 | 832,46 | 2.609,41 | 1.726,61 | 5.367,62 |
| 1991-1992 | 1.307 | 74,31 | 10,45 | 23,40 | 303,41 | 681,28 | 2.504,58 | 3.949,27 | 7.546,70 |
| 1992-1993 | 1.271 | 198,64 | 4,15 | 5,76 | 481,16 | 2.365,08 | 2.690,26 | 3.110,94 | 8.855,99 |
| 1993-1994 | 841 | 102,32 | 91,10 | 74,05 | 1.745,99 | 2.854,45 | 4.454,09 | 5.007,85 | 14.329,85 |
| 1994-1995 | 828 | 137,28 | 57,48 | 91,37 | 486,49 | 639,68 | 1.060,73 | 1.530,80 | 4.003,83 |
| 1995-1996 | 727 | 50,13 | 84,93 | 226,55 | 229,60 | 829,23 | 1.661,49 | 881,03 | 3.962,96 |
| 1996-1997 | 629 | 184,01 | 57,70 | 175,37 | 239,23 | 1.316,15 | 1.368,93 | 1.326,92 | 4.668,31 |
| 1997-1998 | 832 | 211,84 | 1,76 | 3,11 | 329,23 | 993,79 | 1.266,96 | 2.632,66 | 5.439,35 |
| 1998-1999 | 704 | 18,88 | 20,81 | 10,04 | 228,40 | 357,66 | 977,50 | 700,08 | 2.313,37 |
| 1999-2000 | 867 | 86,74 | 10,45 | 146,90 | 286,56 | 332,46 | 1.077,05 | 1.600,87 | 3.541,03 |
| 2000-2001 | 1.036 | 14,25 | 12,08 | 16,09 | 174,71 | 310,65 | 690,51 | 961,84 | 2.180,13 |
| 2001-2002 | 1.318 | 55,19 | 23,72 | 1,48 | 484,92 | 447,60 | 1.920,35 | 2.065,38 | 4.998,64 |
| 2002-2003 | 1.086 | 68,23 | 13,60 | 202,30 | 1.241,08 | 1.680,28 | 3.044,79 | 3.249,04 | 9.499,32 |
| 2003-2004 | 875 | 464,75 | 33,96 | 128,10 | 2.087,36 | 2.591,24 | 5.375,62 | 4.480,46 | 15.161,49 |
| 2004-2005 | 956 | 58,77 | 82,05 | 397,30 | 294,40 | 2.565,45 | 2.414,46 | 1.603,50 | 7.415,93 |
| 2005-2006 | 866 | 22,22 | 35,75 | 16,61 | 378,97 | 366,59 | 1.084,61 | 2.024,49 | 3.929,24 |
| 2006-2007 | 874 | 17,92 | 126,77 | 54,32 | 277,55 | 442,39 | 968,55 | 1.134,81 | 3.022,31 |
| 2007-2008 | 850 | 18,99 | 1.563,14 | 21,95 | 1.138,26 | 671,08 | 1.478,98 | 666,24 | 5.558,64 |
| 2008-2009 | 642 | 1,65 | 22,10 | 79,52 | 691,48 | 652,82 | 1.565,45 | 1.362,41 | 4.375,43 |
| 2009-2010 | 713 | 82,24 | 59,96 | 1.103,68 | 2.580,43 | 2.470,11 | 3.649,43 | 3.153,83 | 13.099,68 |
| 2010-2011 | 824 | 47,99 | 17,32 | 45,08 | 915,78 | 2.658,18 | 4.496,50 | 3.073,02 | 11.253,87 |
| Promedios | 948 | 139,36 | 105,42 | 118,24 | 625,44 | 1.823,36 | 2.562,83 | 2.563,46 | 7.938,10 |

* Ante la similitud de las cifras, se considera la suma de las dos especies en la cuenta total.

Del cuadro anterior, se aplicaron las estimaciones existentes en la literatura para la valoración de pérdidas directas producto de incendios. Algunos autores han diseñado métodos simplificados para evaluar las pérdidas comerciales en bosques afectados por incendios forestales. En este análisis, se describen algunas expresiones matemáticas utilizadas en situaciones comunes, que pueden ser aplicadas sin dificultades por el personal que normalmente participa en programas de manejo del fuego.

Por ejemplo, en Bosques Latifoliados Multietáneos, se dispone de un conjunto de fórmulas aplicables a bosques latifoliados desarrolladas en EE.UU., pero que pueden ser

también empleadas en tipos forestales chilenos, tales como Siempreverde, Roble-Raulí-Tepa, Coigüe, etc. Las fórmulas, que se exponen a continuación, permiten calcular:

El valor de la Pérdida en Madera Aserrada (*VM*), en US\$:

$$VM = SP [-82,45+3,08(WL)+38,94(L)+2,18(DBH)+0,71(WW)]$$

La estimación del Volumen Dañado (*VD*), en Pies Madereros:

$$VD = -79,14+3,82(WL)+41,14(L)+1,54(DBH)+0,59(WW)$$

La Longitud del Defecto sobre el Tocón (*LD*), en Pies:

$$LD = -2,88+0,98(WL)+2,37(L)+0,07(WW)$$

La Superficie de la Sección del Fuste Dañada, a la Altura del Tocón (*SD*), en pulgadas cuadradas:

$$SD = -185,09+4,67(WL)+111,10(L)+5,13(DBH)+1,32(WW)$$

En todas las expresiones anteriores:

DBH = *DAP* con corteza, en pulgadas.

WL = Longitud de la herida sobre el tocón, en pies.

WW = Ancho de la herida a la altura del tocón, en pulgadas.

L = Log (*base 10*) del número de años estimados antes de la cosecha.

SP = Valor comercial de la madera en pié, en US\$/Pié Maderero.

En las expresiones antes señaladas, no fue posible contar con algunas de las variables, por ejemplo, *WL*, *WW*, entre otras. Por tal razón, se recurrió a las fórmulas utilizadas por el Servicio Forestal de Estados Unidos, que podrían ser aplicadas en la evaluación del daño directo por incendios en formaciones boscosas regulares típicas de Chile, especialmente plantaciones, y también en renovales y arbolado nativo:

Para Plantaciones Comerciales: $D = A [(M * Y * K * V) + C]$

Para Renovales Nativos: $D = M * K * S * V * A * (Y + R)$

Donde:

D = Valor del daño, en US\$.

M = Incremento medio anual, en m^3/ha .

K = Proporción de árboles muertos, en tanto por uno.

S = Stock de madera comercial acumulado al momento del incendio en tanto por uno.

V = Valor comercial de la madera en pié, en US\$/ m^3 .

Y = Edad del rodal, en años.

R = Número de años esperados para la regeneración natural.

A = Superficie afectada por el incendio, en ha.

C = Costo de plantación incluyendo preparación del sitio (US\$/ha).

En consideración a las dos últimas expresiones, se efectuó el proceso de cálculo asignando en cada caso el valor por hectárea de cada tipo de vegetación afectada por el fuego, y un factor de actualización monetaria, para cada año. Se generó de esta forma una columna de pérdidas directas, en detalle para cada temporada de incendios. Se excluyó de este análisis las proporciones de daño por cada tipo vegetal, por no disponer de antecedentes suficientes para este cálculo. No obstante se recomienda incluirlo para posteriores análisis. En el anexo III se detallan las tablas de cálculo para cada clase de vegetación.

5.3.5.a Estimación de pérdidas para pino radiata.

Mediante el procesamiento de todos los registros procedentes de empresas forestales y CONAF para el área de interés, se contabilizaron todos los incendios ocurridos en el período 194-1985 / 2010-2011, contabilizando una base total de 25.537 incendios, de los cuales pudo obtenerse la composición de superficie afectada en cada incendio. En lo concerniente a pino radiata, sus resultados se ilustran en el siguiente cuadro, y gráfico adjunto.

Cuadro 5.3.5.c.- Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Ejemplo: plantaciones comerciales de pino radiata 0-10 años. Las tablas para las otras clases de edad (pino) se presentan en el anexo IV.

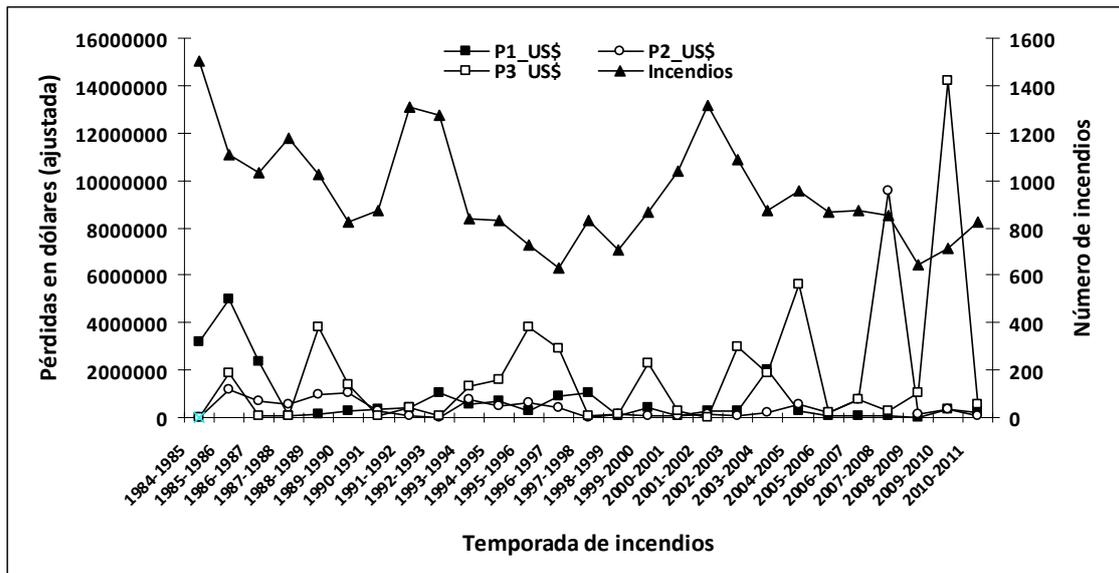
Pino radiata 0 - 10 años

| Tempo- rada | Incen- dios | Sup. quemada | Factor* | US\$/ha | Pérdida US\$ | Tempo- rada | Incen- dios | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ |
|----------------|----------------|-----------------|---------|---------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|--------|---------|-----------------|
| 1984-1985 | 1.501 | 510,56 | 1,707 | 6.293,3 | 3.213.102,37 | 1998-1999 | 704 | 18,88 | 1,294 | 4.769,5 | 90.048,68 |
| 1985-1986 | 1.105 | 806,59 | 1,673 | 6.169,9 | 4.976.573,66 | 1999-2000 | 867 | 86,74 | 1,268 | 4.676,0 | 405.596,89 |
| 1986-1987 | 1.033 | 384,46 | 1,641 | 6.048,9 | 2.325.565,59 | 2000-2001 | 1.036 | 14,25 | 1,243 | 4.584,3 | 65.326,58 |
| 1987-1988 | 1.180 | 15,11 | 1,608 | 5.930,3 | 89.606,96 | 2001-2002 | 1.318 | 55,19 | 1,219 | 4.494,4 | 248.047,73 |
| 1988-1989 | 1.028 | 19,00 | 1,577 | 5.814,0 | 110.466,52 | 2002-2003 | 1.086 | 68,23 | 1,195 | 4.406,3 | 300.642,28 |
| 1989-1990 | 824 | 50,51 | 1,546 | 5.700,0 | 287.908,37 | 2003-2004 | 875 | 464,75 | 1,172 | 4.319,9 | 2.007.677,31 |
| 1990-1991 | 870 | 60,06 | 1,516 | 5.588,3 | 335.631,00 | 2004-2005 | 956 | 58,77 | 1,149 | 4.235,2 | 248.902,94 |
| 1991-1992 | 1.307 | 74,31 | 1,486 | 5.478,7 | 407.121,31 | 2005-2006 | 866 | 22,22 | 1,126 | 4.152,2 | 92.261,01 |
| 1992-1993 | 1.271 | 198,64 | 1,457 | 5.371,3 | 1.066.947,64 | 2006-2007 | 874 | 17,92 | 1,104 | 4.070,7 | 72.947,77 |
| 1993-1994 | 841 | 102,32 | 1,428 | 5.265,9 | 538.811,38 | 2007-2008 | 850 | 18,99 | 1,082 | 3.990,9 | 75.787,71 |
| 1994-1995 | 828 | 137,28 | 1,400 | 5.162,7 | 708.734,10 | 2008-2009 | 642 | 1,65 | 1,061 | 3.912,7 | 6.455,91 |
| 1995-1996 | 727 | 50,13 | 1,373 | 5.061,5 | 253.731,03 | 2009-2010 | 713 | 82,24 | 1,040 | 3.836,0 | 315.468,92 |
| 1996-1997 | 629 | 184,01 | 1,346 | 4.962,2 | 913.097,47 | 2010-2011 | 824 | 47,99 | 1,020 | 3.760,7 | 180.477,91 |
| 1997-1998 | 832 | 211,84 | 1,319 | 4.864,9 | 1.030.584,27 | | | | | | |

*Actualización del valor presente, considerando la tasa de interés promedio de mercado y el número de años.

Realizando este mismo proceso para las clases de edad 11-17 años y 18 en adelante (ver anexo III, se efectuó un análisis de regresión para establecer una función de estimación de las pérdidas. Para este primer grupo de análisis, los valores históricos se ilustran en el gráfico 5.3.5.a. En los siguientes, se analizan los resultados obtenidos para el resto de grupos de vegetación.

Gráfico 5.3.5.a.- Relación N° de incendios, y pérdidas, temporadas 1984-1985 a 2010-2011.



En el gráfico anterior, P1, P2 y P3 corresponden a las plantaciones de 0-10, 11-17 y mayor a 17 años, sucesivamente. La cantidad de incendios en las 27 temporadas analizadas muestra un comportamiento cíclico en torno a los 947 incendios/año, de los cuales pino radiata aporta una pérdida promedio anual de USD 754.352,7 para P1, USD 723.386,6 para P2, y USD 1.769.825,7 para P3. La tendencia general es la concentración de los mayores daños en una menor cantidad de incendios. En el siguiente cuadro se expresan en forma resumida los resultados del gráfico anterior, considerando los totales para cada categoría.

**Cuadro 5.3.5.d.- Estadísticas de pérdidas para pino radiata, últimos 27 años
(1984-1985 / 2010-2011).**

| Pino radiata | Promedio Sup. quemada/año (ha) | Promedio Pérdida directa (USD/año) | Total Sup. quemada (ha) | Pérdida directa (USD) |
|---------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|
| 0-11 años | 139,4 | 754.352,7 | 3.762,64 | 20.367.523,32 |
| 11-17 años | 105,4 | 723.386,6 | 2.846,25 | 19.531.438,11 |
| > 17 años | 118,2 | 1.769.825,7 | 3.192,37 | 87.684.254,05 |
| Totales | 363,0 | 3.247.565,0 | 9.801,26 | 127.583.215,48 |

La ecuación desarrollada para la estimación de pérdidas corresponde a:

$$P = 265.971,01 - 83,24 * \rho + 6.396,64 * \varphi_1 + 6.075,35 * \varphi_2 + 12.928,60 * \varphi_3$$

$r = 0,88$; donde:

ρ = N°de Incendios (sub.total por cada año evaluado). $N = 25.537$; $n = 27$ (temporadas)

φ_1 = Sup. quemada de pino radiata, 0-11 años.

φ_2 = Sup. quemada de pino radiata, 11-17 años.

φ_3 = Sup. quemada de pino radiata mayor a 17 años.

5.3.5.b Estimación de pérdidas para plantaciones de Eucalipto.

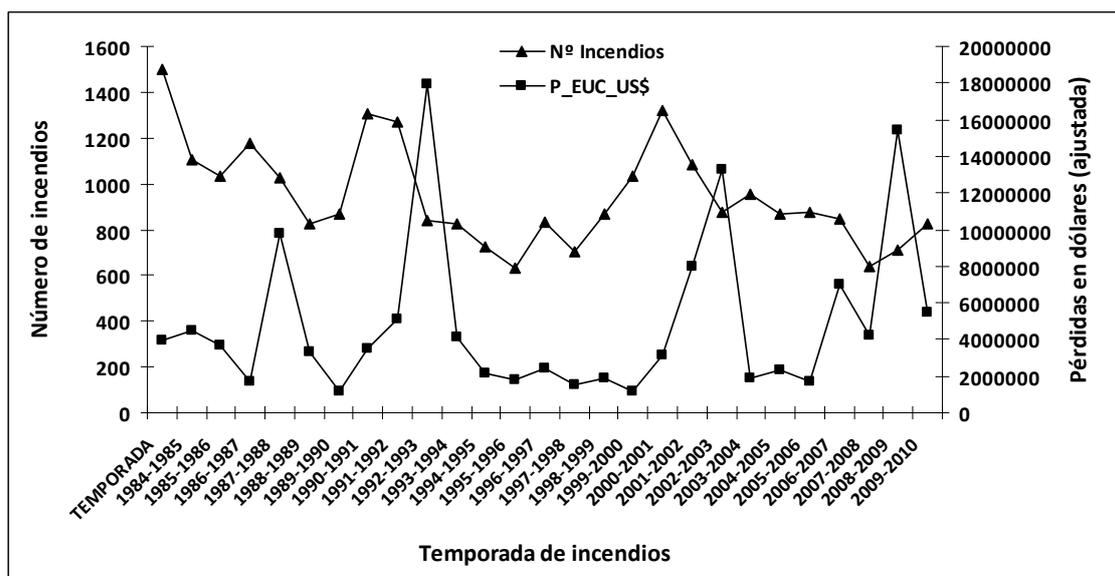
El área bajo estudio posee plantaciones de dos especies principales: *Eucalyptus globulus* (Labill.) y *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden.), ambas especies, predominantes en áreas de cerros y lomajes cercanos a zonas de interfaz, y entremezcladas con otras especies del matorral nativo. En general las superficies afectadas son mucho menores que en el caso de pino radiata. No obstante, las pérdidas directas son igualmente considerables al revisar el período señalado anteriormente. Los datos a modo resumen se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.3.5.e.- Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Ejemplo: plantaciones comerciales de Eucalyptus (dos especies principales)

| Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ | Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ |
|----------------|-----------------|--------|-----------|-----------------|----------------|-----------------|--------|----------|-----------------|
| 1984-1985 | 307,33 | 1,308 | 12.879,35 | 3.958.211,80 | 1998-1999 | 228,40 | 1,138 | 6.490,98 | 1.482.540,90 |
| 1985-1986 | 430,54 | 1,295 | 10.503,53 | 4.522.190,82 | 1999-2000 | 286,56 | 1,127 | 6.612,62 | 1.894.913,03 |
| 1986-1987 | 285,14 | 1,282 | 12.867,83 | 3.669.132,37 | 2000-2001 | 174,71 | 1,116 | 6.547,15 | 1.143.852,70 |
| 1987-1988 | 144,41 | 1,270 | 11.960,04 | 1.727.149,59 | 2001-2002 | 484,92 | 1,105 | 6.482,33 | 3.143.410,23 |
| 1988-1989 | 763,90 | 1,257 | 12.836,13 | 9.805.522,81 | 2002-2003 | 1.241,08 | 1,094 | 6.418,15 | 7.965.432,63 |
| 1989-1990 | 258,23 | 1,245 | 12.982,84 | 3.352.559,70 | 2003-2004 | 2.087,36 | 1,083 | 6.354,60 | 13.264.337,84 |
| 1990-1991 | 102,39 | 1,232 | 11.648,15 | 1.192.653,85 | 2004-2005 | 294,40 | 1,072 | 6.291,68 | 1.852.271,52 |
| 1991-1992 | 303,41 | 1,220 | 11.447,59 | 3.473.313,07 | 2005-2006 | 378,97 | 1,062 | 6.229,39 | 2.360.751,65 |
| 1992-1993 | 481,16 | 1,208 | 10.623,21 | 5.111.465,00 | 2006-2007 | 277,55 | 1,051 | 6.167,71 | 1.711.848,51 |
| 1993-1994 | 1.745,99 | 1,196 | 10.264,63 | 17.921.942,77 | 2007-2008 | 1.138,26 | 1,041 | 6.106,65 | 6.950.950,52 |
| 1994-1995 | 486,49 | 1,184 | 8.465,66 | 4.118.461,15 | 2008-2009 | 691,48 | 1,030 | 6.046,18 | 4.180.815,21 |
| 1995-1996 | 229,60 | 1,173 | 9.246,09 | 2.122.901,17 | 2009-2010 | 2.580,43 | 1,020 | 5.986,32 | 15.447.281,38 |
| 1996-1997 | 239,23 | 1,161 | 7.555,18 | 1.807.424,99 | 2010-2011 | 915,78 | 1,010 | 5.927,05 | 5.427.873,98 |
| 1997-1998 | 329,23 | 1,149 | 7.451,65 | 2.453.307,68 | | | | | |

En general, las pérdidas muestran un comportamiento muy dispar en el período analizado. No es posible establecer con un cierto patrón homogéneo, el comportamiento estadístico de estas cifras. No obstante, la valoración de las pérdidas es igualmente relevante de considerar, para efectos de incorporarlo al análisis de vulnerabilidad. En el siguiente gráfico se muestran los resultados obtenidos.

Gráfico 5.3.5.b.- Relación N° de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Plantaciones de Eucalyptus.



Anualmente son afectadas unas 625,4 hectáreas de plantaciones de Eucalyptus, ocasionando una pérdida directa aproximada de 4.891.000 dólares por año. No obstante la región no cuenta con una gran superficie de plantaciones artificiales, éstas forman una fuente de combustibilidad no menor en la propagación de incendios forestales. Las hectáreas afectadas en el período analizado asciende a 16.886,95, mientras que el daño directo asciende a USD 132.062.516,85. La expresión matemática de esta tendencia es la siguiente:

$$P = - 1.275.426,96 + 2.085,05 * \rho + 6.700,37 * \varphi$$

$$r = 0,87$$

Donde:

ρ = N°de Incendios (sub.total por cada año evaluado). $N = 25.537$; $n = 27$ (temporadas)

φ = Superficie quemada.

5.3.5.c Estimación de pérdidas para Arbolado Nativo

Corresponde a uno de los ítemes más complicados de analizar, por la alta diversidad de situaciones florísticas posibles de encontrar en el arbolado mediterráneo. En el área, coexisten especies del antiguo bosque esclerófilo que predominó la región hace más de 10 mil años, y que hoy se encuentra acotado a pequeñas áreas, asociadas a la presencia de especies de matorral nativo y otras especies exóticas que se manifiestan fuertemente en períodos de recuperación post fuego. Las cifras aquí expuestas corresponden a estimaciones, tanto de campo, como de referencias de estudios en otras áreas de clima mediterráneo presentes en Chile. No obstante, los resultados pueden ser considerados como una primera aproximación para la estimación de mejores estimadores en la pérdida directa ocasionada por el fuego para este tipo de vegetación.

