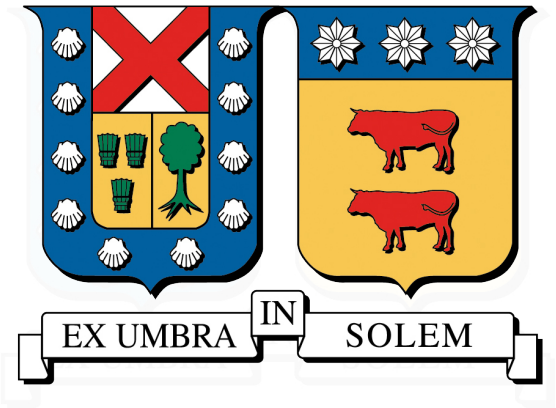
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



LOCALIZACIÓN DE RECURSOS MÓVILES DE APAGADO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA REGIÓN DE VALPARAISO, CHILE, UTILIZANDO MODELOS DE COBERTURA

GABRIELA ALFARO ROJAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. PABLO ESCALONA
PROFESOR CORREFERENTE : SR. RAUL STEGMAIER

DICIEMBRE 2016

A todos los que me acompañaron, me alentaron y me hicieron crecer.

A los de siempre, a los que se fueron sumando en el camino, pero sobre todo a los que van a seguir hasta el final.

A la organización que me abrió los ojos y llevó a mis manos a trabajar donde es necesario.

A los compañeros que decidieron estar a mi lado.

A mis hermanos, a mis madres y a mis padres, me hicieron ser.

A todos y todas, por que me siento feliz de lo que logré ser junto a ustedes.

Resumen Ejecutivo

En la región de Valparaíso, Chile, los incendios forestales corresponden a un 15 % aproximadamente de los incendios a nivel nacional, provocando significativas pérdidas según cifras económicas y sociales.

El presente trabajo desarrolla modelos de localización óptima de bases de brigadas para apagado de incendios forestales en ésta región, específicamente, un modelo de máxima cobertura (MCLP) y un modelo de cobertura total (LSCP). El primero, localiza las 10 brigadas que por requerimientos de CONAF se utilizan actualmente en la región de Valparaíso, de manera tal que se cubra la máxima cantidad de puntos de demanda. El segundo, minimiza el número de instalaciones óptimas de bases de brigadas que debiese disponer CONAF para cubrir todos los nodos demanda. Ambos modelos fueron formulados como un problema lineal entero (ILP) y resuelto con solver CPLEX.

La región geográfica de clasifica en cuadrantes de alta, media y de baja prioridad de protección. Ésta clasificación se realiza en base al trabajo de Atienza et al. (2010), que realiza la clasificación en función de los índices de riesgos, peligro y daño potencial. Los puntos de demanda son generados según esta clasificación, asignando más nodos en las zonas de alta prioridad y menos en la de baja.

Los resultados muestran que con la cantidad de brigadas actuales, al localizarlas de manera óptima, se cubre un 94 % de la demanda total, pudiendo ésta ser cubierta por completo, al aumentar a 17 o 22 brigadas dependiendo del mallado que se haga para trabajar la zona geográfica.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**

2. Objetivos **4**
2.1. Objetivo General 4
2.2. Objetivos Específicos 4

3. Marco teórico **5**
3.1. Antecedentes Generales 5
3.2. Incendios Forestales 5
3.3. Situación Nacional 6
3.3.1. Caracterización de Incendios Forestales a través de Índices . . . 7
3.3.2. Comportamiento en Chile y Valparaíso 7
3.4. Revisión Bibliográfica 10

4. Formulación del Modelo **15**
4.1. Localización con Máxima Cobertura 15
4.2. Localización con Cobertura Total 17

5. Caracterización de la Región **19**
5.1. Índice de Riesgo 19
5.2. Índice de Peligro 25
5.3. Índice de Daño Potencial 31
5.4. Determinación Prioridad de Protección 38

6. Generación de Parámetros **42**
6.1. Demanda y Posibles Instalaciones 43
6.2. Recursos 43
6.3. Tiempos de Viaje y Tiempos Máximos 46
6.4. Prioridad de Protección 47