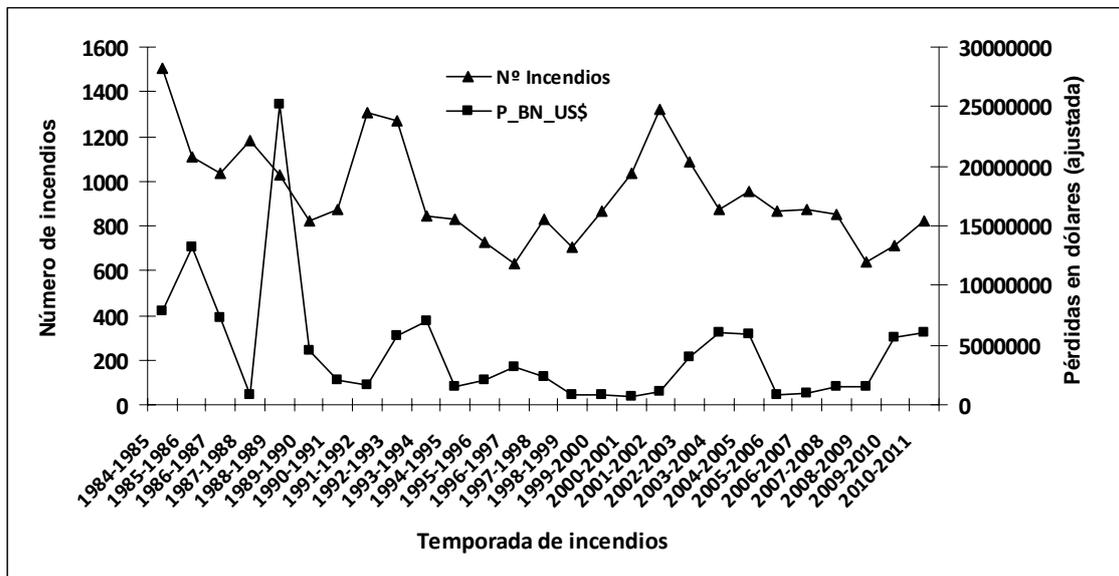
Por otra parte, es necesario considerar que la actual estadística de incendios que opera en Chile, considera solamente la proporción de áreas afectadas dentro de un incendio mayor, asumiendo un grado de afectación del 100%, lo cual en la práctica no siempre es así, dado que la propagación del fuego ocasiona distintos niveles de intensidad de daños según sea el combustible afectado y las condiciones por las cuales el fuego se propagó. Con estas consideraciones, se expone un primer cuadro de resultados para la misma área de estudio, y para las 27 temporadas de incendios.

Cuadro 5.3.5.f.- Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Ejemplo: Arbolado Nativo.

| Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ | Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ |
|----------------|-----------------|--------|----------|-----------------|----------------|-----------------|--------|----------|-----------------|
| 1984-1985 | 1.501 | 1,144 | 2.572,05 | 7.786.968,71 | 1998-1999 | 704 | 1,067 | 2.398,58 | 857.877,90 |
| 1985-1986 | 1.105 | 1,138 | 2.559,26 | 13.256.772,50 | 1999-2000 | 867 | 1,062 | 2.386,65 | 793.466,23 |
| 1986-1987 | 1.033 | 1,133 | 2.546,52 | 7.232.664,22 | 2000-2001 | 1.036 | 1,056 | 2.374,78 | 737.724,73 |
| 1987-1988 | 1.180 | 1,127 | 2.533,86 | 835.868,15 | 2001-2002 | 1.318 | 1,051 | 2.362,96 | 1.057.662,25 |
| 1988-1989 | 1.028 | 1,122 | 2.521,25 | 25.235.205,78 | 2002-2003 | 1.086 | 1,046 | 2.351,21 | 3.950.686,07 |
| 1989-1990 | 824 | 1,116 | 2.508,71 | 4.479.494,20 | 2003-2004 | 875 | 1,041 | 2.339,51 | 6.062.230,43 |
| 1990-1991 | 870 | 1,110 | 2.496,22 | 2.078.006,87 | 2004-2005 | 956 | 1,036 | 2.327,87 | 5.972.034,31 |
| 1991-1992 | 1.307 | 1,105 | 2.483,81 | 1.692.166,85 | 2005-2006 | 866 | 1,030 | 2.316,29 | 849.128,25 |
| 1992-1993 | 1.271 | 1,099 | 2.471,45 | 5.845.172,28 | 2006-2007 | 874 | 1,025 | 2.304,76 | 1.019.604,91 |
| 1993-1994 | 841 | 1,094 | 2.459,15 | 7.019.527,16 | 2007-2008 | 850 | 1,020 | 2.293,30 | 1.538.986,64 |
| 1994-1995 | 828 | 1,088 | 2.446,92 | 1.565.244,29 | 2008-2009 | 642 | 1,015 | 2.281,89 | 1.489.662,70 |
| 1995-1996 | 727 | 1,083 | 2.434,74 | 2.018.962,72 | 2009-2010 | 713 | 1,010 | 2.270,54 | 5.608.474,17 |
| 1996-1997 | 629 | 1,078 | 2.422,63 | 3.188.545,52 | 2010-2011 | 824 | 1,005 | 2.259,24 | 6.005.466,58 |
| 1997-1998 | 832 | 1,072 | 2.410,58 | 2.395.608,22 | | | | | |

Los resultados anteriores, se expresan en el siguiente gráfico:

Gráfico 5.3.5.c.- Relación N° de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Arbolado Nativo.



A excepción de la temporada 1988-1989, el resto de los años observa en general un comportamiento más estable en las superficies afectadas, y en consecuencia en las pérdidas ocasionadas. En general en el área se expresan patrones de recurrencia muy marcados, atribuible a la alta frecuencia de incendios en un paisaje degradado por el fuego, y que ocasiona el predominio de comunidades vegetales compuestas por especies

exóticas de rápido crecimiento. A su vez, en la estimación de las pérdidas influye fuertemente el grado de intensidad del fuego en el área afectada. Lo anterior permite establecer grados o escalas de daño, tal como se ilustra en la figura 5.3.5.b. En función de los niveles de intensidad, se atribuye un grado de afectación, expresado monetariamente. Para efectos de este análisis, se considera un daño total, dado que no existen referencias en las bases de datos utilizadas. Es necesario considerarlo para estudios posteriores. Las hectáreas afectadas en el período analizado asciende a 49.230,77 mientras que el daño directo asciende a USD 120.573.212,62. La expresión matemática de esta tendencia es la siguiente:

$$P = -472.899,33 + 370,41 * \rho + 2.515,97 * \varphi$$

$$r = 0,91$$

Donde:

ρ = N° de Incendios (sub.total por cada año evaluado). $N = 25.537$; $n = 27$ (temporadas)

φ = Superficie quemada.

5.3.5.d Estimación de pérdidas para Matorral Nativo

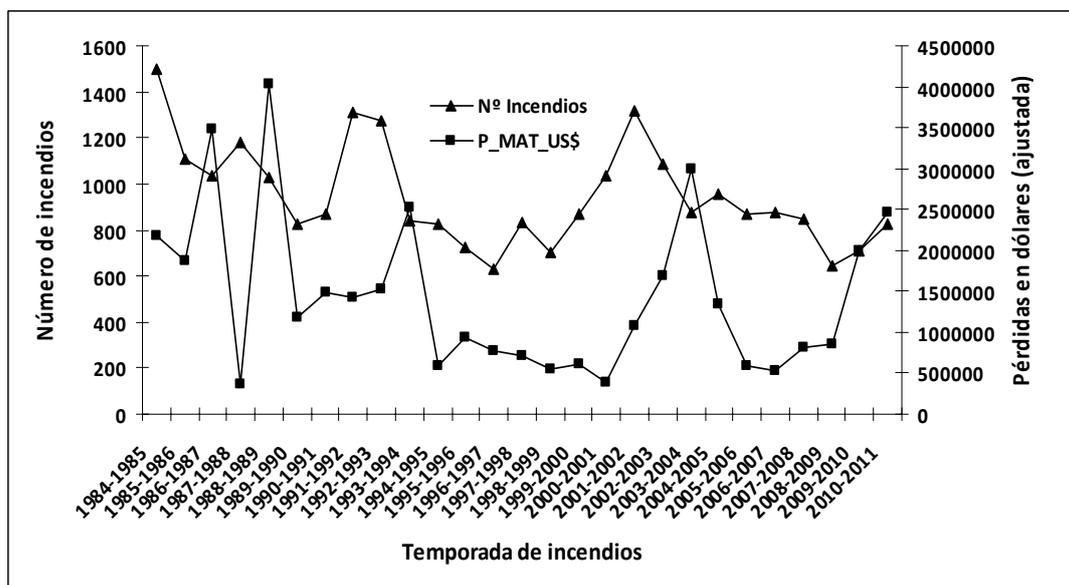
Las estadísticas para este tipo de vegetación, muestran un promedio de 2.652,8 hectáreas afectadas por año, y cuya composición dominante corresponde a especies típicas del matorral esclerófilo mediterráneo, tales como colliguay (*Colliguaja odorifera* (Molina)), palo colorado (*Pouteria splendens* (A. DC.) O.K.), boldo (*Peumus boldus* (Molina)), michay (*Berberis chilensis* (Gill.) ex. Hook), corontillo (*Escallonia revoluta* (Ruiz et Pav.) Pers.), quila (*Chusquea cumingii* Nees.) y tomatillo (*Solanum ligustrinum* Lodd.). En estas áreas quemadas también están presentes otras especies como vauto (*Baccharis concava* (Ruiz et Pav.) Pers.), litre (*Lithrea caustica* (Molina) H. et A.), tola blanca (*Proustia pyrifolia* DC.), crucero (*Colletia spinosa* Gmel.), rarán (*Myrceugenia obtusa* (D.C.) Berg.), barba de viejo (*Ageratina glechonophylla* (Less.) R.M.King et H.Rob.), y corcolén (*Azara integrifolia* Ruiz et Pav.). En todos los incendios, los grados de afectación son sumamente variables, siendo necesario establecer en campo un indicador de intensidad del fuego. Esto se ilustra más adelante en la figura 5.4. Un cuadro resumen de las pérdidas para el período analizado se ilustra en el siguiente cuadro.

Cuadro 5.3.5.g.- Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Ejemplo: Matorral Nativo (denso y semidenso).

| Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ | Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ |
|----------------|-----------------|--------|---------|-----------------|----------------|-----------------|--------|---------|-----------------|
| 1984-1985 | 1.501 | 1,055 | 577,32 | 2.173.276,75 | 1998-1999 | 704 | 1,026 | 561,39 | 548.762,56 |
| 1985-1986 | 1.105 | 1,053 | 576,17 | 1.873.469,11 | 1999-2000 | 867 | 1,024 | 560,27 | 603.442,44 |
| 1986-1987 | 1.033 | 1,051 | 575,02 | 3.489.982,61 | 2000-2001 | 1.036 | 1,022 | 559,16 | 386.102,16 |
| 1987-1988 | 1.180 | 1,049 | 573,87 | 366.880,09 | 2001-2002 | 1.318 | 1,020 | 558,04 | 1.071.630,17 |
| 1988-1989 | 1.028 | 1,047 | 572,72 | 4.034.939,39 | 2002-2003 | 1.086 | 1,018 | 556,93 | 1.695.720,09 |
| 1989-1990 | 824 | 1,045 | 571,58 | 1.181.021,94 | 2003-2004 | 875 | 1,016 | 555,81 | 2.987.842,22 |
| 1990-1991 | 870 | 1,043 | 570,44 | 1.488.510,15 | 2004-2005 | 956 | 1,014 | 554,70 | 1.339.310,86 |
| 1991-1992 | 1.307 | 1,041 | 569,30 | 1.425.859,28 | 2005-2006 | 866 | 1,012 | 553,60 | 600.436,74 |
| 1992-1993 | 1.271 | 1,039 | 568,16 | 1.528.510,02 | 2006-2007 | 874 | 1,010 | 552,49 | 535.116,05 |
| 1993-1994 | 841 | 1,037 | 567,03 | 2.525.604,26 | 2007-2008 | 850 | 1,008 | 551,39 | 815.493,52 |
| 1994-1995 | 828 | 1,035 | 565,90 | 600.265,58 | 2008-2009 | 642 | 1,006 | 550,29 | 861.449,24 |
| 1995-1996 | 727 | 1,032 | 564,77 | 938.358,09 | 2009-2010 | 713 | 1,004 | 549,19 | 2.004.231,15 |
| 1996-1997 | 629 | 1,030 | 563,64 | 771.586,09 | 2010-2011 | 824 | 1,002 | 548,09 | 2.464.504,67 |
| 1997-1998 | 832 | 1,028 | 562,52 | 712.686,17 | | | | | |

La valorización (US\$/ha) se ha obtenido a base del valor comercial presente a la temporada de incendio, actualizado por el factor indicado en la misma tabla. En términos gráficos, la tendencia es irregular, no necesariamente marcada por un promedio estable, tanto en el número de incendios como en los valores de pérdida. En general puede concluirse que las 69.196,4 hectáreas dañadas por el fuego produjeron pérdidas aproximadas (montos actualizados) de US\$ 30.024.991,4. Este valor incluye además los daños ocasionados a los bosques de Palma chilena (*Jubaea chilensis* (Molina) Baillon), confinados a áreas muy específicas dentro del área de investigación.

Gráfico 5.3.5.d.- Relación N° de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Matorral Nativo.



En el gráfico anterior, ‘ $P_MAT_US\$$ ’ corresponde a las pérdidas directas en dólares, para el Matorral Nativo. En el caso de la valoración de pérdidas directas y de acuerdo a las cifras analizadas, la expresión matemática que mejor se ajusta es:

$$P = -506.490,06 + 254,88 * \rho + 382,44 * \varphi$$

$$r = 0,65$$

Donde:

ρ = N°de Incendios (sub.total por cada año evaluado). $N = 25.537$; $n = 27$ (temporadas)

φ = Superficie quemada.

5.3.5.e Estimación de pérdidas para Pastizales y mezclas de Matorral

Estas cifras son obtenidas a partir de las estadísticas de CONAF, en cuyo caso las bases de datos incorporan esta sub clasificación. Dentro de este grupo, se incluye la mayoría de las especies descritas para el Matorral, sólo que en este caso, se mezcla con pastizales y gramíneas que predominan en muchos sectores de matorral denso y matorral abierto. El cuadro de resultados permite obtener las siguientes cifras de pérdidas.

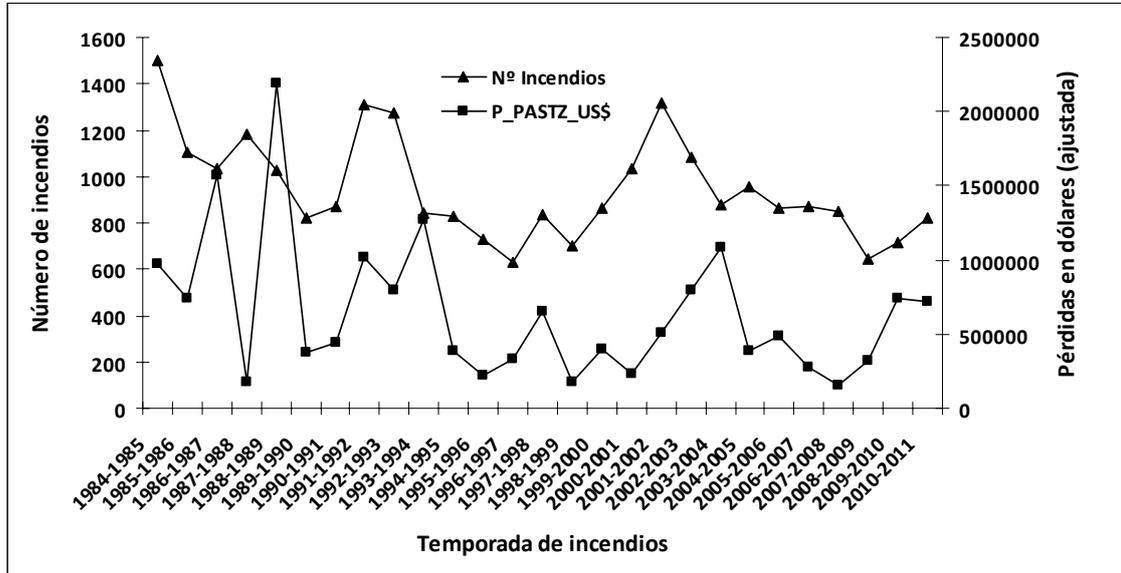
Cuadro 5.3.5.h.- Estimación de las pérdidas, basadas en las superficies afectadas y valores comerciales por clase de vegetación. Ejemplo: Pastizales y mezclas de matorral. La pérdida es calculada mediante la multiplicación del área quemada y la valorización de la vegetación.

| Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ | Tempo- rada | Sup. quemada | Factor | US\$/ha | Pérdida US\$ |
|----------------|-----------------|--------|---------|-----------------|----------------|-----------------|--------|---------|-----------------|
| 1984-1985 | 3.670,14 | 1,144 | 266,59 | 978.413,01 | 1998-1999 | 704 | 1,067 | 248,61 | 174.045,34 |
| 1985-1986 | 2.793,74 | 1,138 | 265,26 | 741.070,48 | 1999-2000 | 867 | 1,062 | 247,37 | 396.008,70 |
| 1986-1987 | 5.967,78 | 1,133 | 263,94 | 1.575.144,02 | 2000-2001 | 1.036 | 1,056 | 246,14 | 236.747,52 |
| 1987-1988 | 690,29 | 1,127 | 262,63 | 181.289,64 | 2001-2002 | 1.318 | 1,051 | 244,92 | 505.843,89 |
| 1988-1989 | 8.398,46 | 1,122 | 261,32 | 2.194.699,17 | 2002-2003 | 1.086 | 1,046 | 243,70 | 791.781,84 |
| 1989-1990 | 1.450,85 | 1,116 | 260,02 | 377.252,21 | 2003-2004 | 875 | 1,041 | 242,48 | 1.086.443,18 |
| 1990-1991 | 1.726,61 | 1,110 | 258,73 | 446.722,13 | 2004-2005 | 956 | 1,036 | 241,28 | 386.889,83 |
| 1991-1992 | 3.949,27 | 1,105 | 257,44 | 1.016.702,71 | 2005-2006 | 866 | 1,030 | 240,08 | 486.035,43 |
| 1992-1993 | 3.110,94 | 1,099 | 256,16 | 796.897,99 | 2006-2007 | 874 | 1,025 | 238,88 | 271.087,43 |
| 1993-1994 | 5.007,85 | 1,094 | 254,89 | 1.276.428,07 | 2007-2008 | 850 | 1,020 | 237,70 | 158.361,96 |
| 1994-1995 | 1.530,80 | 1,088 | 253,62 | 388.237,45 | 2008-2009 | 642 | 1,015 | 236,51 | 322.227,00 |
| 1995-1996 | 881,03 | 1,083 | 252,36 | 222.332,84 | 2009-2010 | 713 | 1,010 | 235,34 | 742.209,18 |
| 1996-1997 | 1.326,92 | 1,078 | 251,10 | 333.189,72 | 2010-2011 | 824 | 1,005 | 234,17 | 719.593,73 |
| 1997-1998 | 2.632,66 | 1,072 | 249,85 | 657.772,27 | | | | | |

En términos gráficos, la tendencia tampoco presenta un promedio estable, tanto en el número de incendios como en los valores de pérdida. En general puede concluirse que

las 69.213,3 hectáreas dañadas por el fuego produjeron pérdidas aproximadas (montos actualizados) de USD 17.463.426,7.

Gráfico 5.3.5.e.- Relación N° de incendios, y pérdidas en dólares, temporadas 1984-1985 a 2010-2011. Pastizales y mezclas de Matorral.



En el gráfico anterior, ‘P_PASTZ_US\$’ corresponde a las pérdidas directas en dólares, para el Pastizales y mezclas de Matorral. En el caso de la valoración de pérdidas directas y de acuerdo a las cifras analizadas, la expresión matemática que mejor se ajusta es:

$$P = -62.463,37 + 47,45 * \rho + 259,13 * \varphi$$

$$r = 0,82$$

Donde:

ρ = N°de Incendios (sub.total por cada año evaluado). $N = 25.537$; $n = 27$ (temporadas)

φ = Superficie quemada.

5.3.6 Comentarios generales

El desarrollo de esta Fase I, forma parte del primer paso para el diseño de un sistema de estimación de pérdidas que permita integrar los distintos criterios y resultados aquí expuestos. Desde el punto de vista de la gestión en manejo del fuego, existe la necesidad

cierta de establecer criterios sólidos para la programación de gastos y estimación de los esfuerzos necesarios para afrontar de buena manera la temporada de incendios.

Resulta necesario incorporar otros criterios a los ya existentes, para valorar de mejor manera las pérdidas por incendios. Uno de ellos es el grado de afectación producido por el fuego en la vegetación (figura 5.3.6). Los resultados que aquí se presentan, se basan en las bases de datos de las instituciones que registran y almacenan los incendios, en cuyo caso no es posible establecer este grado, lo cual influye directamente en el cálculo final de las pérdidas. No obstante, los estudios desarrollados por Castillo (2006) para la misma área de estudio estima estos daños y lo asocia a valores de afectación muy similares a los aquí expuestos, variando sólo la escala de análisis.



Figura 5.3.6.- Grados de afectación en vegetación nativa. Rangos establecidos por Castillo (2006) para el estudio de paisajes vegetales mediterráneos afectados por incendios recurrentes.

5.4.- Fase II: Análisis económico de las fases presentes en el combate de incendios, aplicado a Chile.

5.4.1 Referencias generales

Los protocolos y mecanismos de defensa y control de incendios forestales que se aplican tanto en Chile como en otros países de similares condiciones territoriales y ambientales – excluyendo en esta apreciación los aspectos de disponibilidad económica de recursos para la prevención y combate –, no difieren sustantivamente entre un programa de protección u otro, ya sea público o privado. No obstante lo anterior, resulta frecuente observar la alta variabilidad que se produce entre el balance económico y daños producidos por el fuego, cuando se analizan incendios que se han sucedido en condiciones previas muy similares, tanto en las variables territoriales como en el entorno que propicia el inicio y posterior propagación del fuego. Dicho de otra manera, dos o más incendios que presentan iguales condiciones iniciales de combustibilidad, peligro en la propagación, condiciones topográficas y ambientales, pueden tener un comportamiento del fuego muy distinto entre un evento y otro.

Por tal razón, se hace necesario analizar y comparar la mayor cantidad de incendios posibles, de tal modo de establecer algunos patrones matemáticos que permitan vislumbrar tendencias entre las variables del comportamiento del fuego, y los costos asociados. Similar situación se produce en el estudio de las quemadas. En tal caso, una buena base muestral no siempre garantiza la construcción de modelos matemáticos que permitan asegurar un alto grado de confiabilidad respecto a la respuesta del fuego bajo condiciones pre-establecidas. En este apartado, se intenta establecer algunas relaciones matemáticas que permitan asociar el avance del fuego en relación a los tiempos de respuesta asociados a las fases del combate de incendios forestales.

5.4.2 Determinación de curvas modelo, para la estimación de tiempos en cada fase de combate en relación a la superficie afectada.

Se consideró una base de 1.006 incendios ocurridos en el área de estudio, para los años 1997 a 2011. De ellos, se tomaron aquellos que contuviesen antecedentes fiables de

tiempos y áreas afectadas para cada fase del combate de incendios. En este caso, el análisis se estableció sobre la base de los siguientes criterios:

a) Las fases del combate

En el desarrollo de las operaciones de combate es posible observar diversas etapas o fases que se ejecutan, por lo general, de manera secuencial: *Reconocimiento, Primer Ataque, Control, Liquidación* (conocido también como *Extinción*). Excepcionalmente se incluye como última fase, la *Vigilancia* o *Guardia de Cenizas* (Julio, 2010). En este análisis se incluye como fase previa, la *Detección*, cuyos contenidos prácticos se enfocan en la tarea de *Presupresión* (activación de los mecanismos y acciones potenciales para el combate), y cuyo propósito es el descubrimiento y localización oportuna de los incendios forestales que puedan iniciarse. En los siguientes gráficos y tablas, se expresan cuatro fases que contienen y describen la cronología de las acciones en el combate de incendios forestales, posibles de medir y analizar, tanto desde el punto de vista de los tiempos involucrados en cada fase, como también en las superficies afectadas. En un posterior análisis se complementan estos resultados con la inclusión de la variable de costos, esencial para cuantificar y evaluar en forma más precisa las distintas etapas del combate. En todos los casos los análisis se centran en la utilización de recursos terrestres, por la confiabilidad de los datos obtenidos y porque el análisis de los recursos aéreos requiere considerar otras variables, especialmente aquellas relacionados a incendios de mayor tamaño, y que para el propósito de esta tesis, están acotados a casos muy específicos que se analizan más adelante.

Estas acciones descritas se inician con la identificación en la base de datos de la primera etapa, que para efectos estadísticos, se ha definido como inicio, en la *Detección* (se explica más adelante). Luego de esta fase, interviene el aviso a la central de operaciones despacho, la salida y el posterior movimiento de los recursos, el arribo de éstos a un lugar cercano al incendio, y los tiempos de traslado desde un punto de llegada al sector inicial del combate. Esta secuencia es el caso típico de operación para brigadas terrestres. En el caso de despachos por medios aéreos intervienen otros factores, entre ellos los radios de tiempo de llegada (o cotas de isotiempo), dependiendo del tipo de aeronave y condiciones puntuales que puedan presentarse antes y durante las operaciones de vuelo y

posterior llegada al lugar del incendio. Considerando todos estos supuestos, y explotando la base de datos disponible, se analizaron las fases del combate desde el punto de vista de la revisión de incendios por tiempos asociados en cada componente, y en segunda instancia, por una asociación estadística entre estos tiempos, y las superficies afectadas. Una breve descripción de estas etapas se expone a continuación.

a.1) Detección: Es la acción dirigida a vigilar una zona bajo protección, con el propósito de descubrir y localizar los incendios forestales que puedan haberse iniciado. Es el primer paso de un proceso que comienza para lograr una oportuna extinción de los focos de fuego. La velocidad con que se lleva a efecto la detección es de gran importancia, porque la dificultad o esfuerzo de control se incrementa términos exponenciales en relación al tiempo transcurrido desde el momento de origen del incendio.

a.2) Primer ataque: Esta fase también es conocida como Detención del Frente Principal o Ataque Inicial. Corresponde a la primera acción de contención del fuego en la línea perimetral de avance. Es necesario aclarar que en esta descripción se omite (por no disponer de datos suficientes para su análisis) la importancia de una fase previa, conocida como *Reconocimiento* del incendio, que resulta fundamental en las operaciones de terreno, por cuanto permite evaluar las condiciones actuales del comportamiento del fuego, antes de la planificación de la estrategia inicial del combate. Si existen antecedentes respecto al lapso que se produce entre las fases de *Arribo* y *Reconocimiento*, y ésta última asociada al *Primer Ataque*, resulta entonces altamente conveniente considerarlos para este tipo de análisis. Lo normal y lógico es, en primer lugar, tratar de detener el frente de avance que implique los mayores problemas. Ahora bien, esta calificación no sólo está dada por el comportamiento del fuego, en lo que respecta a su modelo y velocidad de propagación, sino que también puede estar determinada por los valores que están siendo afectados, especialmente cuando estos corresponden a poblaciones o vidas humanas. En esta fase ya se comienza aplicar la estrategia definida en el reconocimiento del incendio, porque a veces, por las características del comportamiento del fuego, puede ser inconveniente iniciar las operaciones en el frente principal en lo que respecta a la velocidad de propagación, sino que en otros sectores, si de este modo se logra que definitivamente al término del incendio los valores dañados sean los menores posible.

a.3) Control: Se lleva a efecto una vez detenido el frente principal, y consiste en circunscribir todo el sector del incendio dentro de una línea o perímetro de seguridad, con el fin de impedir completamente su propagación. No siempre es necesario construir la línea en todo el perímetro del sector afectado, porque frecuentemente existen accidentes naturales, caminos o senderos que pueden aprovecharse para ese propósito. Por otra parte, dependiendo de los recursos disponibles, la magnitud del incendio y la estrategia de combate adoptada, la construcción de la línea puede ser efectuada simultáneamente en los frentes de avance en diferentes sectores del perímetro.

a.4) Liquidación (conocida también como fase de Extinción): Es la extinción de los focos que aún permanecen en el sector afectado por el incendio, mediante el remate de brasas y llamas, para evitar los rebrotes. Teóricamente se establece que la liquidación comienza cuando ya el incendio ha sido controlado, sin embargo, esta tarea puede comenzar antes, dependiendo de la disponibilidad de recursos y la localización de los puntos aún ardientes. Con frecuencia el control y la liquidación pueden ejecutarse en forma paralela. Por otra parte, tampoco es estrictamente necesario ejecutar la liquidación en toda la zona afectada por el fuego el sector. Cuando la superficie del incendio es muy extensa, a veces basta con el remate de las incandescencias en una franja de 50 o más metros de ancho, desde la línea de control hacia adentro (Julio, 2010).

b) La superficie afectada

Indudablemente que un aspecto crucial en el estudio de la evolución del incendio, es la superficie afectada y su perímetro, pues dependen directamente de un conjunto de variables topográficas, ambientales y de los tipos de combustibles (tipo, cantidad, condición, estructura y composición), por los cuales el fuego se propaga. En el caso de este análisis, los datos fueron separados en cinco grupos, con el propósito de minimizar el efecto matemático de la varianza y desviación estándar de los resultados para las áreas quemadas del total de la base de datos considerada. Para ello se realizó una breve revisión de la distribución de frecuencias de los incendios, dando como resultado la distinción de cinco grandes grupos: superficies menores o iguales a 1,00 ha ($n=34$); entre 1,01 y 5,00 ha ($n=131$); entre 5,01 y 20,00 ha. ($n=52$); entre 20,01 y 50,00 ha. ($n=13$); y mayores a 50,00 ha. ($n=9$).

No obstante la alta disponibilidad de datos presentes en las bases oficiales de incendios, se optó por analizar un conjunto representativo de incendios que tuviesen todos los datos necesarios para realizar las relaciones de tiempos, áreas y costos asociados, de manera de construir estimadores matemáticos para la relación de tiempo y áreas afectadas. En consideración a estos aspectos, se ilustran los resultados para estos cinco grandes grupos.

5.4.2.1 Resultados

a) Incendios de tamaño 0,01 – 1,00 ha.

Corresponde a una extensa proporción de incendios en vegetación natural, básicamente matorrales y pastizales, que se producen frecuentemente en áreas de alta conectividad y en sectores de interfaz urbano forestal. El protocolo del despacho y rápida atención a estos incendios, permite establecer un primer grupo, que no siempre corresponde a incendios de baja conflictividad. En casos ocasionales, pequeñas superficies han acarreado graves problemas en la contención del fuego, por las dificultades topográficas y de combustibles, no obstante el rápido acceso a los lugares afectados. El primer grupo de análisis, considerando la superficie y los tiempos de avance por etapas, se ilustra en los siguientes resultados.

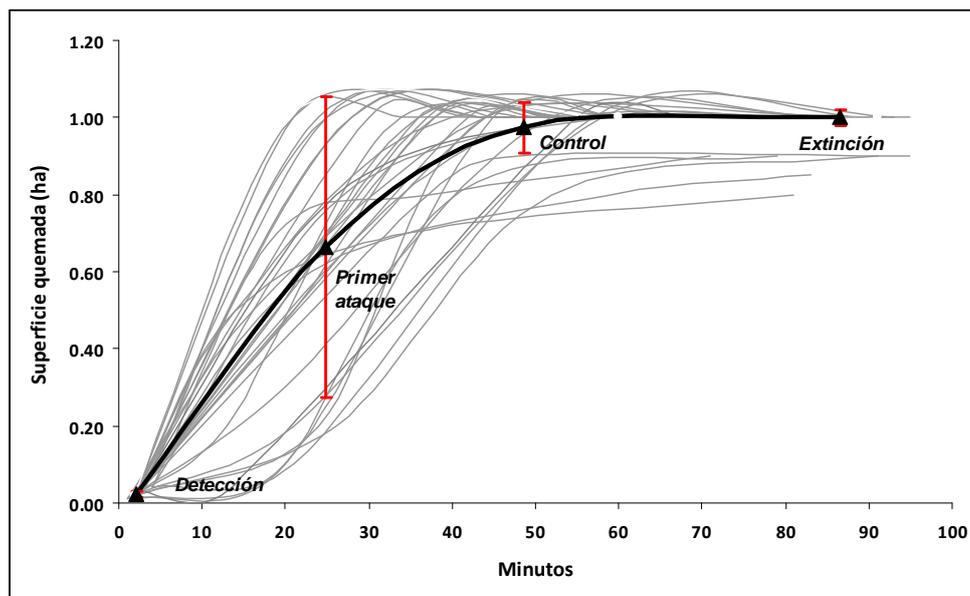


Gráfico 5.4.2.1.a.- Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño igual o inferior a 1 ha.

Cuadro 5.4.2.1.a.- Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño igual o inferior a 1 ha.

| Fase del combate | Tiempo transcurrido (min) * | Desv. Estándar (eje x) | Superficie quemada (ha) | Desv. Estándar (eje y) |
|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Detección | 2 | 0,76 | 0,02 | 0,01 |
| Primer ataque | 25 | 8,23 | 0,66 | 0,39 |
| Control | 49 | 8,32 | 0,97 | 0,07 |
| Liquidación | 87 | 23,27 | 1,00 | 0,02 |

* El tiempo transcurrido para cada fase, se considera como el promedio acumulado, para cada registro de la base de datos.

La distribución de los datos se ve representada de mejor forma, con las ecuaciones expresadas en el cuadro 5.4.2.1.b.

Cuadro 5.4.2.1.b.- Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño menor o igual a 1 ha. $n=34$.

| Ecuación | r | SCR |
|--|------|-------|
| $\rho = \frac{1}{1 + e^{3,6099 - 0,1839 * \varphi}}$ | 0,94 | 2,832 |
| $\rho = 0,1776 - 0,2755 * \ln(\varphi)$ | 0,91 | 4,085 |

Donde:

ρ = Superficie quemada (en hectáreas)

φ = Tiempo transcurrido (minutos desde la detección).

r = Coeficiente de correlación.

SCR = Suma de cuadrados de residuos.

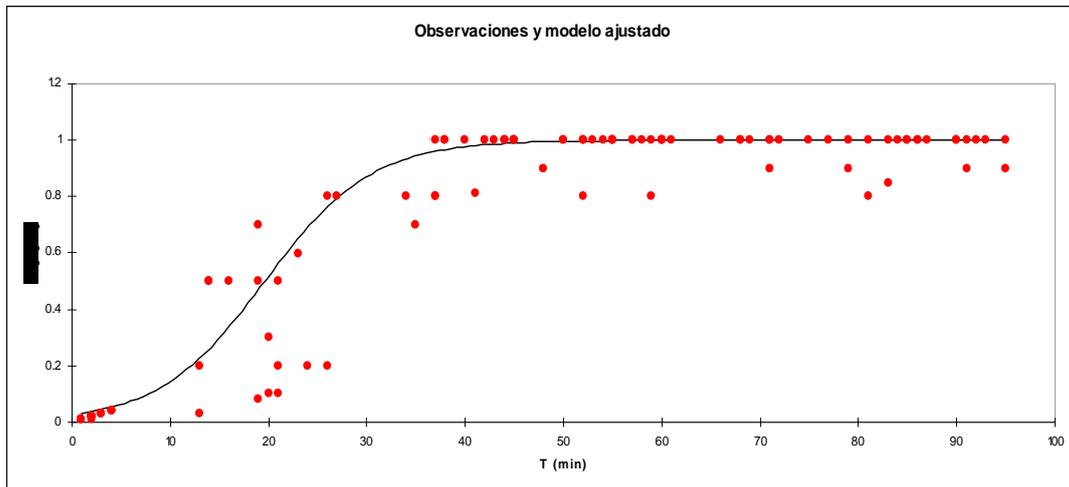


Gráfico 5.4.2.1.b.- Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño menor o igual a 1 hectárea. Modelo elegido: $\rho = 0,1776 - 0,2755 * \ln(\varphi)$

De acuerdo a estos análisis, la estabilización de los resultados se produce en promedio, en el umbral de 33 minutos y 1,05 hectáreas afectadas, datos que indudablemente

pueden variar levemente si la base muestral considera una mayor cantidad de datos fiables.

b) Incendios de tamaño 1,01 – 5,00 ha.

Corresponden a eventos de mayor conflictividad, que en muchos casos conlleva a la exigencia de mayores recursos para el combate, especialmente en medios aéreos. No obstante en las bases de datos no se detalla claramente el nivel de gravedad de ellos para esta categoría de tamaño, al revisar la localización espacial de los focos, es posible verificar que existe coherencia en la superficie afectada y el alto nivel de resistencia al control expuesto por el tipo de combustible, y las condiciones topográficas reportadas en las fichas de incendios. Los resultados, y de manera similar que en las otras clases de tamaño, se verifica una tendencia de tipo logarítmica, de acuerdo al siguiente gráfico.

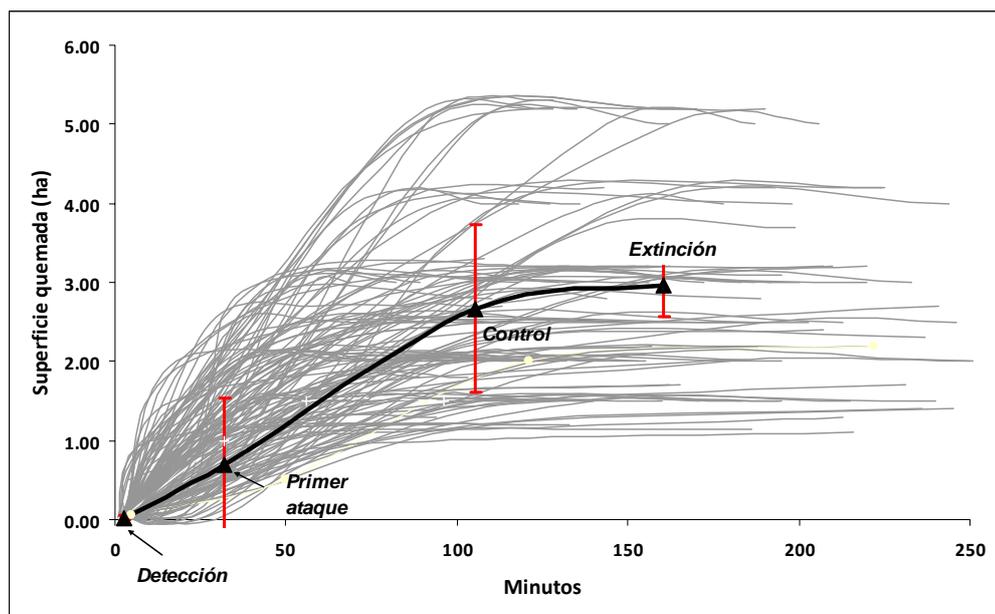


Gráfico 5.4.2.1.c.- Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha.

Cuadro 5.4.2.1.c.- Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha.

| Fase del combate | Tiempo transcurrido (min) * | Desv. Estándar (eje x) | Superficie quemada (ha) | Desv. Estándar (eje y) |
|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Detección | 3 | 2 | 0,03 | 0,02 |
| Primer ataque | 32 | 18 | 0,69 | 0,85 |
| Control | 105 | 54 | 2,67 | 1,06 |
| Extinción | 160 | 67 | 2,96 | 0,40 |

* El tiempo transcurrido para cada fase, se considera como el promedio acumulado, para cada registro de la base de datos.

La distribución de los datos se ve representada de mejor forma, con las ecuaciones expresadas en el cuadro 5.4.2.1.d.

Cuadro 5.4.2.1.d.- Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. $n=131$.

| Ecuación | <i>r</i> | <i>SCR</i> |
|---|----------|------------|
| $\rho = 2,9511 * \{1 - e^{-0.0176*\varphi}\}$ | 0,80 | 342,41 |
| $\rho = 0,6096 + 0,6312 * \ln(\varphi)$ | 0,77 | 379,49 |

ρ = Superficie quemada (en hectáreas)
 φ = Tiempo transcurrido (minutos desde la detección).
r = Coeficiente de correlación.
SCR = Suma de cuadrados de residuos.

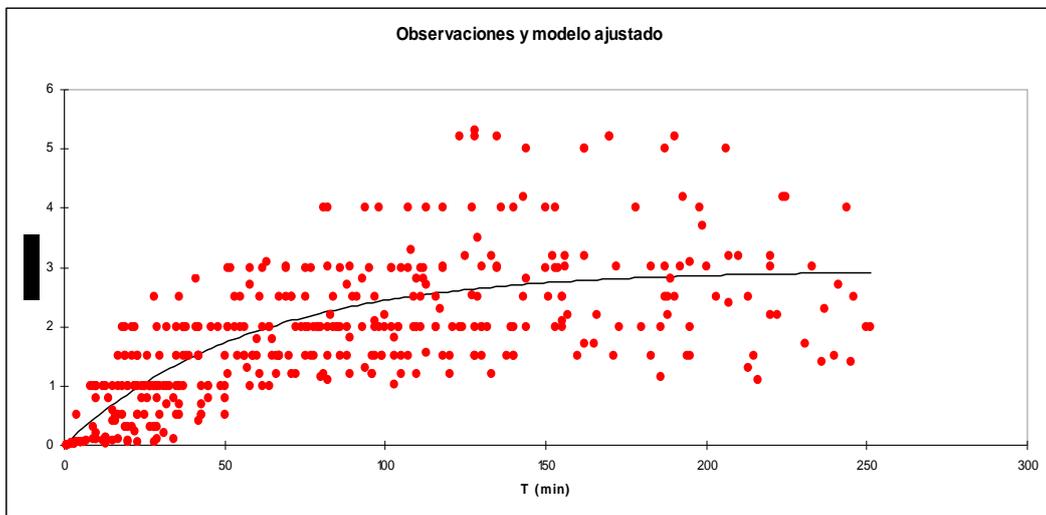


Gráfico 5.4.2.1.d.- Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño entre 1,01 y 5,00 ha. Modelo elegido: $\rho = 2,9511 * \{1 - e^{-0.0176*\varphi}\}$

La alta dispersión en la nube de datos, responde al comportamiento estocástico del fuego en condiciones difícilmente comparables entre un incendio y otro. Lo importante en este caso, es la verificación de una tendencia general, y que en cuyo caso, un coeficiente de determinación de 0,64 puede ser considerado como una primera aproximación válida para el estudio de este tipo de incendios y clase de tamaño.

c) Incendios de tamaño 5,01 – 20,00 ha.

En este rango de tamaño, se califican principalmente incendios de rápida propagación en superficie, y en cuyo caso – de acuerdo a lo observado en la práctica y en la revisión de las bases de datos –, corresponden a eventos activados en categoría de alerta amarilla o alerta roja. En ambos casos, por factores de accesibilidad, comportamiento errático del

fuego y aspectos técnicos en las operaciones de combate, el movimiento de recursos ha sido focalizado a la defensa de aquellos bienes y servicios asociados a la población localizada en áreas de interfaz urbano forestal. Una menor proporción de incendios aquí analizados, corresponden a propagación con labores de defensa en áreas abiertas, en donde predomina la vegetación de tipo matorral, pastizales y asociaciones con vegetación nativa densa. El siguiente gráfico ilustra la tendencia de la base de datos estudiada.

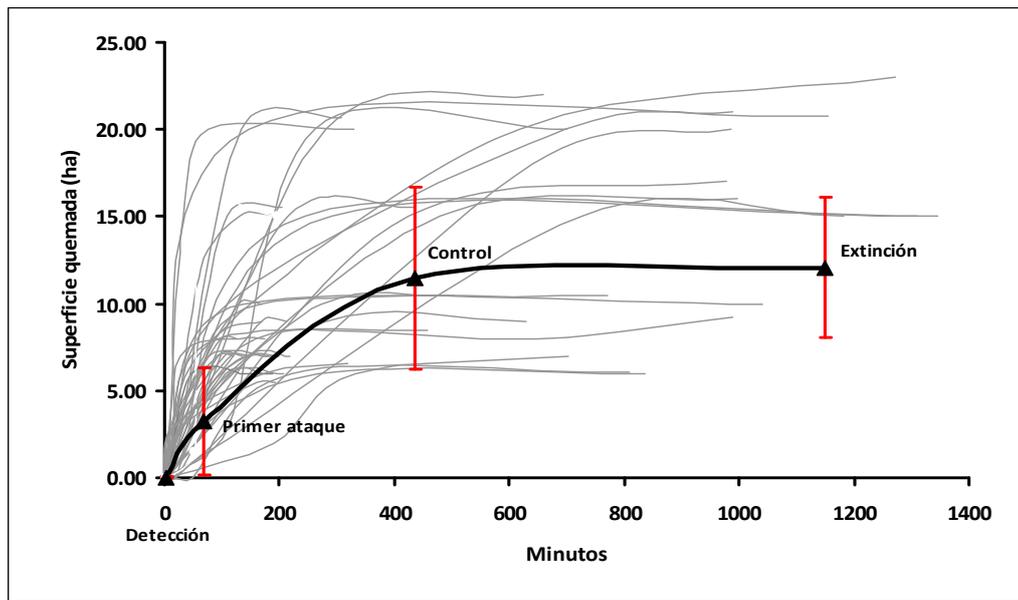


Gráfico 5.4.2.1.e.- Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha.

Cuadro 5.4.2.1.e.- Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha.

| Fase del combate | Tiempo transcurrido (min) * | Desv. Estándar (eje x) | Superficie quemada (ha) | Desv. Estándar (eje y) |
|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Detección | 3 | 2,12 | 0,03 | 0,02 |
| Primer ataque | 69 | 33,01 | 3,25 | 3,09 |
| Control | 437 | 614,71 | 11,43 | 5,23 |
| Liquidación | 1.149 | 543,22 | 12,08 | 4,01 |

* El tiempo transcurrido para cada fase, se considera como el promedio acumulado, para cada registro de la base de datos.

La distribución de los datos se ve representada de mejor forma, con las ecuaciones expresadas en el cuadro 5.4.2.1.f.

Cuadro 5.4.2.1.f.- Estimaciones estadísticas para los incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. $n=52$.

| Ecuación | r | SCR |
|--|------|----------|
| $\rho = 13,3553 * \{1 - e^{-0,0062 * \varphi}\}$ | 0,85 | 1.375,99 |
| $\rho = 2,6411 + 2,1914 * \ln(\varphi)$ | 0,82 | 1.598,51 |

ρ = Superficie quemada (en hectáreas)
 φ = Tiempo transcurrido (minutos desde la detección).
 r = Coeficiente de correlación.
 SCR = Suma de cuadrados de residuos.

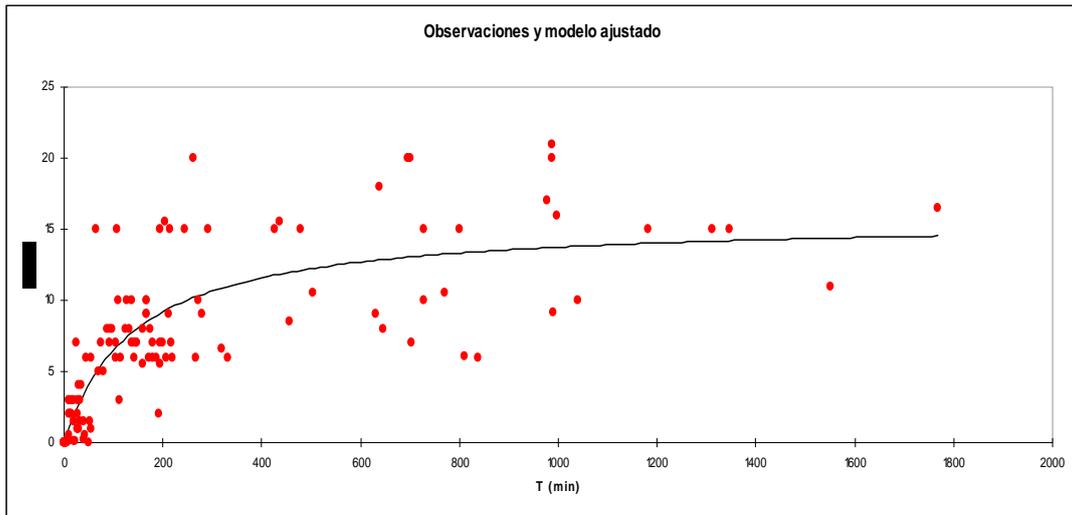


Gráfico 5.4.2.1.f.- Modelo ajustado a los datos, para incendios entre los rangos 5,01 – 20,00 ha. Modelo elegido: $\rho = 13,3553 * \{1 - e^{-0,0062 * \varphi}\}$

d) Incendios de tamaño 20,01 – 50,00 ha.