7. Estudio Computacional **48**
7.1. MCLP 48
7.2. LSCP 54

8. Conclusiones **57**

Bibliografía **59**

A. Modelo de combustible **62**

B. Matriz TA **64**

C. Matriz PD **66**

D. Tiempo **67**

Índice de Tablas

3.1. Porcentaje Hectáreas Quemadas por Mes, Valparaíso 8
3.2. Porcentaje Hectáreas Quemadas por Comuna, Valparaíso 9
3.3. Porcentaje Hectáreas Quemadas por Inicio Cercano, Valparaíso 10

5.1. Variables y Puntajes para la Determinación de Prioridades. Fuente: Atienza et al. (2010) 20
5.2. Puntajes por Número de Incendios por Cuadrante. Fuente: Atienza et al. (2010) 21
5.3. Puntajes Según Población y Franja de influencia. Fuente: Atienza et al. (2010) 22
5.4. Puntajes y Franja de Influencia por Tipo de Red Vial. Fuente: Atienza et al. (2010) 23
5.5. Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis del Riesgo. Fuente: Atienza et al. (2010) 23
5.6. Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Velocidad de Propagación. Fuente: Atienza et al. (2010) 26
5.7. Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Resistencia al Control. Fuente: Atienza et al. (2010) 27
5.8. Puntaje por Rangos de Pendiente Promedio. Fuente: Atienza et al. (2010) 28
5.9. Puntajes Según Exposición Topográfica. Fuente: Atienza et al. (2010) . . 28
5.10. Puntajes Normalizado por Clima. Fuente: Atienza et al. (2010) 29
5.11. Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis de Peligro. Fuente: Atienza et al. (2010) 29
5.12. Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Recursos Productivos. Fuente: Atienza et al. (2010) 32
5.13. Puntajes Normalizados Captura de Carbono. Fuente: Atienza et al. (2010) 33
5.14. Rangos de Contacto y Puntaje Normalizado de Área de Interfaz. Fuente: Atienza et al. (2010) 34
5.15. Puntaje Normalizado para Geomorfología. Fuente: Atienza et al. (2010) . 35
5.16. Puntaje Normalizado para Cobertura Vegetacional. Fuente: Atienza et al. (2010) 35
5.17. Puntaje Normalizado para Diversidad Visual. Fuente: Atienza et al. (2010) 36
5.18. Puntaje Normalizado para Agua. Fuente: Atienza et al. (2010) 37
5.19. Puntaje Normalizado para Conservación. Fuente: Atienza et al. (2010) . . 37

5.20. Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis de Daño Potencial. Fuente: Atienza et al. (2010) 38
5.21. Distribución según Categoría de Protección. Fuente: Atienza et al. (2010) 38

6.1. Tiempo máximo según nivel de prioridad. Fuente: Pizarro y Atienza (2000) 47

A.1. Descripción modelo de combustible 63

Índice de Figuras

5.1. Mapa Análisis Riesgo. Fuente: Atienza et al. (2010) 24
5.2. Mapa Análisis Peligro. Fuente: Atienza et al. (2010) 30
5.3. Mapa Análisis Daño Potencial. Fuente: Atienza et al. (2010) 39
5.4. Mapa Prioridades de Protección. Fuente: Atienza et al. (2010) 41

6.1. Mapa Puntos de Demanda y Posibles Instalaciones (cuadrante de 6000[m]) 44
6.2. Mapa Puntos de Demanda y Posibles Instalaciones (cuadrante de 3000[m]) 45

7.1. Mapa Instalaciones Óptimas MCLP (cuadrante de 6000[m]) 49
7.2. Mapa Instalaciones Óptimas MCLP (cuadrante de 3000[m]) 50
7.5. Sensibilización (cuadrante de 6000[m]) 51
7.3. Mapa Demandas Cubiertas (cuadrante de 6000[m]) 52
7.4. Mapa Demandas Cubiertas (cuadrante de 3000[m]) 53
7.6. Sensibilización (cuadrante de 3000[m]) 54
7.7. Mapa Instalaciones LSCP (cuadrante de 6000[m]) 55
7.8. Mapa Instalaciones LSCP (cuadrante de 3000[m]) 56

1 | Introducción

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) et al. (2011) define un incendio forestal como: *un fuego que, cualquiera sea su origen y con peligro o daño a las personas, la propiedad o el ambiente, se propaga sin control en terrenos rurales, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta*. Es decir, es el fuego que quema árboles, matorrales y pastos de manera descontrolada y que, en su propagación, puede destruir ganado, viviendas, como también vidas humanas. Los incendios forestales son un problema que generan gran cantidad de pérdidas en todo el mundo, convirtiéndose en unos de los causantes de los procesos de deforestación, desertificación y de la contaminación atmosférica .