Corresponde a una escasa proporción de incendios (en esta clasificación se consideraron los 13 más importantes), que por su rango de tamaño abarcan procesos más extensos en las fases contempladas entre la detección y extinción. La característica más relevante es el promedio observado en la fase de control, que para esta muestra, es inferior al de la categoría de tamaño entre 5,01 y 20,00 ha. Contrariamente a lo que podría esperarse, las condiciones puntuales de cada incendio no siempre están correlacionadas a un mayor o menor tiempo en el control perimetral, si sólo se considera la relación área versus tiempo. En ocasiones, existen otros elementos que contribuyen a facilitar o complicar la labor de combate. En este caso, no obstante el tiempo medio acumulado desde la detección hasta el control fluctúa del orden de 355 minutos, la fase de extinción

perimetral culmina en un tiempo acumulado por sobre las 22,8 horas acumuladas, muy superior a la categoría de tamaño inmediatamente inferior.

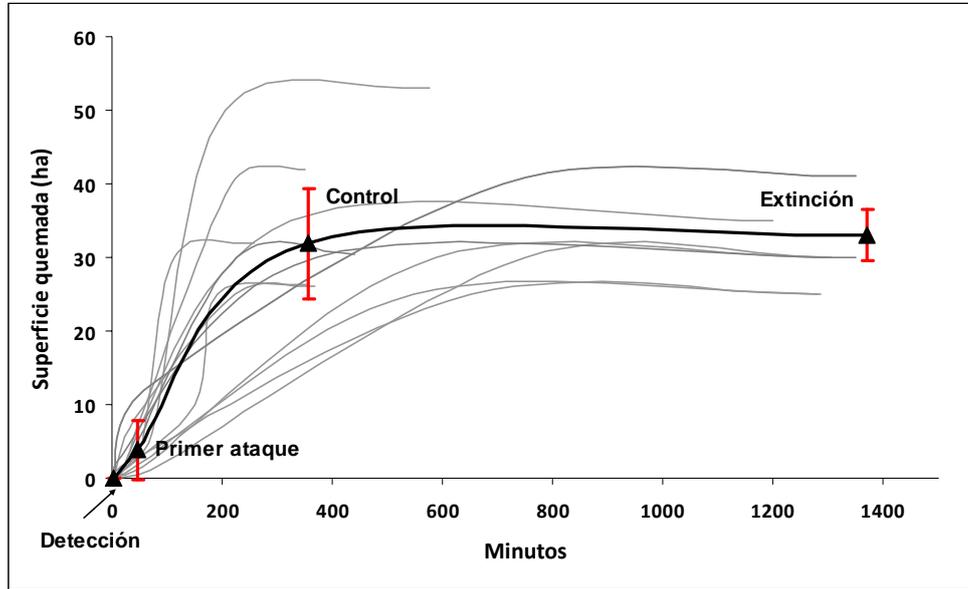


Gráfico 5.4.2.1.g.- Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha.

Cuadro 5.4.2.1.g.- Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha.

| Fase del combate | Tiempo transcurrido (min) * | Desv. Estándar (eje x) | Superficie quemada (ha) | Desv. Estándar (eje y) |
|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Detección | 2,46 | 2,02 | 0,02 | 0,02 |
| Primer ataque | 45,69 | 37,88 | 3,84 | 4,03 |
| Control | 355 | 805,30 | 31,92 | 7,51 |
| Extinción | 1.369,84 | 1.217,33 | 33,00 | 3,50 |

* El tiempo transcurrido para cada fase, se considera como el promedio acumulado, para cada registro de la base de datos.

La distribución de los datos se ve representada de mejor forma, con las ecuaciones expresadas en el cuadro 5.4.2.1.h.

Cuadro 5.4.2.1.h.- Estimaciones estadísticas para los incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. $n = 13$.

| Ecuación | r | SCR |
|--|------|----------|
| $\rho = 33,5618 * \{1 - e^{-0,0073 * \varphi}\}$ | 0,91 | 2.518,99 |
| $\rho = -6,9566 + 5,7714 \ln(\varphi)$ | 0,84 | 4.011,44 |

ρ = Superficie quemada (en hectáreas)

φ = Tiempo transcurrido (minutos desde la detección).

r = Coeficiente de correlación.

SCR = Suma de cuadrados de residuos.

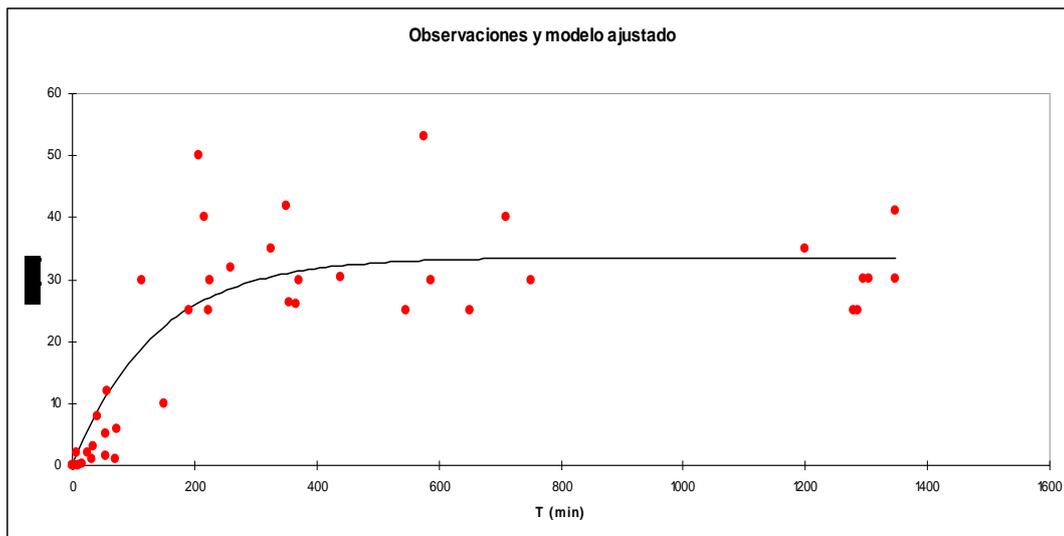


Gráfico 5.4.2.1.h.- Modelo ajustado a los datos, para incendios entre los rangos 20,01 – 50,00 ha. Modelo elegido: $\rho = 33,5618 * \{1 - e^{-0,0073*\varphi}\}$

e) *Incendios de tamaño mayor a 50,00 ha.*

Se consideraron aquellos incendios catalogados en alerta roja, con máxima atención en cuanto a asignación de recursos para el combate, y en la construcción de barreras para la defensa. En todos los casos analizados, existieron secciones perimetrales que fueron contenidas mediante la existencia de barreras naturales y/o la interrupción por caminos o cortafuegos previamente construidos. Se trata de incendios de alta conflictividad y enormes daños, por cuanto el tamaño medio de los eventos que se producen en la región, oscilan del orden de 3,41 hectáreas para 1.006 incendios (años 1997-2011), aún cuando al revisar los promedios entre categorías de tamaño, el rango de amplitud para el tamaño medio de área quemada es extremadamente variable, con valores máximos por sobre 100 hectáreas (2,78% del total de incendios analizados). El siguiente gráfico ilustra la tendencia para los incendios de mayor tamaño.

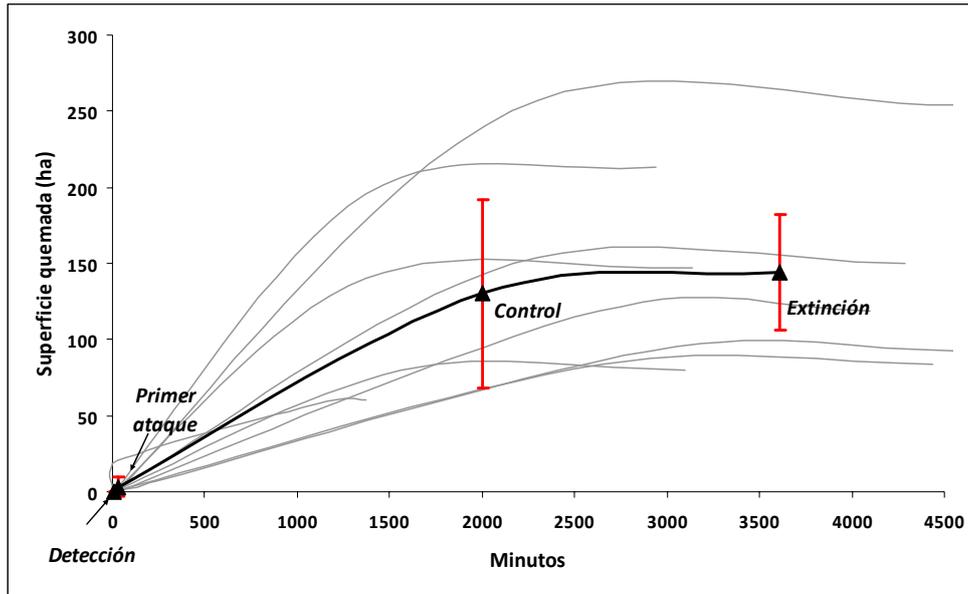


Gráfico 5.4.2.1.i.- Curva de estimación para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño superior a 50,00 ha.

Cuadro 5.4.2.1.i.- Parámetros para la relación superficie quemada y minutos transcurridos, por fase del combate. Incendios de tamaño superior a 50,00 ha.

| Fase del combate | Tiempo transcurrido (min) * | Desv. Estándar (eje x) | Superficie quemada (ha) | Desv. Estándar (eje y) |
|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Detección | 4 | 4 | 0,04 | 0,04 |
| Primer ataque | 29 | 15 | 3,26 | 6,38 |
| Control | 2.004 | 645 | 130,10 | 61,60 |
| Extinción | 3.610 | 1.068 | 144,00 | 38,00 |

* El tiempo transcurrido para cada fase, se considera como el promedio acumulado, para cada registro de la base de datos.

La distribución de los datos se ve representada de mejor forma, con las ecuaciones expresadas en el cuadro 5.4.2.1.j.

Cuadro 5.4.2.1.j.- Estimaciones estadísticas para los incendios de tamaño superior a 50 ha. $n=9$.

| Ecuación | r | SCR |
|---|------|-----------|
| $\rho = 141,225 * \{1 - e^{-1,2566\varphi}\}$ | 0,84 | 62.267,45 |
| $\rho = 37,3407 - 20,8243 * \ln(\varphi)$ | 0,81 | 75.589,77 |

Donde:

ρ = Superficie quemada (en hectáreas)

φ = Tiempo transcurrido (minutos desde la detección).

r = Coeficiente de correlación.

SCR = Suma de cuadrados de residuos.

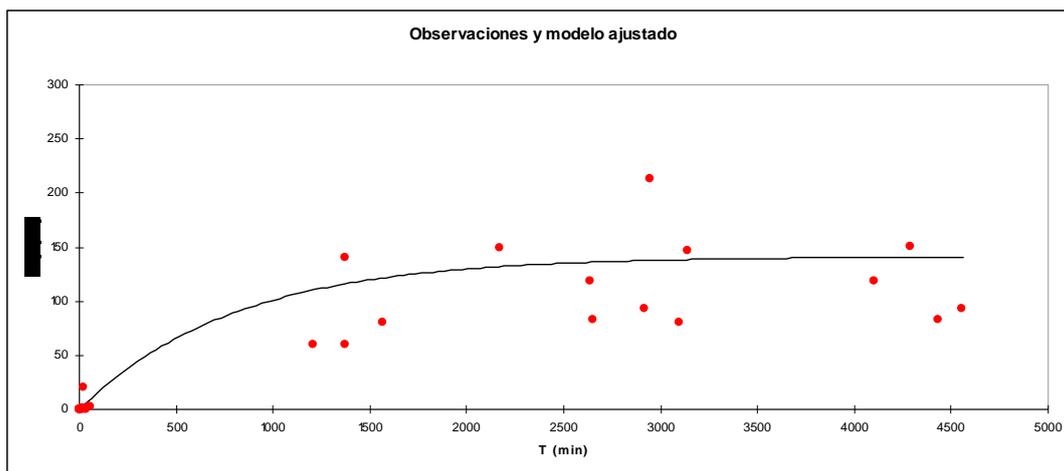


Gráfico 5.4.2.1.j.- Modelo ajustado a los datos, para incendios de tamaño mayor a 50,00 ha.
 $\rho = 141,225 * \{1 - e^{-1,2566\phi}\}$

5.4.3 Análisis de las fases de desarrollo de incendios basada en líneas de defensa y costos de combate, y su comparación con el avance libre del fuego. Estudio de caso.

5.4.3.1 Referencias generales

El objetivo de esta sección es el de mostrar y comparar en forma visual el aspecto general de la progresión espacial que se produce en el desarrollo de un incendio, considerando las labores de defensa que se aplicaron en el combate mismo, y el avance del fuego en propagación libre, es decir, estableciendo la inexistencia de labores de control. Esta actividad se considera útil para la evaluación de las estrategias de combate como también en el diagnóstico y cuantificación de la carga de trabajo necesaria para controlar el incendio a un tiempo objetivo establecido dentro de ciertas pautas de gestión. Por lo general, y considerando que los incendios son muy distintos unos de otros, se propone el estudio de un evento cuyos antecedentes de terreno fueron registrados por el personal técnico que participó en el combate. Estos antecedentes, sumados al estudio de las curvas de diagnóstico presentadas en la sección anterior, permiten disponer de mayores antecedentes para la definición de umbrales o tiempos promedio mínimos, necesarios para contener el avance del fuego bajo ciertas características de propagación del fuego.

5.4.3.2 Estudio de caso. Incendio ocurrido el 14 de enero de 2008.

Con el propósito de ilustrar las curvas de progreso de los incendios analizados anteriormente, se consideró como estudio de caso un incendio real ocurrido el año 2008 (identificado en los registros como *Cerro La Cruz*), y cuyas fases de desarrollo fueron registradas por técnicos y personal que trabajó en terreno durante ese incendio, tanto en operaciones aéreas y terrestres.

Estos datos permitieron estimar una serie de parámetros de medición. Entre ellos, se determinó el progreso en tamaño y forma del incendio mediante el cálculo de las tasas de propagación, junto con estimar los costos en el combate basados en las fichas finales de los recursos que fueron considerados para ese evento. Las líneas de defensa fueron recreadas mediante el empleo de un SIG, en el cual se determinaron los trabajos realizados en cada flanco activo del incendio. A modo inicial, se exponen en el cuadro 5.4.3.2.a, los tipos de recursos considerados para este análisis, basados en las tablas de costos de Conaf, Región de Valparaíso – Chile.

Cuadro 5.4.3.2.a.-
Costos de operación recursos básicos
para el combate de incendios forestales en Valparaíso – Chile.

| Recurso de combate | Costo \$/hora |
|---------------------------|----------------------|
| Brigada terrestre (1) | 89.453 |
| Avión Dromader | 870.000 |
| Helicóptero Bell-212 | 1.457.750 |

(1) Considera un promedio de 7 combatientes, más el Jefe de Brigada y Jefe de Cuadrilla. Todos operando con herramientas manuales. Considera además el costo interno de bienes y servicios asociado al funcionamiento de la brigada.

El evento se produjo el 14 de enero de 2008, fecha de plena temporada de incendios forestales en toda la región Centro-Sur de Chile. Las condiciones meteorológicas que prevalecieron en ese día fueron extremas. A la hora de inicio (15:36), la temperatura ambiente era de 31°C, con una humedad relativa del aire de 29%, y ráfagas de vientos desde el Sur-Oeste superiores a 37 km/hora, con máximos reportados post inicio del fuego, superiores a 60 km/hora. Estas condiciones fueron tomadas en terreno por el personal que tuvo a su cargo la coordinación de las operaciones de combate en tierra y aire, para los distintos frentes de avance.

Los parámetros considerados para el seguimiento del incendio correspondieron a los distintos reportes de avance del fuego (área quemada y llegada gradual de recursos a terreno), las incidencias producidas en cada etapa del combate (despacho de recursos, arribo de los mismos, definición de alertas, órdenes de evacuación), la localización de las líneas de defensa y puntos de lanzamiento de las aeronaves, como también una estimación de la tasa de propagación superficial del fuego. En forma paralela se recreó toda la información en el SIG, con el apoyo de imágenes de Google Earth (figura 5.4.3.2.a). A base de estos antecedentes, se determinaron los tramos de propagación, sus tasas de avance, y los costos involucrados en cada etapa del combate.

En forma paralela, se utilizó el módulo de expansión de incendios forestales del Sistema KITRAL, con el propósito de recrear el desarrollo del incendio en un avance libre, es decir, sin considerar las líneas de defensa instaladas en terreno. Sobre la base del SIG que dispone el simulador, se configuró el entorno de simulación, mediante el ajuste de parámetros indicado en el cuadro 5.4.3.2.b.



Figura 5.4.3.2.a.- Visión desde Sur a Norte, de los trabajos realizados en el incendio *Cerro La Cruz*. Las líneas en rojo indican el trabajo efectuado por brigadas terrestres. Las coloreadas en celeste y azul, corresponden a sectores donde trabajaron recursos aéreos (lanzamientos con helicóptero y avión). Las líneas blancas corresponden a ensanches efectuados por las brigadas.

Cuadro 5.4.3.2.b.- Parámetros de simulación en KITRAL,
necesarios para la recreación del incendio *Cerro La Cruz*.

| | |
|-------------------------|----------------|
| Ventana de simulación | 2.000 m |
| Resolución temporal (1) | Cada 5 minutos |
| Tamaño celdilla | 5 metros |
| Tiempo a simular (2) | 3,42 horas |

(1) Corresponde a una definición de cotas de isotiempo, que permite mostrar en pantalla la evolución de los flancos de propagación. / (2) Valor correspondiente al incendio real: 15:36 – 18:51 = 3 horas y 25 minutos.

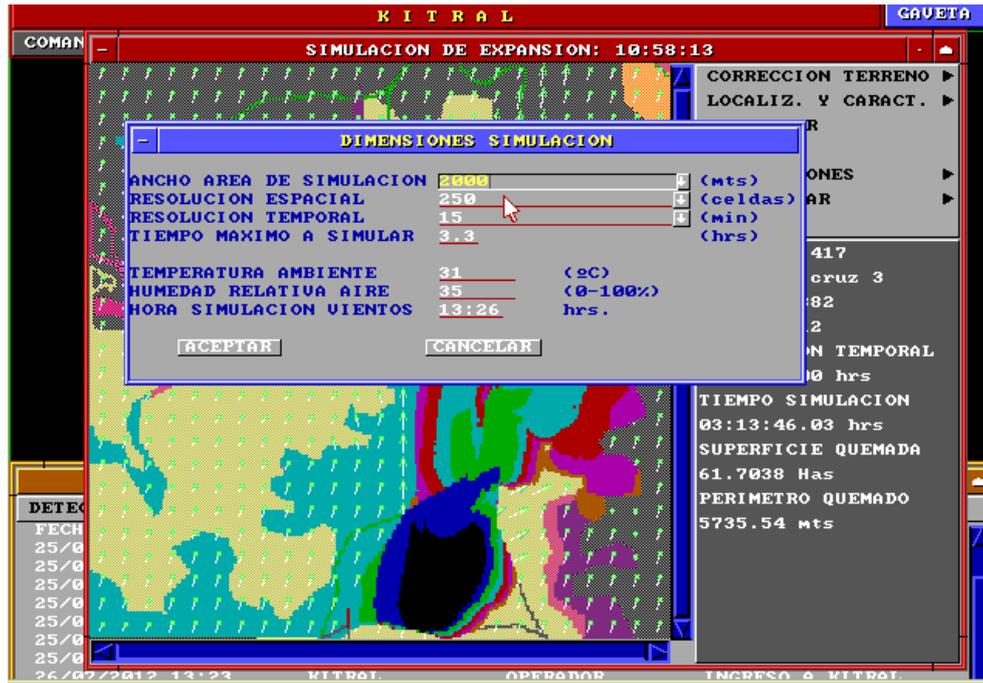


Figura 5.4.3.2.b.- Ventana del simulador de incendios forestales KITRAL. En ella se muestran los principales parámetros de entrada al sistema. Valores actualizados en etapas sucesivas de la simulación.

Es necesario señalar que se corroboraron y ajustaron las capas de información espacial que permiten operar el sistema, tales como los modelos de combustible, la topografía local, la existencia de accidentes naturales, huellas o caminos, y los parámetros meteorológicos necesarios para el funcionamiento de las ecuaciones de propagación del fuego (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa del aire). Se consideraron las condiciones meteorológicas en la evolución y desarrollo del modelo de propagación, especialmente en el ajuste de la velocidad y dirección de los vientos que predominaron durante el desarrollo del incendio. Estos ajustes, más los señalados en el cuadro anterior, permitieron obtener un pronóstico en forma paralela a la evolución del incendio real. Un primer resumen de los resultados se expresa en el cuadro 5.4.3.2.c.

Cuadro 5.4.3.2.c.-

Recreación incendio *Cerro La Cruz* (14 enero 2008), y análisis comparativo de su evolución con el Sistema KITRAL.

| Etapa | T (min) (1) | Hora | Incidencia | Escenario real | | | | | | | | Escenario simulado (KITRAL) (7) | | |
|---------------------|-------------|-------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|--------------|------------------------------------|
| | | | | Sup (ha) (2) | Δ Sup (ha) (3) | Avance fuego (m ² /min) | Líneas de defensa (m) | Recurso (4) | Δt operaciones (5) | Costo \$ (6) | Costo (US\$) (7) | Min. | Sup (ha) (8) | Avance fuego (m ² /min) |
| 0 | 0 | 15:36 | Inicio | 0 | 0 | 39,28 | -- | -- | -- | -- | -- | 0 | -- | -- |
| 1 | 28 | 16:04 | Primer ataque | 1,70 | 1,70 | 294,20 | 89,54 | T ₁₂ | 10 | 14.909 | 32,91 | 28 | 2,12 | 757,40 |
| 2 | 38 | 16:14 | Alerta amarilla | 3,18 | 1,48 | 1.480 | 133,33 71,18 118,31 497,96 | T ₅ T ₅ T ₁₂ T ₆ | 20 | 119.270 | 241,92 | 38 | 5,39 | 1.418,42 |
| 3 | 58 | 16:34 | Alerta roja | 8,48 | 5,13 | 2.565 | 433,26 383,00 130,81 424,18 | T ₅ T ₁₂ T ₁₂ T ₁₁ | 15 | 89.453 | 181,44 | 58 | 10,34 | 1.782,76 |
| 4 | 73 | 16:49 | Evacuación. Máxima gravedad | 13,66 | 5,18 | 3.450 | 60,61 127,00 285,66 323,73 | A ₅ , A ₁₃ , D T ₁₁ T ₂₀ T ₁₂ | 121 | 8.286.624 | 16.808,57 | 73 | 17,77 | 2.434,25 |
| 5 | 194 | 18:51 | Casas quemadas | 20,25 | 6,34 | 523,9 | 62,98 59,79 | A ₅ , A ₁₃ , D T ₁₀ | 167 | 7.636.358 | 15.489,57 | 194 | 61,77 | 3.184,02 |
| Costo total: | | | | | | | | | | 16.146.614 | 32.754,41 | | | |

(1): Minutos acumulados desde el inicio del incendio. El minuto cero corresponde a la hora de inicio real. Posteriormente ocurre la detección y despacho de recursos. / (2): Superficie real, en hectáreas. Valores acumulados según desarrollo del incendio. / (3): Diferencia incremental en superficie. / (4): Recursos aéreos y terrestres que intervinieron en las líneas de defensa. Se desglosan en brigadas, aviones y helicópteros. T = terrestre. A = aéreo. Aeronaves Bell-212. El numeral subíndice corresponde al recurso específico (ejemplo: brigadas terrestres Palma 5, 6, 10, 11, 12, 20 = T₅, T₆, T₁₀, T₁₁, T₁₂ y T₂₀ respectivamente; Helicóptero H-5 (Bell-212) = A₅; Avión Dromader = D. / (5): Trabajo efectivo en tiempo, de acuerdo a la fase del combate (minutos). / (6): Costos de extinción. No considera los daños ocasionados por el fuego. / (7): Valor dólar al 24/07/2012. / (8): Propagación libre del fuego, sin considerar líneas de defensa.