Estas catástrofes han tenido lugar desde hace más de 470 millones de años, siendo parte de cada una de las etapas de evolución de la Tierra. Si bien el fuego ha sido parte fundamental del desarrollo de los seres humanos, han sido estos mismos con sus actividades, industrias y el cambios climáticos, los que han generado incendios que afectan cada vez a mayores superficies, con más intensidad y severidad. (Rodriguez-Trejo, 2012).

Al evaluar esta problemática en Chile, donde se originan en promedio 6.000 incendios al año, afectando a cerca de 50.000 hectáreas según Corporación Nacional Forestal (CONAF) et al. (2011), nos encontramos con que los incendios forestales presentan grandes diferencias entre las regiones y comunas en las que se originan, pues éstas tienen distintas condiciones de riesgo, peligro y daño potencial. Esto se debe al significativo efecto de la población en el inicio del fuego, además de los diferentes factores ambientales que inciden como el clima, la topografía y el tipo de vegetación. (Castillo et al., 2012)

Tal como se menciona en Castillo et al. (2012), dentro de las regiones de la zona central de Chile, la región que tiene mayor superficie afectada (hectáreas quemadas) es la de

Valparaíso, V Región. Es en esta región donde se centrará este estudio.

En la región de Valparaíso, los incendios forestales corresponden a un 15 % aproximadamente de los incendios a nivel nacional, según cifras de Corporación Nacional Forestal (CONAF) et al. (2011), lo que ha significado grandes daños y pérdidas de cientos de hectáreas de bosques de gran valor, viviendas y además de pérdidas de vidas humanas, así como también efectos significativos a nivel socioeconómico y ecológico en la zona.

A la hora de combatirlos, el **ataque inicial** es de suma importancia y es una de las acciones que puede prevenir que un incendio sea de gran magnitud. El ataque inicial es el conjunto de acciones realizadas por los primeros recursos (camiones aljibe, helicópteros, brigadas, etc) en llegar al foco del incendio. Mientras antes sea posible llegar con los recursos móviles para apagarlo, más posibilidades de contenerlo se tiene, evitando que crezca sin control y, por ende, las pérdidas asociadas.

Los incendios, si bien han ido disminuyendo a lo largo de los años gracias a los planes de prevención de CONAF y de las comunas de la Región de Valparaíso, no han podido ser combatidos de forma significativa. Por lo tanto, si fuese posible tener conocimiento de los puntos de mayor probabilidad de incendios y, por otro lado, los recursos con los que se disponen, sería posible encontrar un mecanismo para mejorar la respuesta y lograr extinguirlos.

¿Existen modelos o herramientas que nos permitan esto? En la literatura es posible encontrar variadas investigaciones sobre modelos de localización de recursos móviles para apagado de incendios forestales, sin embargo no existe ninguna aplicada en Chile, ni menos en la región de Valparaíso.

¿Con estos modelos es posible disminuir el tiempo de respuesta? Con un modelo de localización con cobertura es posible disminuir el tiempo que requieren los recursos móviles para llegar a los puntos afectados por el incendio y de esta manera maximizar los puntos de demanda (zonas de incendio) que son cubiertos en una zona limitada. Sin embargo, la localización de recursos de apagado de incendios forestales, debiese estar enfocada a minimizar la cantidad esperada de hectáreas quemadas en un incendio forestal, problema que sin duda tiene una complejidad mayor. Con los modelos de cobertura, si bien se realizar una aproximación para cumplir este objetivo, no se asegura la disminución de la

cantidad esperada de hectáreas quemadas.

2 | Objetivos

2.1. Objetivo General

Determinar la localización de recursos móviles para apagado de incendios forestales, en la región de Valparaíso, Chile.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de los modelos aplicados en las emergencias forestales.
- Implementar modelos de localización de recursos móviles para emergencias forestales que maximicen la cobertura de los puntos de demanda.
- Generar parámetros que permiten implementar un modelo de máxima cobertura que reduzca el tiempo de apagado de incendios forestales.
- Generar herramientas y/o lineamientos que apoyen la gestión relacionada con incendios forestales, tanto preventiva como reactiva en la región de Valparaíso.

3 | Marco teórico

3.1. Antecedentes Generales

3.2. Incendios Forestales

Para estudiar los incendios forestales, es necesario tener conocimiento de lo que compone el fuego y cuál es su descripción. El fuego se genera por un proceso llamado combustión, en el cual debe existir:

- Combustible: Material que pueda liberar energía al ser quemado.
- Oxígeno: El fuego necesita de al menos 16 % de oxígeno y el aire que respiramos contiene 21 %.
- Calor: Energía necesaria para elevar la temperatura del combustible hasta el punto que se produzca la ignición.

Un incendio forestal es un evento causado intencional, accidental o fortuitamente, donde se quema vegetación viva o muerta. Es un fuego descontrolado en el que su propagación puede afectar bosques, pastizales, ganados, viviendas, e incluso vidas humanas. Los incendios forestales necesariamente deben tener una fuente de ignición y gran parte de ellas se atribuyen a la actividad humana. Además se reconoce la existencia de tres factores que condicionan el comportamiento del fuego, formado por la *topografía, meteorología y combustible*.

Los factores topográficos afectan la propagación de los incendios y además son los factores más constantes e influyentes en los otros dos. Se dividen en tres: La configuración

del relieve, pues condiciona el clima y el viento. La posición del terreno respecto de los ángulos de rayos de sol, afectando a la humedad y a la temperatura. Y la pendiente, que influye en la transmisión de energía (mientras más inclinada la superficie, mayor la velocidad de propagación del fuego).

Por otro lado, los factores meteorológicos pueden agruparse en dos tipos: Los que influyen en el inicio del fuego, dónde se reconoce la radiación del sol, las precipitaciones, la temperatura del aire y la humedad relativa. Y las que influyen en la velocidad de propagación, dónde se encuentran la velocidad del viento, la dirección del viento y el grado de estabilidad atmosférica.

Y finalmente el combustible depende de los factores intrínsecos (composición, especie y estado) y extrínsecos de la vegetación. (Díaz Romero, 2011).

Considerando los factores que los provocan e influyen en sus efectos y propagación, los incendios forestales se dividen en tres: *De superficie*, son más comunes dónde se quema sotobosque. *Aéreo, de copas o corona*, originado por uno de superficie que luego avanza a la copa de los árboles. *Subterráneos*, se queman raíces, capa de humus y la micro-fauna, no tiene llama. Generalmente se da una combinación de estos tres tipos. (Corporación Nacional Forestal (CONAF) et al., 2011).

A raíz de éstas y otras características, se realiza el monitoreo y estudio de estas catástrofes. Chile es un país que se ha visto afectado en reiteradas ocasiones por incendios forestales y por lo tanto ha sido tema de investigación y preocupación nacional.

3.3. Situación Nacional

Los incendios forestales en Chile, al igual que en muchas partes del mundo, son una de las catástrofes más recurrentes, generando grandes pérdidas. Por esto hace años se comienza a estudiar el comportamiento de los incendios, de manera de poder monitorearlos y controlarlos. Sin embargo hace falta generar estudios e investigación necesaria para lograr en algún momento, evitarlos o al menos evitar sus consecuencias.

3.3.1. Caracterización de Incendios Forestales a través de Índices

En Chile, se ha trabajado el tema de los incendios con el foco puesto en la prevención y el control. Las primeras investigaciones sobre incendios forestales, se realizaron cuando en 1962 se generó el *Índice de Incendios Forestales* hecho por el Instituto Forestal, basado en la humedad relativa del ambiente, pero que no tenía un estudio acabado de su efectividad. Luego en 1968 la Universidad de Chile generó el *Índice de Probabilidad de Ocurrencia*, a partir de un estudio en la región del Bio-Bio que evaluaba la combinación de valores de temperatura del aire, humedad relativa y el factor de sequía como factores que se correlacionan con la probabilidad de fuego. A éste último índice, unos años después, se agrega la velocidad del viento, haciéndolo un poco más completo. Sin embargo la variabilidad de la geografía en Chile y sus diversas condiciones, generan problemas a la hora de aplicar este nuevo índice de forma general.