El cuadro anterior permite obtener algunas relaciones entre ambos escenarios (real y simulado). Por ejemplo, si se comparan los valores de áreas afectadas por intervalos de desarrollo, es posible verificar similitudes entre el avance libre, y la contención del fuego mediante líneas terrestres de defensa. No obstante, cuando intervienen los medios aéreos, se detiene ostensiblemente el avance en los tramos de mayor propagación, justamente en las áreas de mayor pendiente y con material combustible de alta inflamabilidad. Por otra parte, KINTRAL simula el avance libre, modelando una entrada del frente principal de avance hacia el sector Este del incendio, favorecido por los vientos dominantes y la alta pendiente.

Estos resultados tienden a confirmar la sensibilidad del modelo de propagación frente al efecto conjunto de las variables meteorológicas, particularmente la humedad relativa y la temperatura, como también el efecto combinado del viento (velocidad y dirección), y la pendiente en el frente principal de avance.

Respecto a los costos de extinción, la notable diferencia existente entre las etapas 3 y 4 del incendio, se deben esencialmente a la actuación de aeronaves, cuyo costo/hora de operación fluctúan entre los \$870.000 y \$1.458.000. Bajo las condiciones por las cuales se produjo el avance del fuego, con el inminente daño a viviendas, fue necesario destinar este tipo de recursos. Las tasas de propagación, que normalmente no superan los 330m²/min en condiciones promedio para incendios de pastizales y matorrales con presencia de viento, sobrepasaron por algunos instantes los 3.000m²/min, generando condiciones extremas de comportamiento del fuego.

Se efectuó un análisis comparativo de los daños, entre el escenario con presencia de líneas de defensa y avance libre. En ambos casos no se consideró el daño a las viviendas. Este aspecto se abordó en forma separada, dada la alta magnitud de las cifras respecto al valor de los daños de la vegetación quemada. En términos generales las similitudes se mantienen hasta la declaración de alerta roja y orden de evacuación de las viviendas amenazadas. En ese instante se producen los más altos niveles de gravedad, y en donde se opta por la aplicación masiva de medios aéreos, que permitieron controlar casi por completo el frente de avance que estaba ocasionando la mayor parte de los daños. No obstante la propagación libre, y de acuerdo a las condiciones meteorológicas

extremas, pronosticaron un desvío en el frente de avance en dirección frontal a la ubicación de viviendas.

Cuadro 5.4.3.2.d.-

Análisis comparativo de las pérdidas producidas en Cerro La Cruz y lo reportado por KITRAL para las condiciones de desarrollo del incendio.

| Tramo (min) | Sup. real (ha) | Pérdida directa (US\$) | Sup. KITRAL (ha) | Pérdida directa (US\$) |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 28 | 1,7 | 398,09 | 2,12 | 496,44 |
| 38 | 3,18 | 744,67 | 5,39 | 1.262,28 |
| 58 | 8,48 | 1.985,76 | 10,34 | 2.421,52 |
| 73 | 13,66 | 3.198,76 | 17,77 | 4.161,20 |
| 194 | 20,25 | 4741,94 | 61,77 | 11.007,24 |

Es importante señalar que en el cuadro anterior no está considerada la pérdida económica de las viviendas. En este incendio, se vieron afectadas 119 casas, en cuyo caso la proporción aproximada del daño fue de 30% para pérdida total y 70% para pérdida parcial (estimando en 1/3 el daño total). De estos antecedentes, el análisis comparativo indica que en el incendio de Cerro La Cruz, en donde casi el 100% de viviendas afectadas correspondieron al estrato socioeconómico 3 (estrato bajo), las pérdidas ascendieron aproximadamente a US\$1.222.950. Empleando el simulador KITRAL en avance libre, estas pérdidas potenciales se estimaron en un valor superior a los US\$2,5 millones.

En términos gráficos, se ilustra la relación de las áreas quemadas y la tasa de avance del fuego. En ambos casos las relaciones son similares. Tienden a variar ostensiblemente, cuando se aplica un refuerzo en las líneas de defensa. En avance libre, KITRAL simula hasta 3,42 horas un pronóstico de más del doble de la superficie real afectada. Estas cifras sirven de antecedente para establecer los umbrales de combate, en el sentido de conocer bajo distintas condiciones operativas el cambio en el nivel de gravedad en el comportamiento del fuego. Este incendio analizado cae dentro de la categoría 5-20 hectáreas, en donde su curva de respuesta obtenida en el análisis de la sección 5.4.2.1., indica que en promedio, un área quemada del orden de 12,5 hectáreas es controlada a los 400 minutos de iniciado el incendio. En el caso de Cerro La Cruz, la cronología reporta 20,25 hectáreas a 261 minutos desde el inicio (15:36 – 19:57) horas. No obstante, el tiempo de control fue mucho mayor, dado que a las 19:57 horas el incendio aún estaba declarado en alerta roja debido a la entrada del fuego a las casas y a la actividad en los otros flancos del incendio. Naturalmente que los rangos obtenidos en el

análisis de curvas modelo de desarrollo de incendios, conforman referencias generales, dado que las condiciones existentes entre un incendio y otro son muy variables.

Gráfico 5.4.3.2.a.- Relación de áreas quemadas entre escenario real y simulado.

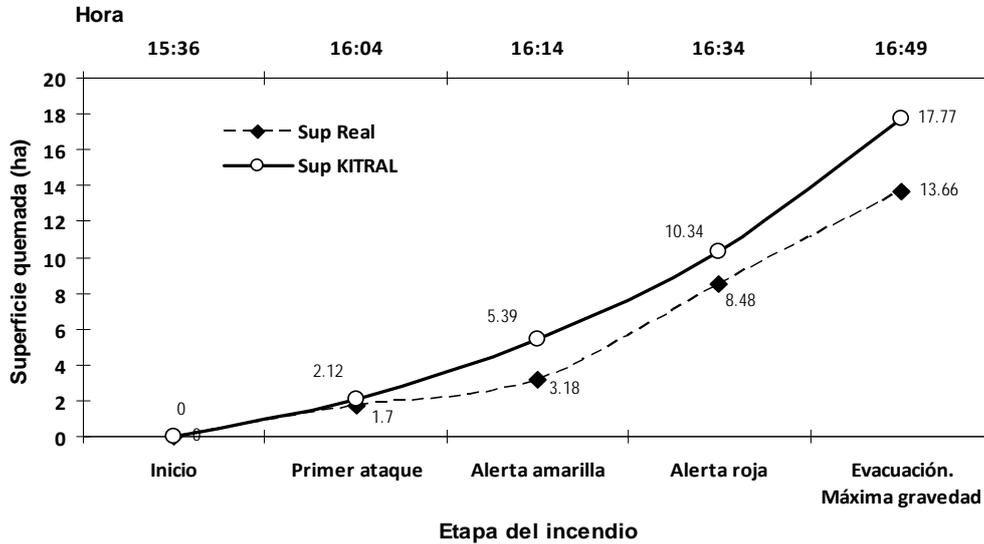
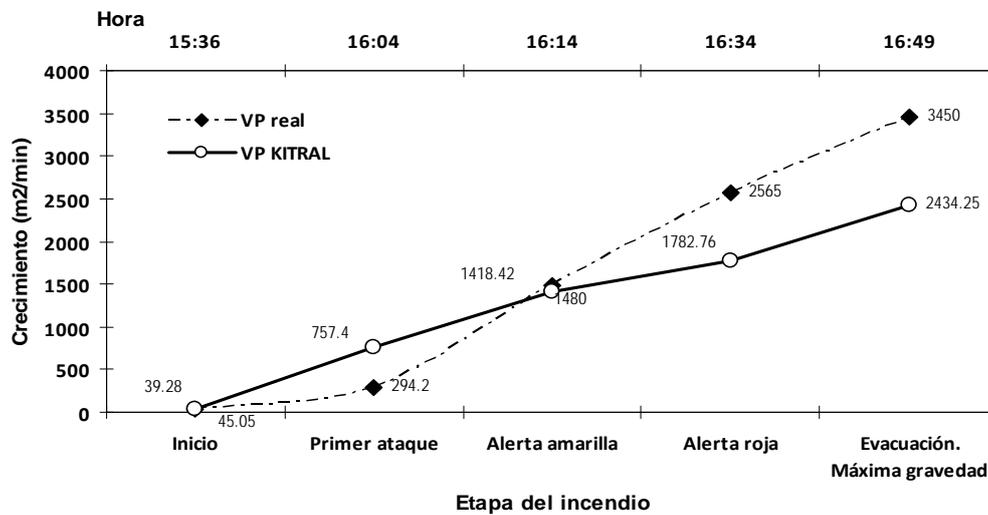


Gráfico 5.4.3.2.b.- Relación de velocidades de avance del fuego entre escenario real y simulado.



Una recreación de la simulación de este incendio forestal de interfaz urbano-forestal, se presenta en la siguiente figura. Mediante el sistema KITRAL, se consideraron todas las condiciones de tipo meteorológicas y topográficas, verificando como paso previo, la veracidad en la existencia de los modelos de combustible que realmente se presentaban al inicio del incendio.

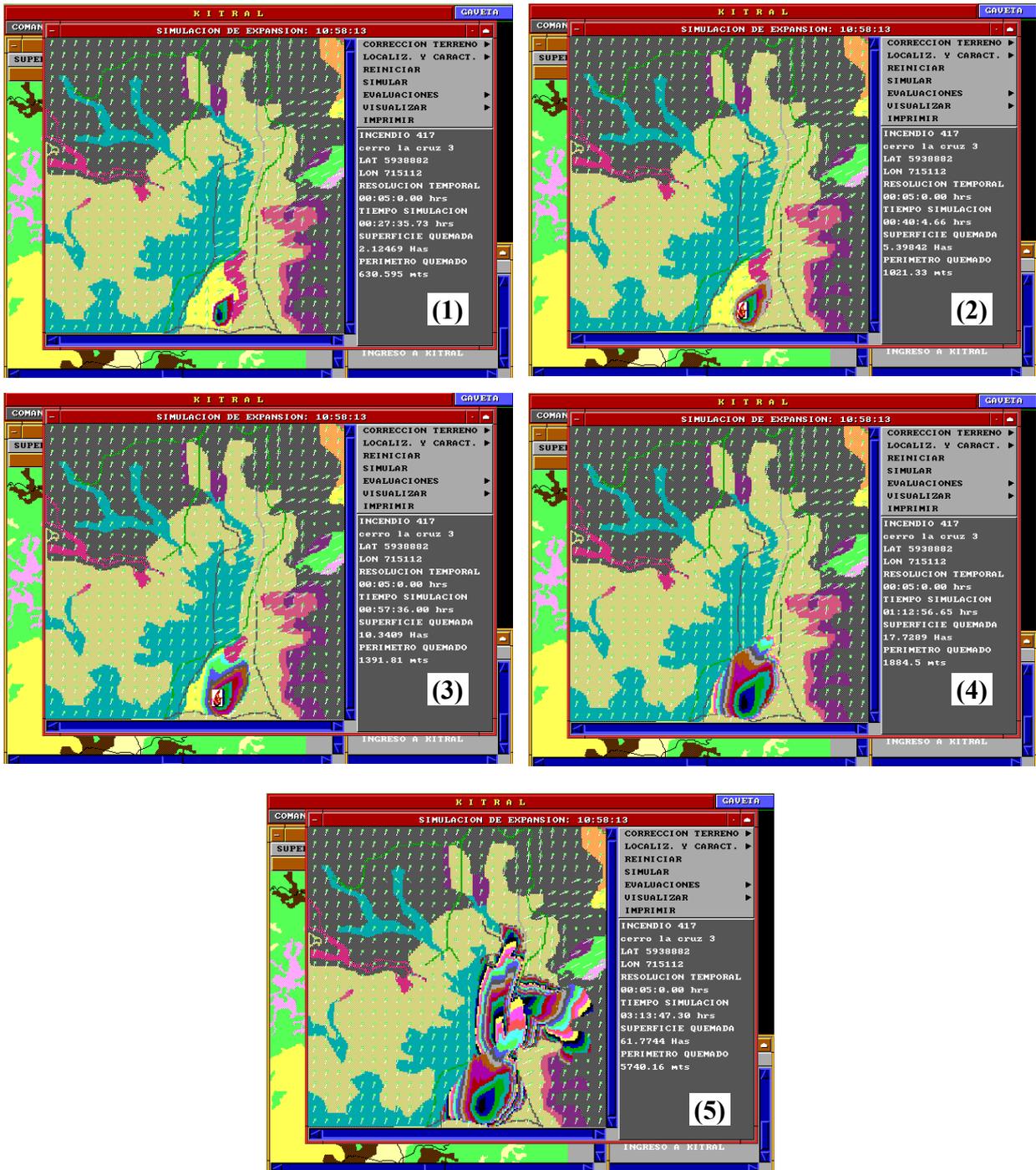


Figura 5.4.3.2.c.- Recreación del incendio Cerro La Cruz. En los 5 cuadros de resultados, se ilustra el avance del fuego en propagación libre. La presencia de casas de alta inflamabilidad y la presencia de vientos desde el Sur-Oeste, hacen que el modelo pronostique un violento avance hacia las casas localizadas hacia el sector Nor-Este y Este. Simulación mediante el Sistema KITRAL.

Con el propósito de evaluar el trabajo de los medios aéreos y terrestres en el área afectada por este incendio, se efectuó el cálculo del factor de contracción superficial (FCS), y discutir de esta manera el efecto de la inclusión sucesiva y coordinada de recursos para la contención del fuego en cada frente de propagación. El FCS corresponde al cociente entre el avance real con labores de contención y el avance libre (real/libre). Estos antecedentes podrían aportar mayor información respecto a los puntos críticos en las fases del combate que requieren mayor atención para la toma de decisiones. Indudablemente este antecedente es referencial, pues depende en gran medida de la disponibilidad de recursos, muchas veces escasa cuando se presenta simultaneidad de focos activos. Fue el caso de Cerro La Cruz, en donde la disponibilidad de medios aéreos se hizo evidentemente insuficiente para atender incendios que se desarrollaban a la misma hora y a distancias considerables. No obstante, lo reportado en las comparaciones de la simulación, dejan en evidencia la efectiva labor de los medios de extinción que trabajaron en ese incendio.

Cuadro 5.4.3.2.e.- Cálculo del FCS por etapas de desarrollo del incendio Cerro La Cruz

| Hora | Incidencia | Sup Real | Sup KITRAL | FCS real/libre | Efectividad (1-FCS) |
|-------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 15:36 | Inicio | 0 | 0 | -- | -- |
| 16:04 | Primer ataque | 1,7 | 2,12 | 0,80 | 0,20 |
| 16:14 | Alerta amarilla | 3,18 | 5,39 | 0,59 | 0,41 |
| 16:34 | Alerta roja | 8,48 | 10,34 | 0,82 | 0,18 |
| 16:49 | Evacuación. Máxima gravedad | 13,66 | 17,77 | 0,77 | 0,23 |
| 18:51 | Casas quemadas | 20,25 | 61,77 | 0,33 | 0,67 |

Los resultados ponen en evidencia el notable apoyo en las labores de extinción proporcionado por los medios aéreos, los cuales operaron en la etapa de máxima gravedad (16:49), hasta el desarrollo final del incendio, aún cuando estos medios llegaron en forma tardía por cuanto fueron despachados desde otro incendio activo (*Fundo San Jorge*), declarado en alerta roja. Las condiciones abruptas del terreno y la alta propagación e intensidad calórica del frente de avance principal, ocasionaron valores bajos de efectividad en las etapas iniciales, precisamente por la escasez de medios terrestres disponibles en las etapas iniciales del desarrollo del incendio. Posteriormente la propagación es controlada con el apoyo de las líneas de ensanche y con lanzamientos sucesivos de 2 helicópteros Bell-212 y Avión Dromader, que en un lapso aproximado de 2 horas, lograron elevar la tasa de efectividad, y con ello, contener el frente de propagación que estaba ocasionando los mayores daños.

El valor de FCS ha sido clasificado y tabulado de acuerdo a experiencias de estudios en otros incendios que han ocurrido, particularmente en España. De estos antecedentes (cuadro 5.4.3.2.f), los resultados aquí expuestos indican una alta tasa de efectividad en la extinción, considerando todos los elementos de tipo técnico y operativo que se presentaron en el incendio de *Cerro La Cruz*.

Cuadro 5.4.3.2.f.-
Clasificación de FCS de acuerdo a experiencias de incendios en España.

| Tasa efectividad en la extinción | Clasificación |
|---|----------------------|
| 0 – 0,028 | Bajo |
| 0,0281 – 0,48 | Moderado |
| 0,481 – 0,8 | Alto |
| 0,81 – 1 | Muy Alto |

Naturalmente que el ajuste de este factor, dependerá en gran medida de las condiciones locales y particulares que se presenten en cada país, especialmente en lo relativo a los protocolos establecidos previamente para la atención de emergencias, en las acciones coyunturales que se presenten en terreno, y en las características específicas de las variables y factores que condicionan el comportamiento del fuego. No obstante como referencia general, se establece un punto de partida para la necesidad de seguir estudiando este tema.

5.4.4. *Relaciones entre el daño ocasionado por incendios, y los costos asociados a la extinción.*

Con el propósito de establecer con mayor precisión la relación entre el gasto asociado al combate y los daños ocasionados por el fuego, en esta sección se expone un breve análisis económico, basado en el registro de incendios para la Región de Valparaíso. Los antecedentes disponibles permitieron crear una base de datos que sirviera como punto de referencia para establecer relaciones estadísticas entre las labores efectuadas en terreno, sus costos asociados, y los daños expresados en superficie quemada al primer ataque como también al control.

La diversidad de situaciones presentes en cada incendio, hace muy difícil establecer parámetros o tendencias estadísticas robustas, por cuanto en la ocurrencia y daños

confluyen situaciones operativas de diversas características y que no necesariamente están registradas en las bases de datos originales.

A modo de ejemplo, existe una gran cantidad de incendios combatidos en zonas de interfaz, y que no necesariamente responden a una misma tendencia estadística en cuanto a gasto y daños, que los que se presentan en áreas no calificadas como interfaz. A su vez, la segmentación por categoría de tamaño de áreas quemadas tampoco aporta antecedentes suficientes como para establecer parámetros de comparación entre gasto y daño.

Por tal razón, se consideraron registros de incendios cuya información contemplara, entre otros antecedentes, detalles de las operaciones terrestres y aéreas, y de los tiempos específicos que se originaron entre las fases de primer ataque y contención inicial del fuego. Para efectos de cálculo, se estimaron los daños directos e indirectos a la vegetación afectada, considerando las tablas de modelos de combustibles del Sistema KINTRAL, y de las publicaciones recientemente ejecutadas en el área de estudio mediante el Proyecto SEVEIF sobre modelos de vulnerabilidad contra incendios forestales.

Para el estudio de la base de datos, se establecieron algunos estándares, necesarios para el cálculo de costos intermedios presentes en las operaciones terrestres y aéreas. Como convención se definieron algunos aspectos técnicos indicados en el cuadro 5.4.4.a., que hacen referencia a costos mínimos de desplazamiento, de operación en terreno y de costos/hora para el trabajo de medios aéreos. Todos los resultados fueron expresados en una planilla Excel, en cuyo caso, se seleccionaron todos aquellos registros a contar del año 2009, que contemplaran la intervención de medios terrestres y aéreos.

Se generó un listado de 5.876 eventos, con los cuales se determinaron relaciones estadísticas de gasto y daño. Dada las extremas diferencias encontradas en el análisis de dos o más incendios con características de áreas quemadas similares pero con daños y costos de operación muy distintos entre sí, no permitió establecer tramos de análisis (clase de tamaño), tal como se hizo para las curvas de respuesta descritas anteriormente. Por tal razón, los análisis consideran el conjunto total de datos, desde incendios inferiores a 1 hectárea, hasta incendios de gran magnitud.

Cuadro 5.4.4.a.-
Parámetros y criterios definidos para el análisis de
costos presentes en la base de datos de incendios.

| Aspecto a considerar | Criterios aplicados |
|--|--|
| Costo de operación de brigada terrestre | <ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de combatientes por brigada: entre 5 y 12. • Tiempos de operación: inicio primer ataque hasta el control • Duración legal de la jornada: 10 horas • Duración real de trabajo: diferencia entre tiempo de inicio de combate, y el primer control. • Costos fijos de transporte: costo/mes y costo/día, establecidos por la institución. Considera también otros recursos tales como camiones cisterna, bomberos y maquinaria pesada. |
| Costo de operación de medios aéreos | <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de aeronave: Avión Dromader PZL-M18B, Helicóptero Bell 212, AirTractor 802. • Costo/hora de operación: entre \$870.000 (aviones) y \$1.457.000 (helicópteros). • Tiempo de operación: medido en horas. |
| Costos mínimos | <ul style="list-style-type: none"> • Para el transporte terrestre de brigadas: \$83.533/día por misión (despacho al incendio). Considerado en el cálculo como “<i>bienes y servicios</i>”. • Para el trabajo de brigadas con herramientas manuales: \$17.676/día. Cálculo basado en la cantidad mínima de hombres y tiempo promedio mínimo de operación. • Se consideró el costo mensual de un Jefe de Brigada, Jefe de Cuadrilla y Combatiente. |

La distribución de los datos, considerando la variable de tamaño de incendios, muestra una clara concentración en eventos inferiores a 1 hectárea. En la práctica, ello sucede por la gran cantidad de incendios de interfaz que suelen combatirse en el área de estudio. Una glosa de esta composición, se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.4.4.b.-
Distribución de incendios por clase de tamaño
(área quemada en hectáreas)

| Clase de tamaño (ha) | <i>n</i> | % |
|----------------------|----------|-------|
| ≤ 1 | 4.560 | 77,76 |
| > 1 ≤ 5 | 915 | 15,57 |
| > 5 ≤ 20 | 233 | 3,96 |
| > 20 ≤ 50 | 82 | 1,40 |
| > 50 | 86 | 1,47 |

De esta composición por tamaño, se tomó una muestra proporcional a la cantidad de incendios, cuyos antecedentes pudiesen permitir un análisis básico de los datos.

En primera instancia, se efectuó la determinación de los tiempos efectivos en el combate, los cuales fueron utilizados para el cálculo de las operaciones terrestres y aéreas, como también su relación estadística con el área afectada. De estas relaciones, fue posible construir las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1: $\varphi = b_0 + 220.28 * \alpha_1 - 0,00166 * \rho + 132.72 * \alpha_2 ; n = 5.876 ; r = 0,87$

Ecuación 2: $\varphi = b_0 - 0,126 * \rho + 134.53 * \alpha_2 ; n = 5.876 ; r = 0,88$

Donde:

b_0 = Constantes del modelo (3.279,21 para ecuación 1 y 3.491,85 para ecuación 2.