Posterior a éstos dos índices, se comienza a estudiar el *grado de riesgo* de producirse un incendio, éste toma como parámetros el la probabilidad de ocurrencia por ocurrencia histórica y por su puesto los efectos del ser humano en el territorio. Además se estudia el *grado de peligro*, que es la combinación de la probabilidad de inicio de un incendio, el comportamiento del inicio del incendio, la propagación del fuego y los esfuerzos para su control. A esto de le suma un tercer indicador que es el *grado de daño potencial* de un incendio, que significa los perjuicios tanto materiales como sociales de la catástrofe. (Castillo et al., 2014)

Tanto los índices como el comportamiento de los incendios forestales a lo largo y ancho de Chile, tiene características que han sido estudiadas, en particular en las regiones donde su ocurrencia es mayor, como es el caso de la Región de Valparaíso.

3.3.2. Comportamiento en Chile y Valparaíso

Los estudios realizados por Castillo et al. (2012) en las 4 regiones de la zona centro de Chile (Valparaíso, Metropolitana, Libertador Bernardo O´higgins y del Maule), entregan testimonio sobre la existencia de patrones espaciales de ocurrencia de fuegos. Se confirma que las especies nativas mediterráneas, mayoritariamente leñosas altas y matorrales escle-

rófilos, se comportan de forma similar a otros ambientes mediterráneos, donde la presencia de fuego es principalmente responsabilidad de la actividad humana.

En particular en la Región de Valparaíso, los incendios forestales han sido monitoreados por CONAF desde hace varios años (CONAF y CONAMA, 1999). Es posible observar con los datos de incendios en la región desde 1998 hasta 2015 la presencia de estacionalidad en la ocurrencia de los incendios (ver tabla 3.1), las comunas con mayor hectáreas quemadas (ver tabla 3.2) y también las características del sector donde se inician los incendios con mayor cantidad de hectáreas quemadas (ver tabla 3.3).

Tabla 3.1: Porcentaje Hectáreas Quemadas por Mes, Valparaíso

MES	HECTÁREAS	PORCENTAJE	ACUMULADO
ENERO	**36960**	**33,00 %**	**33,90 %**
DICIEMBRE	**30929**	**27,60 %**	**60,58 %**
FEBRERO	**18132**	**16,18 %**	**76,77 %**
MARZO	**12686**	**11,32 %**	**88,09 %**
NOVIEMBRE	6582	5,87 %	93,96 %
ABRIL	3935	3,51 %	97,47 %
OCTUBRE	1117	1,00 %	98,47 %
MAYO	852	0,76 %	99,23 %
SEPTIEMBRE	458	0,41 %	99,64 %
AGOSTO	259	0,23 %	99,87 %
JUNIO	120	0,11 %	99,98 %
JULIO	22	0,02 %	100,00 %

El 89 % de las hectáreas quemadas se generan en los meses de enero, diciembre, febrero y marzo, en orden decreciente respectivamente. Lo que demuestra que existe estacionalidad en el periodo donde las temperaturas son más altas (verano). Incluso en los meses de mayor calor, enero y diciembre, se quema el 61 % de las hectáreas.

Y por otro lado el 83 % de las hectáreas se queman en incendios iniciados en cercanías de senderos, caminos secundarios, caminos primarios y casas o refugios, también en orden decreciente respectivamente, lo que demuestra una relación entre las hectáreas quemadas y el inicio de los incendios en espacios de mayor afluencia de personas.

Estos datos, además de entregarnos una noción de la cantidad de hectáreas quemadas en los últimos 17 años, nos da un acercamiento a los grados de riesgo, peligrosidad y daño potencial existentes en la V región.

Tabla 3.2: Porcentaje Hectáreas Quemadas por Comuna, Valparaíso

COMUNAS	HECTÁREAS	PORCENTAJE	ACUMULADO
CASABLANCA	**14527**	**12,96 %**	**12,96 %**
SAN ANTONIO	**10360**	**9,25 %**	**22,21 %**
VALPARAISO	**10261**	**9,16 %**	**31,37 %**
VILLA ALEMANA	**10057**	**8,98 %**	**40,34 %**
LA LIGUA	**8557**	**7,64 %**	**47,98 %**
LIMACHE	**7894**	**7,04 %**	**55,02 %**
QUILPUE	**7599**	**6,78 %**	**61,80 %**
CARTAGENA	**7504**	**6,70 %**	**68,50 %**
SANTO DOMINGO	**4438**	**3,96 %**	**72,46 %**
PUCHUNCAVI	**3410**	**3,04 %**	**75,51 %**
VINA DEL MAR	**3407**	**3,04 %**	**78,55 %**
ALGARROBO	**3255**	**2,91 %**	**81,45 %**
NOGALES	2775	2,48 %	83,93 %
QUILLOTA	2581	2,30 %	86,23 %
HIJUELAS	2466	2,20 %	88,43 %
EL TABO	2434	2,17 %	90,61 %
ZAPALLAR	1575	1,41 %	92,01 %
QUINTERO	1375	1,23 %	93,24 %
EL QUISCO	1155	1,03 %	94,27 %
CON-CON	1087	0,97 %	95,24 %
OLMUE	921	0,82 %	96,07 %
LA CALERA	897	0,80 %	96,87 %
ISLA DE PASCUA	890	0,79 %	97,66 %
CABILDO	679	0,61 %	98,27 %
LLAY-LLAY	446	0,40 %	98,67 %
LA CRUZ	300	0,27 %	98,93 %
PETORCA	267	0,24 %	99,17 %
PAPUDO	254	0,23 %	99,40 %
SAN FELIPE	181	0,16 %	99,56 %
PUTAENDO	99	0,09 %	99,65 %
LOS ANDES	80	0,07 %	99,72 %
RINCONADA	75	0,07 %	99,79 %
CATEMU	65	0,06 %	99,85 %
CALLE LARGA	63	0,06 %	99,91 %
SAN ESTEBAN	59	0,05 %	99,96 %
PANQUEHUE	24	0,02 %	99,98 %
SANTA MARIA	22	0,02 %	100,00 %
JUAN FERNANDEZ	0,2	0,00 %	100,00 %

Tabla 3.3: Porcentaje Hectáreas Quemadas por Inicio Cercano, Valparaíso

INICIO CERCANO	HECTÁREAS	PORCENTAJE	ACUMULADO
SENDERO	**40178**	**35,90 %**	**35,90 %**
CAMINO SECUNDARIO	**25287**	**22,59 %**	**58,49 %**
CAMINO PRINCIPAL	**15872**	**14,18 %**	**72,67 %**
CASA O REFUGIO	**11797**	**10,54 %**	**83,21 %**
OTROS	10311	9,21 %	92,42 %
FAENAS AGRICOLAS	3209	2,87 %	95,29 %
VIA FERREA	2454	2,19 %	97,48 %
LUGARES PIC-NIC	2356	2,11 %	99,59 %
FAENAS FORESTALES	369	0,33 %	99,92 %
ORILLA CURSO DE AGUA	49	0,04 %	99,96 %
INST. INDUSTRIALES	35	0,03 %	99,99 %
QUEBRADA	2	0,00 %	99,99 %
NAVES AVICOLAS	2	0,00 %	99,99 %
TENDIDO ELECTRICO	0,6	0,00 %	99,99 %

Si bien se han intensificado las campañas de prevención y mayores controles para evitar estas catástrofes, la tendencia de los incendios en Chile ha ido en aumento, tal como ocurre en la mayoría de los países. Castillo et al. (2014) menciona que esto es consecuencia del uso intensivo de recursos naturales renovables, además del aparente efecto que tiene el cambio climático en el aumento de la cantidad y gravedad de los incendios.