φ = Gasto total en el combate (aéreo φ_1 y terrestre φ_2) (US\$)

α_1 = Superficie afectada al primer ataque (ha)

ρ = Daño total (Directo ρ_1 + Indirecto ρ_2) (US\$)

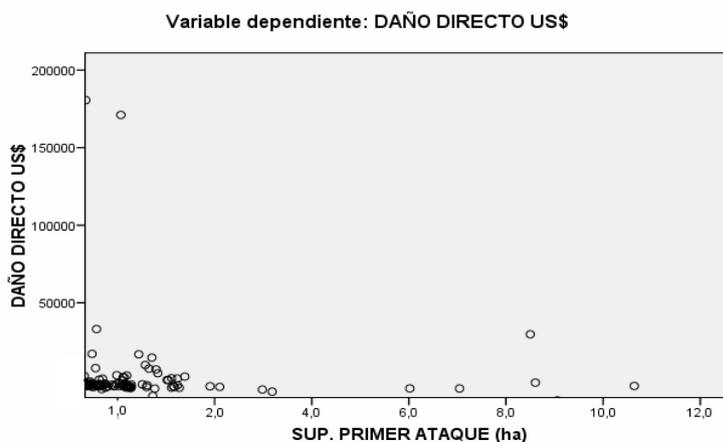
α_2 = Superficie final afectada ((ha)

Un mejor ajuste en los datos se obtuvo utilizando como variable dependiente el Daño Directo ρ_1 (US\$), y como predictores el Gasto Total φ , la Superficie al primer ataque α_1 y la superficie final afectada α_2 .

Lo anterior tiene en parte su explicación en el análisis de las curvas de respuesta descritas en la sección 5.4.2, por cuanto la segmentación de incendios por categorías de tamaño, muestra en todos los casos que el combate oportuno del fuego se expresa en distintos umbrales de tiempo, con un límite para todas las clases no superior a los 17 – 33'. Sobre este tiempo, el grado de complejidad en el avance del fuego es de tipo exponencial, con una tendencia a la estabilización en los daños por superficie, variable en función de las condiciones locales de propagación del fuego y de la oferta de medios para la extinción.

Los resultados de la estimación indican un r 0,91, basado en la estimación de los siguientes parámetros: $\rho = f \{b_0, \alpha_1, \alpha_2, \varphi_1, \varphi_2\}$. Es decir, manteniendo la premisa que el daño total es función de las superficies inicial y final afectadas, y el efecto combinado de las operaciones aéreas y terrestres, la tendencia se ilustra en los siguientes gráficos:

Gráfico 5.4.4.a.-
Relación existente entre Daño Directo y Primer ataque.



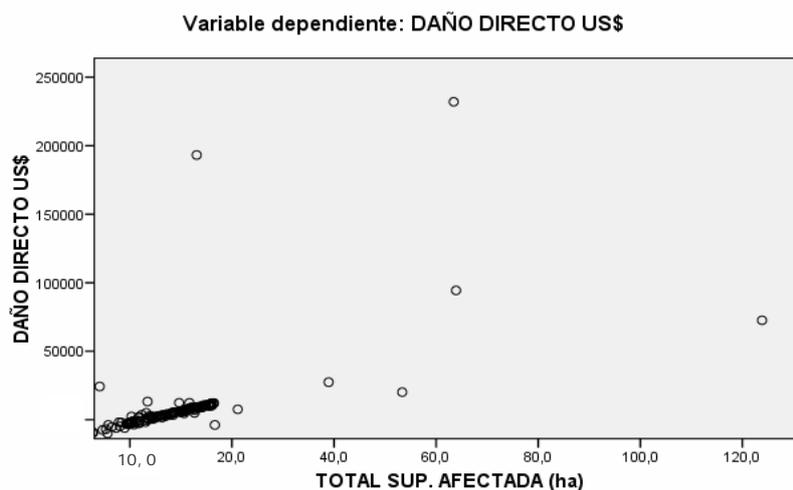
En la muestra utilizada, se describe una superficie de avance en torno a las 0,97 hectáreas para el primer ataque, y con daños directos promedio en torno a los US\$9.512. Aún cuando estas cifras presentan una muy alta dispersión en los datos, se presenta una agrupación para el 77,76% de los incendios con superficie final menor o igual a 1 hectárea, en cuyo caso es posible encontrar un subgrupo de datos que concentra los daños en un monto aproximado de US\$1.713 a un promedio de afectación de 0,4 ha. Se trata de incendios cuyo tiempo de arribo y primer ataque son mínimos. Por otra parte, un número de 3.320 incendios presentan una superficie igual o inferior a 0,1 ha (56,5% de la muestra total de 5.876 incendios) con un daño directo promedio de US\$383,71, es decir, menos de 4 veces de los incendios con superficie menor o igual a 0,4 ha. Ello hace concluir que en la mayoría de los casos, el ataque oportuno (promedio primeros 15 – 17 minutos desde el primer aviso) minimiza considerablemente la evolución potencial de los daños.

Similar análisis es pertinente realizar si se comparan los resultados existentes entre la relación del daño directo (focalizado en la vegetación combustible) y el total de la superficie quemada al momento del control. Existen datos dispersos en la nube de puntos, que se explican por la alta diversidad de situaciones posibles de caracterizar en incendios. Como se indicaba anteriormente, casi un 80% de la ocurrencia se concentra en superficies menores a 1 hectárea, mientras que sólo un 1,47% de los incendios catalogados de magnitud (superiores a 50 hectáreas) genera prácticamente el 90% de los daños, tanto directos como indirectos. En el siguiente gráfico se muestra que en la base de datos de incendios, se produce una tendencia lineal constante en el incremento de los

daños directos, hasta un umbral aproximado de US\$12.500 para superficies promedio a 15 hectáreas. Normalmente los mayores daños van asociados a los gastos más elevados en el combate, especialmente cuando intervienen medios aéreos.

Esto último ocurre con mucha frecuencia en el área de estudio, por la existencia de grandes áreas de interfaz urbano forestal, que suponen un alto riesgo y conflictividad potencial en el combate de incendios. Por esta razón, la existencia de protocolos de ataque inicial con aviones y helicópteros, hace que la estadística de gasto y daño tenga una alta desviación estándar, no siendo posible aún, con la información disponible, discriminar dentro de la base de datos que tipo de incendios fueron catalogados como interfaz o combate de tipo rural.

Gráfico 5.4.4.b.-
Relación existente entre Daño Directo y Total de Superficie Afectada.

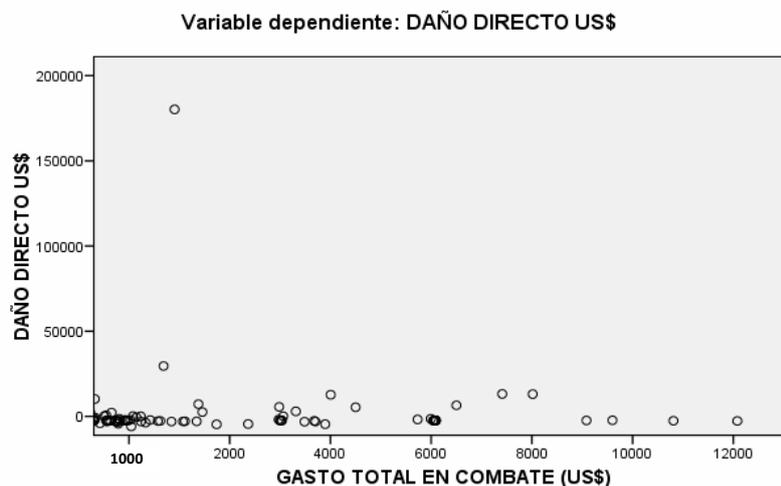


La tendencia lineal antes comentada, se ve en el anterior gráfico. Se presentan todos los resultados para ilustrar la dispersión de los mismos. El Daño Indirecto – cuantificado mediante coeficientes de ajuste a los componentes ambientales – sigue la misma tendencia lineal, pero en magnitud muy superior a los montos promedio de Daño Directo.

En el mismo análisis, se analiza la tendencia de los gastos incurridos en combate. Dada la alta variabilidad existente entre los costos de operación de medios terrestres respecto a los aéreos, se segmentó la muestra en dos sub-componentes. El promedio del gasto en brigadas terrestres es de US\$211,73 por misión de combate, mientras que para medios

aéreos (aviones y helicópteros) asciende en promedio a US\$2.866,23 por misión. Este último valor equivale aproximadamente a 55 minutos de trabajo en combate, para ambos casos.

Gráfico 5.4.4.c.-
Relación existente entre Daño Directo y Total de Superficie Afectada.



En el gráfico 5.4.4.c., se define un gasto total que aparentemente no condiciona mayormente el monto de los daños directos. No obstante, al revisar los detalles de cada incendio es posible determinar que la mayor parte del gasto se concentra en la contención de incendios de superficie muy reducida pero de alta conflictividad (alertas amarilla y roja). Si bien es cierto este aspecto no es recogido directamente de la revisión de los datos mismos de la base de datos, es una conclusión que se desprende de las innumerables visitas a terreno y testimonios del personal que ha trabajado en la contención de incendios en áreas reducidas.

5.5.- Análisis econométrico en la eficiencia de extinción

Los antecedentes aquí expuestos muestran resultados desde el punto de vista de la relación existente entre gasto y daños ocasionados por el fuego. En esta sección se profundiza el estudio presentando un análisis basado en funciones matemáticas de eficiencia, en el ámbito de la econometría. En primer lugar, se exponen los elementos disponibles para este análisis, agrupado en las siguientes categorías:

5.5.a. *Valor económico de los recursos naturales.*

Los recursos involucrados en las funciones de eficiencia se separan en:

- a) Plantaciones comerciales de pino radiata: Parámetro *A*
- b) Plantaciones comerciales de eucaliptus: Parámetro *B*
- c) Arbolado nativo (todas sus subcategorías): Parámetro *C*
- d) Matorral nativo (todas sus subcategorías): Parámetro *D*
- e) Pastizales y mezclas de matorral: Parámetro *E*

En función de la cantidad de incendios considerada para el estudio, se define un número *n*, que responda a atributos definidos para las categorías *A* hasta *E*, y la superficie quemada (definida aquí por φ). De esta manera, se propone la función anidada de valor económico de pérdidas ρ , dada por:

$\rho = \varphi^* \{n, \varphi\}$; donde φ^* representa la variación delta en superficie, para cada tramo de propagación, según tipo de combustible afectado.

Adicionalmente se define la función que determina la superficie quemada φ , en función del tiempo transcurrido, hasta el momento de la contención del perímetro de avance. En tal sentido el análisis se centra en la segmentación de incendios de acuerdo a las clases de tamaño presentadas en el cuadro 5.4.4.b: < 1,00 ha; 1.01-5,00 ha; 5,01-20 ha; 20,01-50,00 ha, y >50,00 ha. Existe la posibilidad de realizar la integración de información llevando los resultados obtenidos para estas clases de tamaño, a la función ρ . Con ello se obtiene el valor de pérdidas para cada uno de los grupos:

Cuadro 5.5.a.-
Valores de pérdidas (expresadas en US\$), por clases de tamaño
(área quemada en hectáreas)

| Clase de tamaño (ha) | <i>n</i> | % | Valor $\rho = f(n, A, \dots, E)$ en US\$. Promedio | ρ Total (US\$) = $f(n)^*$ |
|----------------------|----------|-------|---|--------------------------------|
| ≤ 1 | 4.560 | 77,76 | 1.713,24 | 7.812.374,40 |
| > 1 ≤ 5 | 915 | 15,57 | 15.480,98 | 14.165.096,70 |
| > 5 ≤ 20 | 233 | 3,96 | 82.281,51 | 19.171.591,83 |
| > 20 ≤ 50 | 82 | 1,40 | 242.082,75 | 19.850.785,50 |
| > 50 | 86 | 1,47 | 1.628.442,49 | 140.046.054,14 |

* Incendios reportados para el período 2009-2012.

No obstante se esperaría encontrar relaciones crecientes de valores de pérdida total a medida que el tamaño de incendios aumenta, se debe considerar que la muestra se concentra en más de un 77% en incendios de pequeña superficie. Al respecto queda de manifiesto que escasos incendios que puedan afectar a vegetación de las más altas categorías de valor comercial, concentran prácticamente el 85% de los daños totales, si se considera que tan solo el 1,47% de la muestra total origina valores promedio 8 veces superior a lo quemado en incendios de categoría menor a 1 hectárea. Adicionalmente es necesario considerar que las estimaciones aquí expuestas presentan una enorme variación interna, producto de la proporción de superficie quemada por cada una de las cinco clases de vegetación combustible que se consideraron para este estudio. Indudablemente que en una segunda fase más depurada, sería recomendable contar con registros equivalente de superficies dañadas por tipo de vegetación, para cada categoría de tamaño final.

5.5.b. Análisis del Factor de Contracción (FCS) en el contexto econométrico.

Tal como se expuso en el apartado 5.4.3.2, respecto al estudio práctico de incendios en un contexto de velocidad y dirección, y sus comparaciones derivadas de la medición entre libre avance y con labores de contención, se explica a continuación la relación econométrica existente entre los costos de extinción, las pérdidas directas y el área afectada por el fuego. Para tal propósito se expone nuevamente el Factor de Contracción Superficial (*FCS*), integrando estos tres elementos, ahora expresado en el contexto de la simulación computacional con KINTRAL, y la superficie real afectada. En primer lugar, es necesario definir una función de costos y pérdidas, en dependencia del área afectada y del tiempo transcurrido en la propagación del fuego. Para ello se define la siguiente expresión:

$$M(c + d) = h(a, T) * FCS + d(a, FCS, T)$$

En la expresión anterior, *M* es la función que define la dependencia matemática en la suma de costos en operaciones de extinción (*c*), y las pérdidas económicas (*d*). Esta función varía en relación al área afectada (*a*), el factor de contracción superficial (*FCS*), y el tiempo transcurrido en el incendio (*T*). Considerando que los costos marginales de extinción (*h*) en teoría aumentan con el área afectada, la cantidad de incendios (*N*)

influye directamente en la capacidad de atención de recursos terrestres y aéreos para el combate:

$$\frac{\partial M(c+d)}{\partial FCS} = N + \frac{\partial d}{\partial FCS} = 0. \text{ Despejando } N, \text{ se obtiene entonces: } N = -\frac{\partial d}{\partial FCS}$$

Incorporando FCS al análisis, ahora considerando el área afectada, permite obtener la expresión:

$$\frac{\partial M(c+d)}{\partial a} = \frac{\partial h}{\partial a} FCS + \left\{ \frac{\partial d}{\partial FCS} * \frac{\partial FCS}{\partial a} \right\} = 0, \text{ para obtener } = \frac{\partial h}{\partial a} FCS - N \frac{\partial FCS}{\partial a} = 0$$

Desarrollando ahora FCS y los costos marginales de extinción (h), es necesario encontrar el punto de equilibrio:

$$\frac{\partial M(c+d)}{\partial(h * FCS)} = 1 + \frac{\partial d}{\partial(h * FCS)} = 0, \text{ de manera que } \frac{\partial d}{\partial(h * FCS)} = -1$$

En las expresiones anteriores, el valor crítico a determinar es el costo promedio que se identifica por cada tramo de superficie afectada, objeto de la clasificación.

5.5.c. Aplicación a los costos reales

Desarrollando la relación de costos marginales, y de acuerdo al cambio existente en la velocidad de propagación del fuego para los incendios simulados, y los antecedentes reportados en las bases históricas, es posible establecer las siguientes relaciones (cuadro 5.5.b). El análisis comparativo contempla el uso de recursos terrestres, y para los incendios de mayor clase de tamaño, el empleo de helicópteros y aviones.

Cuadro 5.5.b.- Costos promedio (expresadas en US\$), por clases de tamaño (área quemada en hectáreas), y su relación con la cantidad y tipo de recursos utilizados para el combate(*)

| Clase de tamaño (ha) | <i>n</i> | % | Costo <i>h(a)</i> US\$/ha Promedio/evento* | Combinación de recursos más utilizada | Costo asociado (US\$). Total de la muestra |
|----------------------|----------|-------|--|--|--|
| ≤ 1 | 4.560 | 77,76 | 3.077,96 | 2 brigadas de 8 combatientes, 1 helicóptero | 14.035.497,60 |
| > 1 ≤ 5 | 915 | 15,57 | 4.222,80 | 4 brigadas, 1 camión aljibe, 1 helicóptero | 3.863.862,00 |
| > 5 ≤ 20 | 233 | 3,96 | 6.424,07 | 4 brigadas, 1 avión ó 1 helicóptero | 1.496.808,31 |
| > 20 ≤ 50 | 82 | 1,40 | 5.847,88 | 4 brigadas, 2 camiones, 2 helicóptero, 1 avión | 479.526,16 |
| > 50 | 86 | 1,47 | 24.493,05 | Todos los recursos disponibles | 2.106.402,30 |

* Considera costos de operación para recursos aéreos y terrestres.

En cada uno de los casos expuestos en el cuadro anterior, se realiza una caracterización promedio de la combinación de recursos más utilizada. Normalmente estas combinaciones suelen presentar alternancias, especialmente cuando se trata de incendios en áreas de interfaz. En tal caso, predomina la utilización de medios aéreos para la rápida contención del avance del fuego, en áreas que usualmente no superan 1 hectárea.

Vinculando esta información con los tiempos medios de atención, es necesario establecer tramos con un factor denominado *tiempo efectivo*, y que corresponde a un descuento a los cálculos generados del seguimiento de cada fase del combate. Este valor, se acuerdo a referencias de Rodríguez y Silva & González-Cabán (2010), fluctúa en torno a 0,8.

Considerando los resultados obtenidos para los análisis de las curvas de respuesta desarrollados en la sección 5.4.2, y el tiempo efectivo antes señalado, se elabora una tabla con costos unitarios de extinción (factor c), considerando como período la fase de *primer ataque*, hasta la *extinción* del fuego, que para este estudio se entiende como aquellas labores que permiten contener el avance perimetral del incendio, y bajo disponibilidad efectiva de recursos aéreos y terrestres, que para el caso de la segmentación por tamaños de incendios, ya ha sido estimada según el cuadro 5.5.b.

Se excluye del análisis los tiempos de seguimiento post extinción (una vez controlado el avance perimetral), por no contar con antecedentes suficientes como para establecer los costos. Lo anterior puede expresarse en una relación matemática simple, que contempla la suma sucesiva de recursos j , para una combinación de los mismos entre aéreos y terrestres α , en un umbral de tiempo de operación t para cada clase de tamaño T , y a un costo unitario de extinción C_u :

$$c_{\alpha} = \sum_{j=1}^n j_i \{t_T * c_{u_T} * \alpha_T\}$$

El siguiente cuadro ilustra los costos c_{α} para cada clase de tamaño T :

Cuadro 5.5.c.-

Costos unitarios de extinción (c) bajo condición de combate (α), incluyendo el factor de tiempo efectivo (t) y el tipo de recursos (j) utilizados en cada tramo de superficie (T). Se contempla el costo/hora de operación (promedio) para medios aéreos y terrestres, descritos en la sección 5.4.3.2.

| Clase de tamaño T (ha) | Combinación de recursos más utilizada (α) | Tiempo promedio de operación (t) bajo condición (α) | $c_{\alpha} = \sum_{j=1}^n j_i \{t_T * c_{u_T} * \alpha_T\} (*)$ Valor en US\$ |
|-----------------------------|--|--|---|
| ≤ 1 | 2 brigadas de 8 combatientes, 1 helicóptero | 35' (0,59 hrs.) | 2.024,38 |
| $> 1 \leq 5$ | 4 brigadas, 1 camión aljibe, 1 helicóptero | 117' (1,95 hrs.) | 7.708,27 |
| $> 5 \leq 20$ | 4 brigadas, 1 avión ó 1 helicóptero | 557' (9,29 hrs.) | Rango 24.137,77 – 35.584,72 |
| $> 20 \leq 50$ | 4 brigadas, 2 camiones, 2 helicópteros, 1 avión | 806' (13,44 hrs.) | 96.173,82 |
| > 50 | Todos los recursos disponibles | 3.175' (52,92 hrs.) | $> 100.000,00$ |

(*) C_u corresponde al costo/hora de operación, para cada tipo de unidad de combate (medios aéreos y terrestres).

5.5.d. Análisis de productividad

El análisis económico de las pérdidas en función de la superficie afectada y de los costos de extinción, puede ser representado mediante la definición de una función de producción basada en el modelo “Cobb-Douglas”, y que corresponde a una forma de función diseñada para representar relaciones entre producto y las variaciones de insumos, tecnología y capital. En el caso de adaptación al tema de los incendios forestales, este modelo contempla las siguientes variables:

- a : Superficie afectada (ha)
- φ : Pérdidas económicas (recursos naturales renovables)
- FCS : Factor de contracción superficial
- C_e : Costos de extinción

En tal caso, la expresión separada de las variables anteriores es la siguiente:

$$a = A_a * FCS^{\alpha_a} \rightarrow \ln a = A_a^* + \alpha_a * \ln(FCS)$$

$$\varphi = A_\varphi * a^{\beta_\varphi} * FCS^{\alpha_\varphi} \rightarrow \ln \varphi = A_\varphi^* + \beta_\varphi \ln a + \alpha_\varphi \ln(FCS)$$

$$c_e = A_{c_e} * \varphi^{\theta_{c_e}} * FCS^{\alpha_{c_e}} \rightarrow \ln c_e = A_{c_e}^* + \theta_{c_e} \ln \varphi + \alpha_{c_e} \ln(FCS)$$

Considerando los valores a y φ , obtenidos de los análisis de incendios de este capítulo, se efectúan los cálculos respectivos mediante el promedio del logaritmo natural para cada uno de estos parámetros, clasificados por las clases de tamaño antes descritas. De esta forma, las siguientes ecuaciones son las que mejor representan el análisis de productividad:

- Área afectada (en hectáreas): $a = -3.75 + 2,67 * FCS^{-0,66}$
- Pérdidas directas (en US\$): $\varphi = -10,54 + a^{5,03} * FCS^{-0,377}$
- Costos de extinción (en US\$): $c_e = 41,02 * \varphi^{0,418} * FCS^{-0,47}$

Como actividad de validación de estos parámetros se expone un caso real ocurrido en el área de estudio, simulada con KITRAL para el cálculo de FCS . Se evaluaron los recursos terrestres y aéreos que trabajaron en las labores de extinción en aquellos flancos o sectores en donde se consideró prioritario el control del fuego. Se determinó el FCS y con ello, los parámetros a , φ y c_e . Se presenta la comparación gráfica (figura 5.5.d) y numérica de estos resultados.