La evaluación y pronóstico de incendios en Chile ha sido un tema de gran relevancia desde hace más de 40 años, sin embargo no se han generado herramientas que se basen en la localización de los recursos para combatirlos y de esta manera lograr disminuir las consecuencias que generan al país. Existen experiencias e investigaciones de localización de recursos aplicados en otros países y es necesario realizar una revisión de éstas para poder aportar al desarrollo de una herramienta que mejorare la gestión forestal en Chile.

3.4. Revisión Bibliográfica

La programación lineal (LP) ha sido utilizada para la planificación forestal desde los años 60, especialmente en las últimas dos décadas, para dar apoyo a las decisiones de la gestión forestal y de incendios forestales.

Como el comportamiento de los incendios varía según clima, vegetación y también actividades de los seres humanos, en diferentes países se ha abordado la investigación de operaciones en gestión forestal e incendios forestales con distintos enfoques.

La revisión bibliográfica que se realiza, toma el tema de las emergencia de manera más general que sólo incendios forestales, puesto que el despliegue de recursos en catástrofes de distinto tipo, suele tener factores en común.

Además la utilización de modelos de localización se realiza de dos maneras distintas: Por un lado la localización continua (es posible instalar en cualquier punto de en un plano continuo) y por otro, la localización discreta (es posible instalar sólo en puntos factibles).

- Uno de los trabajos de localización contínua, es el realizador por Drezner et al. (1990), que presenta un problema de localización de una estación de servicio, suponiendo un tiempo de viaje y tiempo de espera en cola cuándo el servidor está ocupado. En este trabajo se modela el arribo de solicitudes con una distribución Poisson de tasa λ, el tiempo de servicio con una distribución general de media μ y un sólo servidor con tiempo de servicio de media μ y desviación estándar σ, es decir el servidor se modela como un nodo M/G/1. El modelo es formulado como problema no lineal convexo y resuelto mediante el método Weiszfeld.

  Un tiempo después, el modelo aplicado en Yang et al. (2007), tiene como objetivo determinar la óptima ubicación de las instalaciones de bombas de bomberos, aplicado en Derbyshire, Inglaterra. El método de resolución propuesto es la combinación de multi-objetivo y un algoritmo genético. Los objetivos múltiples originales se unen en un objetivo "min-max", lo que facilita la aplicación de un algoritmo genético para la resolución del problema.

- Por el otro lado, en los modelos de localización discreta, se encuentra el trabajo de Dimopoulou y Giannikos (2001), implementado en Atenas, Grecia, que luego de clasificar las regiones (según clima, vegetación, pendiente y velocidad del viento), aplica un modelo de localización de máxima cobertura, MCLP, que considera esta clasificación en sus parámetros. Los resultados se obtienen evaluando distintos valores para los pesos asignados a los puntos de demanda (según clasificación). Se

busca la localización óptima de una cantidad limitada de recursos de apagado de incendios forestales, de tal manera que se cubra la máxima cantidad de la demanda de las regiones.

Posteriormente Dimopoulou y Giannikos (2004) desarrollan una plataforma con 3 módulos: En el primero de ellos, se presenta la información real, dónde a partir de un módulo SIG (Sistema de Información Geográfica) se obtienen los parámetros aplicados en el siguiente módulo. El segundo módulo de programación matemática se desarrollan modelos adecuados para aplicar en las zonas geográficas determinadas. En el tercer módulo se utiliza un modelo de simulación para validar los resultados. Se plantea un modelo que busca minimizar las instalaciones de recursos móviles para cubrir toda la demanda con un problema de cobertura total, LSCP, y otro modelo que busca maximizar la demanda cubierta dada una cierta cantidad de recursos a instalar, MCLP.

El trabajo realizado por Wang y Zhang (2006) se realiza con un modelo que busca optimizar la ubicación de los centros de rescate, asignando de la mejor manera los recursos disponibles. El modelo minimiza conjuntamente los costos fijos de instalación del centro de rescate y los costos esperados asociados a la catástrofe. El modelo es formulado como un problema no lineal entera mixto (MINLP). Estos autores proponen una heurística para encontrar una solución factible, sin posibilidad de evaluar su optimalidad.