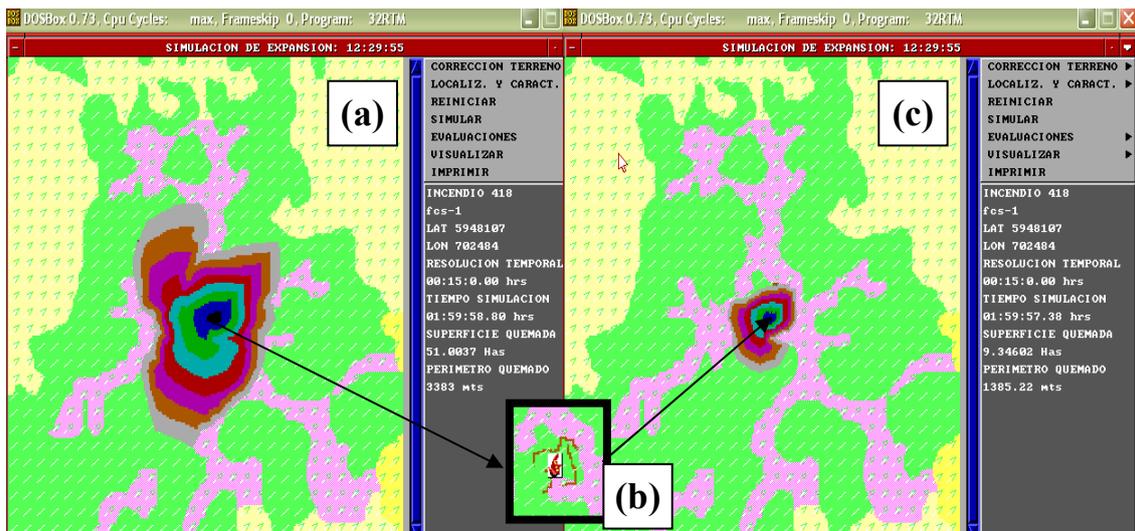


Figura 5.5.d.- Ejemplo de simulación libre y simulación con labores de contención, mediante el Sistema KIRAL. El FCS es determinado mediante el seguimiento en el avance del fuego por un lapso de 2 horas, con los medios de extinción utilizados. (a): incendio en avance libre; (b): localización de las líneas de defensa (basada en herramientas manuales y apoyo aéreo), (c): incendio evaluado con labores de contención.

Se definieron los parámetros necesarios para efectuar la simulación de expansión del fuego a cotas de propagación programadas cada 15 minutos, tanto en avance libre como con la incorporación de líneas de defensa. Con los resultados obtenidos en el SIG de KITRAL, se elaboró un cuadro comparativo que ilustra la aplicación de los factores de productividad:

Cuadro 5.5.d.-
Evaluación de la productividad en labores de extinción, mediante estudio de caso.

| Avance real (ha) | Avance KITRAL (con barreras) | Avance KITRAL (libre) | FCS | 1 - FCS | α | φ | C_e |
|------------------|------------------------------|-----------------------|-------|---------|----------|-----------|----------|
| 4,00 | 6,03 | 25,55 | 0,156 | 0,844 | 5,33 | 9.079,51 | 4.425,59 |
| 5,15 | 8,05 | 31,07 | 0,165 | 0,835 | 4,99 | 6.402,27 | 3.723,01 |
| 6,20 | 8,71 | 38,93 | 0,159 | 0,841 | 5,23 | 8.183,96 | 4.203,63 |
| 6,50 | 9,34 | 51,00 | 0,127 | 0,873 | 6,65 | 29.891,19 | 8.021,61 |

Estos resultados varían considerablemente en función de las características locales de cada incendio, especialmente para el cálculo del FCS. En cada caso, las características de los combustibles vegetales, y las condiciones locales que favorecen la propagación del fuego, contribuyen a ampliar considerablemente los rangos admisibles de α , φ y C_e . No obstante, como medio alternativo basado en la econometría, se considera una primera aproximación matemática a los datos aquí presentados, con la ventaja que estas funciones pueden ser aplicadas a otros escenarios de incendios. Lo primordial, para que las funciones tengan buena predicción, es contar con la máxima calidad, cantidad y confiabilidad de los datos de entrada, especialmente en lo referente a las fases parciales de avance del fuego, las técnicas de combate aplicadas a medida que avanza el fuego, y un detalle exhaustivo de las pérdidas, apoyado por un simulador de expansión de incendios.

5.5.e. Segmentación de las pérdidas por tipos de vegetación.

En el análisis de eficiencia económica puede ser también abordado desde el punto de vista de la proporción de vegetación que ha sido afectada por el fuego. Anteriormente se estimaron las pérdidas directas e indirectas, de acuerdo a categorías de tamaño. En general la tendencia es la concentración de los mayores daños en una cantidad reducida de incendios. No obstante, es pertinente realizar ahora el análisis de las afectaciones considerando los cinco tramos de tamaño de incendios. En este sentido, el criterio aplicado fue el siguiente: Ejemplo incendio N°3, clase de tamaño 1.01 – 5 ha: $V_p = \alpha *$

Valor pérdida pino radiata + β * Valor pérdida eucaliptus + γ * Valor pérdida arbolado nativo + δ * Valor pérdida matorral nativo + φ * Valor pérdida pastizales y mezclas de matorral. De esta manera, se obtienen los resultados para cada clase de tamaño, expresados en el siguiente cuadro.

Cuadro 5.5.e.1.-
Segmentación de las pérdidas directas,
de acuerdo a la proporción de vegetación afectada.

| Clase de tamaño <i>T</i> (ha) | Nº incendios | <i>V_p</i> (promedio) (US\$) |
|----------------------------------|--------------|--|
| ≤ 1 | 109 | 847,43 |
| > 1 ≤ 5 | 45 | 2.505,69 |
| > 5 ≤ 20 | 18 | 3.481,73 |
| > 20 ≤ 50 | 4 | 4.389,88 |
| > 50 | 5 | 72.861,43 |

Es necesario indicar que *V_p* corresponde sólo a una muestra representativa, en cuyo caso pudo disponerse de información absolutamente confiable para poder estimar las pérdidas directas. En una estadística aún más completa, es posible establecer ajustes a base de un número mayor de incendios por clase de tamaño. Relacionando estos resultados con el nivel de intensidad del fuego (NIF) desarrollado en el cuadro 5.3.1.a (ver p.156), es posible plantear una aproximación a una matriz de depreciación de los recursos afectados por incendios, tomando como referencias los resultados de Rodríguez y Silva *et al* (2010, 2012) para el área de estudio y parámetros de propagación del fuego que hacen posible dichas estimaciones.

Cuadro 5.5.e.2.-
Matriz de depreciación de recursos afectados por el fuego. Primera aproximación aplicada al
área de Valparaíso. Chile Central. Área de trabajo: 242.000 ha.

| NIF | Recurso | | | | |
|------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|---------|
| | Madera comercial | Madera a desecho | Recursos hídricos | Fauna local | Paisaje |
| I | 2% | 10% | 5% | 5% | 2% |
| II | 8% | 15% | 12% | 10% | 10% |
| III | 12% | 35% | 20% | 20% | 25% |
| IV | 45% | 55% | 65% | 55% | 55% |
| V | 65% | 70% | 75% | 65% | 80% |
| VI | 85% | 90% | 100% | 75% | 90% |

Los valores aquí expuestos corresponden a cálculos realizados a base de las ecuaciones de daño directo para los tipos de vegetación, y las ponderaciones expresadas en el

modelo de prioridades de protección para el resto de los recursos de la zona (Rodríguez y Silva *et al*, 2010).

La diferencia existente entre los valores NIF explican la notable variación en la depreciación, especialmente localizada en el límite de las categorías IV y V. En el caso de la madera comercial, la comparación entre la afectación previa del fuego y post evaluación del daño directo muestra sus mayores diferencias en el daño a la primera troza comercial, en donde altos niveles de NIF comprometen cerca de un 35% del valor comercial al momento de la cosecha, considerando las pautas de manejo comercial, edad del rodal, especie y localización de las plantaciones.

La tendencia NIF para la depreciación de madera a desecho muestra una tendencia un tanto más equilibrada a partir de las primeras categorías de intensidad, explicable por la alta cantidad de extracción y demanda de leña, producto de intervenciones a bosques y matorrales en áreas de alta ocurrencia de incendios, especialmente en zonas de interfaz, como también en aquellos sectores que son calificados de alto valor geobotánica para el matorral nativo, pero que sin embargo por la alta presión antrópica y el efecto de la alta intensidad de NIF, se traduce en una depreciación casi total en vegetación leñosa no comercial.

Los recursos hídricos en la zona son particularmente sensibles al efecto combinado de los incendios y de la extracción de agua para riesgo y abastecimiento domiciliario. Salvo la presencia de la Reserva Forestal Lago Peñuelas y un par de embalses de tamaño medio, el entorno presenta escasos reservorios de agua que son utilizados permanentemente para otros servicios, y que por la alta densidad de incendios se ven afectados principalmente desde el punto de vista turístico. El sistema hídrico que cubre gran parte del paisaje mediterráneo, se ve severamente afectado por incendios de niveles medios a altos, y cuyos efectos se manifiestan post fuego en la contaminación y sedimentación de arroyos y quebradas próximos a zonas de reservorios mayores de agua superficial.

Referencias respecto a estos niveles de impacto y su relación con la mecánica de suelos pueden encontrarse en Castillo (2006), quien estudia las variables de paisaje y su relación con el recurso hídrico en zonas de alta ocurrencia de incendios. No obstante

existen numerosos estudios de la fauna local en cuanto a su grado de endemismo, representatividad y valoración como especies carismáticas, no se han reportado estudios formales que califiquen su nivel de depreciación pre/post fuego.

En una primera aproximación, y considerando aquellas áreas mayormente afectadas por incendios y su relación con el NIF, se estima que niveles por sobre IV repercuten en una mayor depreciación de recursos locales de fauna, principalmente aves, reptiles y roedores que coexisten en zonas muy reducidas del matorral y bosque mediterráneo que aún es posible encontrar en la región central de la zona costera de Valparaíso.

La depreciación no alcanza el 80% por cuanto existe un alto grado de adaptación de la fauna, explicable también por el alto grado de recuperación de la vegetación local y con ello, el micro hábitat de abrigo y comida para la fauna local. Como se mencionaba anteriormente, Castillo (2006) ha estudiado el paisaje de la zona mediterránea, con énfasis en el cambio espacio-temporal de la vegetación nativa y su relación con la intensidad del fuego.

La depreciación es particularmente importante a partir de NIF IV, por cuanto el tiempo de recuperación de las áreas afectadas por el fuego es más prolongado, especialmente en cerros de altas pendientes y cuya principal cobertura natural (Palma chilena – *Jubaea chilensis* (Mol.) Baillon) se ve afectada en la regeneración natural y en la sobrevivencia de ejemplares de palma adulta, que coexisten con un mosaico degradado de especies de matorral exótico entremezclado con especies nativas con estructura post fuego basada en la regeneración natural. (foto 5.5.e).

No obstante, el seguimiento en sucesivas mediciones en terreno (años 2004-2005-2006), posteriormente reportados y actualizados por Castillo *et al* (2012) para los años 2009-2010-2011, detallan una rápida recuperación de cobertura vegetal basada en especies leñosas menores, y que sin duda ayudan a una mejor recuperación del paisaje. Considerando estudios posteriores es posible mejorar las estimaciones de esta matriz de depreciación. No obstante, se considera como primera referencia formal, basada en los antecedentes que han podido recabarse, especialmente a partir del año 2004 para los recursos no madereros.

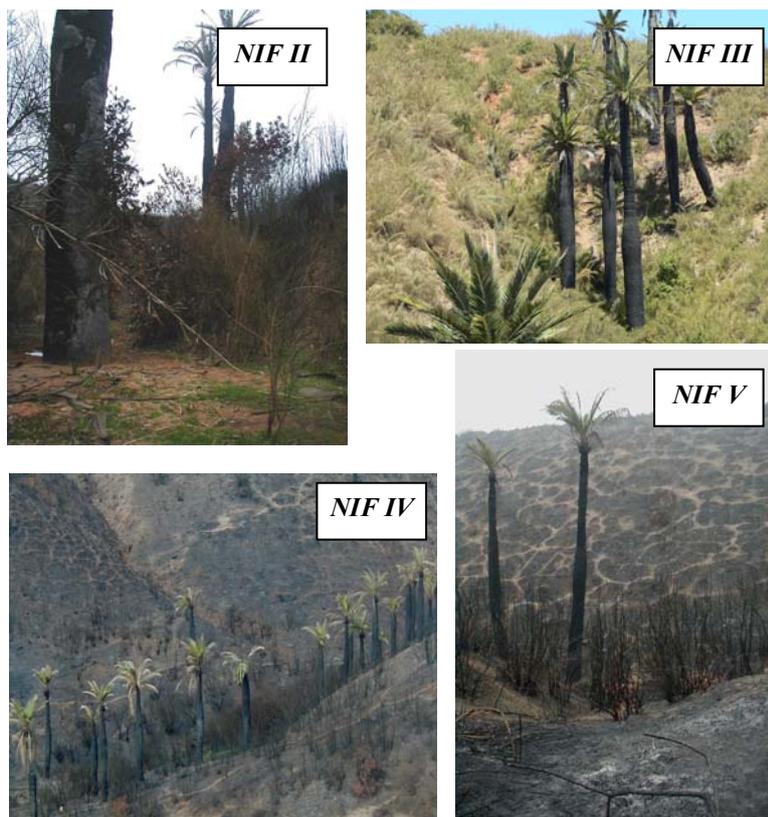


Foto 5.5.e.- Bosque y matorral nativo en Chile Central afectado por el avance libre del fuego. El valor NIF (nivel de intensidad del fuego) se ve reflejado principalmente en el daño al suelo y en porcentaje de sobrevivencia de las especies vegetales leñosas.

5.5.f. Análisis técnico de la eficiencia.

En los tramos de superficies considerados para el análisis económico permiten establecer una aproximación al grado de eficiencia en el combate, mediante la inclusión de los siguientes criterios:

- a) Los costos de extinción (combate)*
- b) El valor de los recursos sin afectación*
- c) El valor de los recursos afectados, de acuerdo a su superficie e intensidad NIF.*

Con estos antecedentes es posible plantear la eficiencia técnica, que basa su relación en el control oportuno del perímetro de avance del fuego y que a su vez define el *FCS* bajo condiciones locales en donde se desarrollan las labores de contención. Rodríguez y Silva & González-Cabán (2012), exponen esta relación de la siguiente forma:

$$E_t = 1 - \frac{C_e}{V_{sa} - V_{ca}}$$

Donde la Eficiencia Técnica E_t depende esencialmente del Costo de extinción (C_e), y de la diferencia existente entre el valor monetario de los recursos sin afectación (V_{sa}) y con afectación (V_{ca}). Es necesario señalar que el cálculo contempla el valor directo e indirecto de los recursos sin afectación, mientras que los recursos con afectación se basan en el daño directo (pérdidas comerciales), segmentado por tipo de recurso. En esta estimación no se contempla el daño a la interfaz, que ciertamente debería ser incluido en el análisis si se dispone a futuro de antecedentes más confiables. Los cálculos basados en esta ecuación, permiten establecer una primera aproximación de E_t de acuerdo al siguiente cuadro:

Cuadro 5.5.f.-
Eficiencia Técnica en las operaciones de extinción,
segmentada por clases de tamaño de incendios.

| Clase de tamaño $T(\text{ha})$ | Costos de extinción (*)(US\$) C_e | Valor recursos sin afectación (US\$) (V_{sa}) | Valor recursos con afectación (US\$)(V_{ca}) | Eficiencia Técnica E_t |
|-----------------------------------|--|--|---|-----------------------------|
| ≤ 1 | 2.024,38 | 6.862,47 | 847,43 | 0,663 |
| $> 1 \leq 5$ | 7.708,27 | 52.680,72 | 2.505,69 | 0,846 |
| $> 5 \leq 20$ | 29.861,25 | 160.357,79 | 3.481,73 | 0,809 |
| $> 20 \leq 50$ | 96.173,82 | 391.817,50 | 4.389,88 | 0,751 |
| > 50 | $> 100.000,00$ | 813.084,17 | 72.861,43 | 0,594 |

(*) Expresa su valor basado en el tiempo promedio de contención, de acuerdo a condiciones de recursos aéreos y terrestres (α), para cada clase de tamaño.

Resulta particularmente complejo establecer una aproximación precisa de E_t , pues las condiciones reales de cada incendio y de las estrategias de combate varían notablemente, incluso dentro de las clases de tamaño aquí analizadas. Por ejemplo, el estudio de la eficiencia en las operaciones de campo localizadas en áreas de interfaz necesitaría de una valoración más precisa de los intangibles ambientales bajo afectación y de los costos de extinción.

En el caso de E_t estimado para incendios menores a 1 hectárea normalmente se suceden situaciones de extrema gravedad cuando la propagación del fuego compromete seriamente áreas de interfaz. Ello hace que muchas veces sea necesario disponer de mayor dotación de recursos aéreos y terrestres que no siempre se encuentran disponibles en el momento oportuno – por ejemplo, en situaciones de multicurrencia –; ello hace

que el factor de eficiencia, no obstante es superior al 66%, resulta comparativamente menor a otras clases de tamaño de incendios.

Los mayores valores obtenidos para las clases $>1-\leq 5$ y $>5-\leq 20$ hectáreas, se explican principalmente por una mayor correspondencia entre la asignación de recursos para la extinción y los costos de extinción, al comparar internamente la base de datos para cada incendio. En aquellos casos de incendios de mayor tamaño, influye fuertemente la propagación del fuego, que adquiere características especialmente conflictivas cuando el avance libre supera los 25 a 30 minutos. En tales casos, la eficiencia en la extinción sólo es posible evaluarla en aquellos frentes de avance en donde es posible medir con mayor precisión el efecto comparativo producido entre la contención del fuego producto de la construcción de líneas de defensa y acciones aéreas, y la propagación libre.

5.5.g. Propuesta de modelo integrado de evaluación de eficiencia en extinción

Los resultados presentados en los análisis anteriores, permiten proponer un modelo integrado de eficiencia en la extinción por tramos de superficie afectada, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_t = \varphi \{ c, a, \rho \}$$

Donde ' E_t ' corresponde a la eficiencia técnica en actividades de extinción, ' c ' representa los costos de operación de recursos, ' a ' la superficie afectada y ' ρ ' el valor económico de las pérdidas (directas e indirectas). Para tal propósito se efectúa una relación estadística multivariable, para la estimación del mejor modelo que represente E_t , con los datos considerados en el desarrollo de esta investigación. Utilizando software estadístico se analiza la matriz de datos para estas tres variables. De este análisis, el modelo que mejor representa a la eficiencia técnica es el siguiente:

$$E_t = \frac{0,936c}{1 + e^{-0,436\rho + 0,806a}} ; r = 0,73; n = 180.$$

Se considera necesario ajustar este modelo sobre la base de un mayor número de datos confiables, teniendo en cuenta que es difícil encontrar una relación matemática que

permita estimar la eficiencia, sobre todo cuando los incendios estudiados son tan diversos entre sí. En forma cualitativa E_t puede ser calificado en cuatro categorías de igual distancia teniendo en cuenta la propuesta de Rodríguez y Silva & González-Cabán (2012). Para los datos aquí obtenidos, se realiza un análisis de diferencias basado en la clasificación de Jenks (1963), frecuentemente utilizada para reclasificar escalas de valores, de manera de proponer cuatro clases, de acuerdo al siguiente cuadro:

Cuadro 5.5.g.-
Calificación de E_t y número de incendios para el área de estudio.

| E_t | Clasificación cualitativa | n |
|------------------------|---------------------------|-----|
| $0 \leq E_t < 0,21$ | Baja | 15 |
| $0,21 \leq E_t < 0,43$ | Moderada | 25 |
| $0,43 \leq E_t < 0,71$ | Alta | 27 |
| $0,71 \leq E_t < 1,00$ | Muy alta | 39 |

De acuerdo a esta clasificación, cerca de un 63% (intervalo 0,43-1,00) de los incendios aquí analizados corresponden a categorías de alta eficiencia técnica. No obstante, no existe una tendencia clara de E_t respecto a las clases de tamaño, por cuanto la existencia de incendios de interfaz y otros de características más rurales por sí mismos contribuyen a establecer diferencias ostensibles, principalmente por las características de la propagación del fuego, como también por las estrategias de extinción aplicadas a cada caso.

En un futuro estudio que contemple una mayor cantidad de incendios completamente caracterizada en los parámetros de costos y pérdidas, es posible proponer una clasificación distinta. Por ahora, es la primera propuesta para los incendios que se presentan en el área bajo estudio.

5.6.- Conclusiones generales del capítulo

- a) El análisis de las fases del combate y su representación gráfica en las curvas de respuesta para las distintas categorías de tamaño de incendios, muestra que es posible establecer umbrales de tiempos para las estrategias de ataque inicial, aún cuando es evidente la alta variabilidad existente entre un incendio y otro, como también la disponibilidad de recursos para el combate.

- b) Existe una asimetría muy marcada entre la proporción de incendios menores a 1,0 hectárea que son atendidos, en relación a otros eventos que sobrepasan esta superficie. Prácticamente el 87% corresponde al rango antes señalado, lo cual dificulta el análisis interno y comparativo respecto a eventos de mayor magnitud. Aún así, las relaciones estadísticas obtenidas entre tiempos y superficies afectadas, son una primera referencia válida para poder ajustar los tiempos de arribo y primer ataque que suelen presentarse en las labores de combate.
- c) El análisis comparativo de la propagación del fuego realizada entre incendios que consideraron la existencia de barreras de defensa y otros, en avance libre, otorgó referencias útiles para determinar el grado de eficacia en las labores de contención, como también en la proyección potencial de las pérdidas. En tal sentido, la aplicación del Factor de Contracción Superficial (FCS) permite estimar las diferencias existentes entre ambos escenarios, y con ello, analizar de mejor forma los costos de extinción que se incurrieron en cada uno de los incendios atendidos.
- d) La posibilidad de recrear computacionalmente las condiciones históricas de cómo se inició un incendio, y sus proyecciones a base de las variables de entrada al simulador de incendios del Sistema KITRAL, permiten establecer una importante referencia para la estimación potencial de los daños como también la evolución espacial de los mismos. Los resultados aquí obtenidos, presentan similitudes en la precisión de las estimaciones, considerando el avance libre del fuego y la alta variabilidad en las condiciones meteorológicas presentes en el sector amagado por el fuego.
- e) La revisión exhaustiva de las bases de datos de incendios forestales para el área de estudio, entrega resultados muy variados. En primer lugar, existen altos costos de extinción focalizados en superficies mínimas, y cuyos principales medios utilizados correspondieron a aviones y helicópteros. Ello está asociado principalmente a combates en zonas de interfaz con alerta roja y en combates declarados en alerta amarilla en áreas vecinas a sectores de alta peligrosidad en la propagación del fuego. En segundo lugar, se verifica que el tiempo transcurrido desde la detección al primer ataque, condiciona decisivamente los costos futuros en la proyección de avance del fuego y en la estrategia de combate a seguir.

- f) Respecto al análisis econométrico en la eficiencia y productividad en el combate de incendios para el área de estudio, los resultados expresan que efectivamente es posible establecer relaciones entre superficie quemada, costos de extinción y pérdidas económicas. Para la construcción de modelos estadísticamente confiables resulta necesario disponer de una base de datos muy variada, que capture información de la mayor cantidad de situaciones posibles en cuanto a los tres atributos aquí estudiados. Finalmente, es necesario señalar que estos primeros resultados obtenidos para el área de estudio, permiten la construcción de modelos que permiten apoyar con una base más sólida, las actuaciones en labores de extinción. Queda la duda sin embargo, respecto a la evaluación de la eficiencia técnica en incendios forestales de mayor tamaño, lo cual sin duda abre un nuevo espacio para una futura investigación.

5.7 Referencias

- Albini F.A. 1976. Spot Distances from Burning Trees. A Prediction Model. *USDA For. Serv. Gen. Techn.Rep.INT-56*, 73 p.
- Burgan R.E, Rothermel R.C. 1984. BEHAVE, Fire Prediction System and Fuel Modeling Subsystem. USDA FS., *Gen.Techn.Rep. INT-98*, 118 p.
- Castillo M. 2006. El Cambio del Paisaje Vegetal afectado por Incendios en la Zona Mediterránea Costera de la V Región. Tesis Magíster en Geografía, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Geografía. Santiago. 152 p.
- Castillo M, Julio G, Quintanilla V. 2011. Vulnerabilidad y daño potencial ocasionado por incendios en áreas de interfaz urbano-forestal. Provincia de Valparaíso. Chile Central. *Territorium*. (18): 247-254.
- Castillo M, Garfias R, Julio G, González L. 2012. Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. *Interciencia* 37(11) 796-804.
- Frandsen W.H. 1971. Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy. *Combustion and Flame* (16):9-16.
- Gu J, Li X, Huang Ch, Okin G. 2009. A simplified data assimilation method for reconstructing time-series MODIS NDVI data. *Advances in Space Research* (44): 501–509.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E.P, Gao X, Ferreira L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* (83):195–213.
- Jenks G.F. 1963. Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers* 53, 15–26.

- Julio G, Castillo E, Pedernera P. 1995. Modelación de Combustible. *Actas de Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales*: 111-127.
- Julio G. 2007. Formulación de Lineamientos Políticos y Estratégicos para la Protección contra Incendios Forestales en Chile. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España. 341 p.
- Julio G. 2010. Fundamentos de Manejo del Fuego. Apuntes Docentes. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. 335p.
- Martínez-Millán M.J, Caballero D, Martos J, Vignote S. 1994. CARDIN 3.0 – A Model for Forest Fire Spread and Fire Fighting Simulation. U.P.Madrid, Madrid, 3p.
- Quintanilla V, Castillo M. 2009. Degradación de ecosistemas de la palma más austral del mundo (*Jubaea chilensis* Mol. Baillon), acelerada por los fuegos estivales en los cordones litorales de Valparaíso y Viña del Mar (32°50'-33°02'S). Un caso sostenido de perturbación del paisaje. *Investigaciones Geográficas* (41); 41-60.
- Rodríguez y Silva F, Julio G, Castillo M, Molina J.R., Herrera M, Toral M, Cerda C, González L. 2010. Aplicación y adaptación del Modelo SEVEIF para la evaluación socioeconómica del impacto de incendios forestales en la Provincia de Valparaíso, Chile. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 52p.
- Rodríguez y Silva F, González-Cabán A. 2010. 'SINAMI': a tool for the economic evaluation of forest fire management programs in mediterranean ecosystems. *International Journal of Wildland Fire* (19): 927-936.
- Rodríguez y Silva F, González-Cabán A. 2012. La predicción de la productividad en las operaciones de extinción de incendios forestales: una aproximación metodológica desde el análisis de la dificultad de extinción y el registro de la experiencia. En: IV Simposio Internacional en Economía, Planificación y Políticas en Incendios Forestales, México. En actas.
- Rothermel R.C. 1983. How to Predict the Spread and the Intensity of Forest and Range Fires. USDA For.Serv. *Gen.Techn.Rep. INT-143*, Ogden. 161 p.
- Sakamoto T, Wardlow B.D., Gitelson A, Verma S.B, Suyker A, Arkebauer T. 2010. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* (114): 2146–2159.
- Veraverbeke S, Lhermitte W, Verstraeten W, Goossens R. 2010. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sensing of Environment* (114): 2548–2563.
- Wardlow B.D., Egbert S.L. 2008. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the US Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* (112): 1096–1116.

CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS

La presente tesis expone y analiza cinco aspectos relacionados al problema de los incendios forestales en Chile Central, con el propósito de discutir y profundizar materias que en estudios anteriores fueron parcialmente abordados. La integración de los

aspectos técnicos basados en datos fiables y la experiencia de trabajo en campo permiten en consecuencia, establecer las siguientes conclusiones:

- a) La Zona Mediterránea de Chile Central se caracteriza por presentar una alta ocurrencia de incendios forestales concentrada en áreas particularmente críticas y con una marcada estacionalidad de los mismos. Ello se ve reflejado en la recurrencia y patrones de propagación y daños factibles de encontrar en paisajes mediterráneos y áreas asociadas a interfaz e infraestructura de comunicaciones.
- b) El estudio de la propagación y daños ocasionados por el fuego en paisajes vegetales, muestra un marcado retroceso en las formaciones arbóreas y arbustivas nativas hasta hace unos 50 años atrás. Los trabajos de campo realizados para cuatro regiones de Chile Central, indican que actualmente existe una estabilización post fuego a un paisaje modificado, dominado por especies exóticas y nativas en un estado avanzado de degradación. En términos cuantitativos las formas y estructuras de paisaje hacen técnicamente muy dificultosa la restauración a pequeña escala (1:25.000 o superior). No obstante es posible proponer acciones locales para mejorar la estructura base sobre la cual puede favorecerse la regeneración, incluso en áreas de alta ocurrencia y presión antrópica.
- c) El estudio de la interfaz en la Zona Centro Sur de Chile muestra diferencias internas en cuanto al nivel de organización, densidad, localización y tipo de viviendas, de acuerdo al sector de ocurrencia que se ha estudiado. No obstante en términos de análisis de peligro y daños potenciales, en todos los sectores se evidencia una alta severidad potencial, expresada en altos valores de liberación calórica producto del cálculo y simulación de escenarios potenciales en la propagación del fuego. Es una tendencia al alza en los niveles de gravedad, especialmente cuando el problema de la ocurrencia y propagación se concentra en pequeñas áreas de interfaz. Las acciones propuestas para la disminución del peligro, son de carácter local, porque responden a necesidades coyunturales que se expresan a nivel de barrio o comuna identificados claramente en la zonificación de áreas críticas de ocurrencia. La aplicación de criterios transversales para la protección ha demostrado no ser efectiva, por cuanto el problema de los incendios forestales experimenta profundas diferencias entre regiones, incluso más, al interior de una misma localidad.

- d) Los resultados obtenidos del modelo de vulnerabilidad territorial para la Región de Valparaíso, constituyen los primeros antecedentes que integran en un mismo análisis el real problema de los incendios forestales que se han sucedido en los últimos 25 años en el área de estudio, y en el cual se han considerado expresamente los componentes de daño directo e indirecto. Producto de este proyecto de colaboración institucional, ha sido posible plantear nuevos escenarios de investigación, entre ellos el análisis más detallado del efecto borde en el riesgo de incendios forestales en torno a áreas de interfaz. El modelo propuesto – recientemente publicado en medios científicos – constituye el primer avance hacia una cartografía de vulnerabilidad útil para la gestión en manejo del fuego, y replicable con modificaciones hacia otras regiones de clima mediterráneo.

- e) Los criterios utilizados para la definición y ponderación de variables que se consideran para el cálculo de cualquier modelo que implique establecer áreas de defensa o protección, no necesariamente se ajustan a la realidad. Se demostró en esta tesis que es posible delimitar aún mejor el efecto vecindad producido por la presencia de incendios, considerando la existencia de barreras, casas y caminos. Los resultados potenciales podrían incluso proponer modificaciones en la forma actual de cómo se plantean los anillos o búferes para la protección.

- f) La percepción recogida de una muestra de la población expuesta permanentemente al problema de los incendios forestales, constituye una primera mirada científica que permite integrar este componente de la ocurrencia, a los planes y programas de protección municipal que actualmente se están formulando para mejorar los actuales niveles de ocurrencia y daños.

- g) El análisis de los tiempos involucrados en el inicio y desarrollo de incendios, y su relación con el esquema operativo para el arribo y trabajo de recursos aéreos y terrestres, permite establecer categorías promedio y umbrales de tiempo admisibles para el modelamiento de curvas de respuesta frente a la propagación del fuego.

- h) El paso siguiente en el análisis de tiempos indicado anteriormente, permite además relacionar de mejor manera la proyección en la evolución de gastos y daños que se

van generando en el desarrollo del combate – conocido en las estadísticas oficiales como “*misión*” – lo que indudablemente proporciona mejores antecedentes para determinar el instante oportuno para optar por el despacho de medio aéreos, terrestres, o una combinación de ambos.

- i) En tal sentido los niveles de alerta reportados en las bases de datos de ocurrencia de incendios, también aportan valiosa información, porque permiten asociar ese tipo de eventos con los incendios localizados en áreas de interfaz. Como una propuesta de estudio futuro, se plantea calificar en forma más certera y oportuna los niveles de alerta, por cuanto van asociados al despliegue de nuevas estrategias de combate que normalmente contempla el uso de medios aéreos, y con ello, un nivel de gasto en el combate considerablemente mayor.

- j) El análisis econométrico de las operaciones de extinción y pérdidas derivadas de la propagación del fuego es un ámbito que no se ha abordado suficientemente en Chile, salvo esfuerzos locales de empresas forestales del sector privado ligadas a la protección del patrimonio de plantaciones comerciales. No obstante en bosque nativo y áreas de interfaz, la econometría y análisis de eficiencia en operaciones de extinción, se instalan como temas nuevos en investigación, y que sin dudas serán necesarios priorizar dentro de las futuras líneas de investigación en manejo del fuego propuestas para Chile.

- k) Como comentario final, y que no es producto mismo de las conclusiones derivadas de esta tesis, es pertinente señalar, como producto de esta investigación y de la tendencia observada en los últimos años en Chile, que no necesariamente un aumento en la dotación física y estructural de recursos para la defensa contra incendios, trae como consecuencia una disminución en los indicadores de frecuencia, superficies y daños. Se hace necesario colocar un mayor énfasis en la generación de nuevos conocimientos, en la transferencia tecnológica y en la definición de directrices claras en materia de investigación, que sean coherentes con una nueva estructura nacional para la protección contra incendios forestales. En tal sentido, la elaboración de una matriz que cruce los ejes temáticos de investigación con respecto a sus prioridades y factibilidad normativa, puede aportar valiosos avances en la materia.

ANEXOS

Anexo I.-

Pruebas estadísticas para parámetros del comportamiento del fuego

a) Para Longitud de llama (L):

Prueba de Wilcoxon de rangos signados / prueba bilateral:

Se proporciona la tabla de los valores críticos del T de Wilcoxon en p. 254

| | |
|---------------------|--------|
| T | 16.000 |
| T (esperanza) | 10.500 |
| T (varianza) | 22.750 |
| Z (valor observado) | 1.153 |
| Z (valor crítico) | 1.282 |
| p-value bilateral | 0.249 |
| Alpha | 0.2 |

El T de Wilcoxon está estandarizada y comprobada respecto a la ley normal

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Prueba del signo / prueba bilateral:

| | |
|---------------------------------|-------|
| Número de diferencias positivas | 4.000 |
| p-value bilateral | 0.688 |
| Alpha | 0.2 |

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

b) Para Velocidad de Propagación Lineal del Fuego (VP):

Prueba de Wilcoxon de rangos signados / prueba bilateral:

Nota: la esperanza y varianza del T de Wilcoxon han sido calculadas teniendo en cuenta las diferencias absolutas nulas

| | |
|---------------------|--------|
| T | 11.000 |
| T (esperanza) | 10.000 |
| T (varianza) | 22.500 |
| Z (valor observado) | 0.211 |
| Z (valor crítico) | 1.282 |
| p-value bilateral | 0.833 |
| Alpha | 0.2 |

El T de Wilcoxon está estandarizada y comprobada respecto a la ley normal

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Prueba del signo / prueba bilateral:

| | |
|---------------------------------|-------|
| Número de diferencias positivas | 3.000 |
| p-value bilateral | 1.000 |
| Alpha | 0.2 |

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

c) Para la intensidad calórica del fuego (FIL):

Prueba de Wilcoxon de rangos signados / prueba bilateral:

| | |
|---------------------|--------|
| T | 5.000 |
| T (esperanza) | 10.500 |
| T (varianza) | 22.750 |
| Z (valor observado) | -1.153 |
| Z (valor crítico) | 1.282 |
| p-value bilateral | 0.249 |
| Alpha | 0.2 |

El T de Wilcoxon está estandarizada y comprobada respecto a la ley normal

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Prueba del signo / prueba bilateral:

| | |
|---------------------------------|-------|
| Número de diferencias positivas | 2.000 |
| p-value bilateral | 0.688 |
| Alpha | 0.2 |

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.200 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Anexo II.-

Comparación de los valores de prioridad en riesgo, obtenidos entre método Fuzzy y SEVEIF (Rodríguez y Silva *et al*, 2010), en relación a las categorías de tamaño de incendios (en hectáreas).

Prueba de Wilcoxon de rangos signados / prueba bilateral:

Nota: la esperanza y varianza del T de Wilcoxon han sido calculadas teniendo en cuenta las diferencias absolutas nulas

| | |
|---------------------|--------|
| T | 6.000 |
| T (esperanza) | 5.500 |
| T (varianza) | 14.000 |
| Z (valor observado) | 0.134 |
| Z (valor crítico) | 1.960 |
| p-value bilateral | 0.894 |
| Alpha | 0.05 |

El T de Wilcoxon está estandarizada y comprobada respecto a la ley normal

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Prueba del signo / prueba bilateral:

| | |
|---------------------------------|-------|
| Número de diferencias positivas | 1.000 |
| p-value bilateral | 0.500 |
| Alpha | 0.05 |

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula según la cual las muestras no son diferentes.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Prueba de Kruskal-Wallis:

| | |
|---------------------|-------|
| H (valor observado) | 3.469 |
| H (valor crítico) | 5.991 |
| GDL | 2 |
| p-value unilateral | 0.176 |
| Alpha | 0.05 |

Se distribuye el H de Kruskal-Wallis como un Chi-cuadrado

Conclusión:

Al umbral de significación Alfa=0.050 no se puede rechazar la hipótesis nula de ausencia de diferencia entre las 3 muestras.

Dicho de otro modo, la diferencia entre las muestras no es significativa.

Análisis de Regresión:

Calcular la distancia de Cook para cada observación
Intervalo de confianza (%): 95.00

Modelización de la variable SEVEIF:

Resumen para la variable dependiente:

| Variable | Núm. total de valores | Núm. de valores utilizados | Núm. de valores ignorados | Suma de los pesos | Media | Desviación típica |
|----------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------|-------------------|
| SEVEIF | 21 | 21 | 0 | 21 | 4.857 | 7.958 |

Resumen para las variables cuantitativas:

| Variable | Media | Desviación típica |
|----------|-------|-------------------|
| FUZZY | 4.905 | 7.409 |

Coefficientes de ajuste:

| | |
|--|---------|
| R (coeficiente de correlación) | 0.917 |
| R ² (coeficiente de determinación) | 0.840 |
| R ² aj. (coeficiente de determinación ajustado) | 0.832 |
| SCR | 202.686 |

| Fuente | GDL | Suma los cuadrados | Cuadrado medio | F de Fisher | Pr > F |
|----------|-----|--------------------|----------------|-------------|----------|
| Modelo | 1 | 1063.885 | 1063.885 | 99.730 | < 0.0001 |
| Residuos | 19 | 202.686 | 10.668 | | |
| Total | 20 | 1266.571 | | | |

Parámetros del modelo:

| Parámetro | Valor | Desviación típica | t de Student | Pr > t | Límite inferior 95 % | Límite superior 95 % |
|--------------|-------|-------------------|--------------|----------|----------------------|----------------------|
| Intersección | 0.029 | 0.861 | 0.033 | 0.974 | -1.774 | 1.831 |
| FUZZY | 0.984 | 0.099 | 9.986 | < 0.0001 | 0.778 | 1.191 |

Ecuación ajustada:

$$FUZZY = 2.87585668430646E-02 + 0.984427865012579*SEVEIF$$

Anexo III

Tablas para el cálculo de las pérdidas en vegetación

| <i>TEMPORADA</i> | <i>SUPERFICIES AFECTADAS</i> | | | | | | | | <i>TOTAL</i> |
|------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | <i>Nº INC.</i> | <i>PINO RADIATA</i> | | | <i>EUCALIPTO</i> | <i>ARBOLADO</i> | <i>MATORRAL</i> | <i>PASTIZAL</i> | |
| | | <i>0 - 10 años</i> | <i>11 -17 años</i> | <i>18 y más años</i> | | | | | |
| 1984-1985 | 1501 | 510.56 | 0.00 | 0.00 | 307.33 | 3027.53 | 3764.43 | 3670.14 | 11279.99 |
| 1985-1986 | 1105 | 806.59 | 125.02 | 92.10 | 430.54 | 5179.93 | 3251.61 | 2793.74 | 12679.53 |
| 1986-1987 | 1033 | 384.46 | 77.62 | 3.26 | 285.14 | 2840.21 | 6069.36 | 5967.78 | 15627.83 |
| 1987-1988 | 1180 | 15.11 | 59.42 | 2.80 | 144.41 | 329.88 | 639.31 | 690.29 | 1881.22 |
| 1988-1989 | 1028 | 19.00 | 105.57 | 196.97 | 763.90 | 10009.01 | 7045.18 | 8398.46 | 26538.09 |
| 1989-1990 | 824 | 50.51 | 115.85 | 71.06 | 258.23 | 1785.58 | 2066.24 | 1450.85 | 5798.32 |
| 1990-1991 | 870 | 60.06 | 33.49 | 3.20 | 102.39 | 832.46 | 2609.41 | 1726.61 | 5367.62 |
| 1991-1992 | 1307 | 74.31 | 10.45 | 23.40 | 303.41 | 681.28 | 2504.58 | 3949.27 | 7546.70 |
| 1992-1993 | 1271 | 198.64 | 4.15 | 5.76 | 481.16 | 2365.08 | 2690.26 | 3110.94 | 8855.99 |
| 1993-1994 | 841 | 102.32 | 91.10 | 74.05 | 1745.99 | 2854.45 | 4454.09 | 5007.85 | 14329.85 |
| 1994-1995 | 828 | 137.28 | 57.48 | 91.37 | 486.49 | 639.68 | 1060.73 | 1530.80 | 4003.83 |
| 1995-1996 | 727 | 50.13 | 84.93 | 226.55 | 229.60 | 829.23 | 1661.49 | 881.03 | 3962.96 |
| 1996-1997 | 629 | 184.01 | 57.70 | 175.37 | 239.23 | 1316.15 | 1368.93 | 1326.92 | 4668.31 |
| 1997-1998 | 832 | 211.84 | 1.76 | 3.11 | 329.23 | 993.79 | 1266.96 | 2632.66 | 5439.35 |
| 1998-1999 | 704 | 18.88 | 20.81 | 10.04 | 228.40 | 357.66 | 977.50 | 700.08 | 2313.37 |
| 1999-2000 | 867 | 86.74 | 10.45 | 146.90 | 286.56 | 332.46 | 1077.05 | 1600.87 | 3541.03 |
| 2000-2001 | 1036 | 14.25 | 12.08 | 16.09 | 174.71 | 310.65 | 690.51 | 961.84 | 2180.13 |
| 2001-2002 | 1318 | 55.19 | 23.72 | 1.48 | 484.92 | 447.60 | 1920.35 | 2065.38 | 4998.64 |
| 2002-2003 | 1086 | 68.23 | 13.60 | 202.30 | 1241.08 | 1680.28 | 3044.79 | 3249.04 | 9499.32 |
| 2003-2004 | 875 | 464.75 | 33.96 | 128.10 | 2087.36 | 2591.24 | 5375.62 | 4480.46 | 15161.49 |
| 2004-2005 | 956 | 58.77 | 82.05 | 397.30 | 294.40 | 2565.45 | 2414.46 | 1603.50 | 7415.93 |
| 2005-2006 | 866 | 22.22 | 35.75 | 16.61 | 378.97 | 366.59 | 1084.61 | 2024.49 | 3929.24 |
| 2006-2007 | 874 | 17.92 | 126.77 | 54.32 | 277.55 | 442.39 | 968.55 | 1134.81 | 3022.31 |
| 2007-2008 | 850 | 18.99 | 1563.14 | 21.95 | 1138.26 | 671.08 | 1478.98 | 666.24 | 5558.64 |
| 2008-2009 | 642 | 1.65 | 22.10 | 79.52 | 691.48 | 652.82 | 1565.45 | 1362.41 | 4375.43 |
| 2009-2010 | 713 | 82.24 | 59.96 | 1103.68 | 2580.43 | 2470.11 | 3649.43 | 3153.83 | 13099.68 |
| 2010-2011 | 824 | 47.99 | 17.32 | 45.08 | 915.78 | 2658.18 | 4496.50 | 3073.02 | 11253.87 |
| PROMEDIOS | 947 | 139.36 | 105.42 | 118.24 | 625.44 | 1823.36 | 2562.83 | 2563.46 | 7938.10 |

**CAPÍTULO 5.- Análisis Económico de la Protección
en áreas críticas de incendios forestales.**

| PINO RADIATA 11 - 17 años | | | | PINO RADIATA > 17 años | | | |
|----------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| SPR 11 17 | Factor act. | US\$/ha | P2 US\$ | SPR >17 | Factor act. | US\$/ha | P3 US\$ |
| 0.00 | 1.707 | 9614.9 | 0.00 | 0.00 | 1.707 | 21088.58 | 0.00 |
| 125.02 | 1.673 | 9426.4 | 1178484.06 | 92.10 | 1.673 | 20675.08 | 1904174.94 |
| 77.62 | 1.641 | 9241.5 | 717327.84 | 3.26 | 1.641 | 20269.69 | 66079.18 |
| 59.42 | 1.608 | 9060.3 | 538364.63 | 2.80 | 1.608 | 19872.24 | 55642.28 |
| 105.57 | 1.577 | 8882.7 | 937743.85 | 196.97 | 1.577 | 19482.59 | 3837485.83 |
| 115.85 | 1.546 | 8708.5 | 1008880.13 | 71.06 | 1.546 | 19100.58 | 1357287.13 |
| 33.49 | 1.516 | 8537.7 | 285929.20 | 3.20 | 1.516 | 18726.06 | 59923.38 |
| 10.45 | 1.486 | 8370.3 | 87470.07 | 23.40 | 1.486 | 18358.88 | 429597.79 |
| 4.15 | 1.457 | 8206.2 | 34055.80 | 5.76 | 1.457 | 17998.90 | 103673.68 |
| 91.10 | 1.428 | 8045.3 | 732927.84 | 74.05 | 1.428 | 17645.98 | 1306685.00 |
| 57.48 | 1.400 | 7887.6 | 453376.94 | 91.37 | 1.400 | 17299.98 | 1580699.42 |
| 84.93 | 1.373 | 7732.9 | 656755.36 | 226.55 | 1.373 | 16960.77 | 3842461.85 |
| 57.70 | 1.346 | 7581.3 | 437439.65 | 175.37 | 1.346 | 16628.20 | 2916088.02 |
| 1.76 | 1.319 | 7432.6 | 13081.42 | 3.11 | 1.319 | 16302.16 | 50699.72 |
| 20.81 | 1.294 | 7286.9 | 151640.10 | 10.04 | 1.294 | 15982.51 | 160464.40 |
| 10.45 | 1.268 | 7144.0 | 74654.86 | 146.90 | 1.268 | 15669.13 | 2301794.81 |
| 12.08 | 1.243 | 7003.9 | 84607.44 | 16.09 | 1.243 | 15361.89 | 247172.80 |
| 23.72 | 1.219 | 6866.6 | 162875.65 | 1.48 | 1.219 | 15060.68 | 22289.80 |
| 13.60 | 1.195 | 6732.0 | 91554.61 | 202.30 | 1.195 | 14765.37 | 2987034.09 |
| 33.96 | 1.172 | 6600.0 | 224134.55 | 128.10 | 1.172 | 14475.85 | 1854356.60 |
| 82.05 | 1.149 | 6470.5 | 530908.33 | 397.30 | 1.149 | 14192.01 | 5638486.14 |
| 35.75 | 1.126 | 6343.7 | 226786.31 | 16.61 | 1.126 | 13913.74 | 231107.17 |
| 126.77 | 1.104 | 6219.3 | 788419.03 | 54.32 | 1.104 | 13640.92 | 740974.68 |
| 1563.14 | 1.082 | 6097.3 | 9530996.61 | 21.95 | 1.082 | 13373.45 | 293547.21 |
| 22.10 | 1.061 | 5977.8 | 132109.04 | 79.52 | 1.061 | 13111.22 | 1042604.60 |
| 59.96 | 1.040 | 5860.6 | 351399.97 | 1103.68 | 1.040 | 12854.14 | 14186859.44 |
| 17.32 | 1.020 | 5745.7 | 99514.83 | 45.08 | 1.020 | 12602.10 | 568102.67 |