Replicando el trabajo hecho en 2001, Díaz Romero (2011), realiza un modelo de localización óptima de recursos para apagado de incendios forestales, aplicando un MCLP. Este modelo se aplica en Chiapas, México.

Otro trabajo es el de Ntaimo et al. (2012), donde el objetivo del modelo es contener la mayor cantidad de incendios posibles minimizando los costos fijos de localización, de viaje y los costos operacionales futuros esperados (costos de apagar el incendio). Se presenta un modelo de dos etapas donde se localizan y luego se despachan los recursos, de manera tal que se cumpla el objetivo.

Lee et al. (2013) presenta un trabajo donde se combina un modelo de optimización

con un modelo de simulación. El modelo de optimización minimiza el número esperado de incendios que no reciben una respuesta adecuada (definida como el número de recursos que deben llegar al incendio dentro de un límite de tiempo especificado) sujeto a limitaciones de presupuesto, capacidad de la estación e incertidumbre sobre el número diario de incendios.

En el trabajo de Belval et al. (2014) se reconoce dos tipos de fuegos: uno perjudicial y otro que genera beneficios ecológicos. El modelos presentado consta también de dos etapas, se busca minimizar, en la primera etapa, el área quemada (valor a proteger) y el número de nodos de instalaciones localizado (costos de control del incendio), considerando el fuego perjudicial. Y en la segunda etapa se considera además el beneficio ecológico que podría tener el fuego cuando se encuentra bajo el umbral de intensidad.

Wei et al. (2015) propone un modelo estocástico de dos etapas, donde la primera busca la adquisición y la segunda la localización de los recursos, ambas buscando la minimizar los costos asociados. Se considera la probabilidad de generación de uno o más incendios en un día.

Por otro lado, existen trabajos referidos a la gestión forestal en general, que buscan optimizar el despacho de recursos como por ejemplo:

El trabajo de Donovan y Rideout (2003) busca determinar un conjunto de recursos para apagado de incendios que es necesario, identificando el costo mínimo. En el modelo se minimiza los daños relativos al incendio y los costos asociados en m periodos y n tipo de recursos (la selección de los recursos se hace se hace a partir de un menú discreto). Determina en qué periodo se debe despachar cada recurso de lucha contra incendios.

En el artículo de Hu y Ntaimo (2009) se presenta un marco integrado para la simulación de propagación de incendios forestales, además la optimización de recursos de lucha contra incendios y la simulación de supresión de incendios. Para la optimización, se utiliza un modelo estocástico de programación entero mixto (MILP), para generar planes de despacho de recursos de extinción de incendios.

Mendoza Armenta et al. (2012) toma en consideración los recursos con los que se

dispone y los costos de las decisiones para determinar que recursos y cuándo deben ser utilizados. Este trabajo toma el modelo propuesto en Donovan y Rideout (2003) y se propone una serie de adecuaciones a las restricciones.

En resumen el problema de localización de recursos móviles para apagado de incendios forestales, se ha resuelto a a través de: (i) Modelos de localización continua, los cuales permiten determinar localizaciones óptimas, pero muy probablemente, infactibles; (ii) Modelos de cobertura, los cuales asumen que un predio está protegido, si los recursos para el apagado de incendios están a una distancia o tiempo adecuado; (iii) Variaciones del Uncapacited Facility Location Problem (UFLP), que minimizan el costo de instalación, costo variable y costos asociados al perjuicio que provocan los incendios.

4 | Formulación del Modelo

En este trabajo, se utilizan modelos de cobertura para determinar la localización óptima de los recursos para emergencias forestales, los que se implementarán en la Región de Valparaíso. A continuación se describe el modelo de máxima cobertura y modelo de cobertura total que se usarán en este trabajo.

4.1. Localización con Máxima Cobertura

En el problema MCLP (por su sigla en inglés Maximal Covering Location Problem) se busca maximizar la demanda cubierta, considerando un radio o tiempo de cobertura y restringiendo el número de instalaciones posibles de localizar. Este modelo fue desarrollado por Church y Revelle (1974).

Tal como se presenta en Dimopoulou y Giannikos (2001) y en Díaz Romero (2011) el modelo MCLP se puede generalizar para un conjunto k de recursos disponibles en cada posible instalación de tipo j.

A continuación se presenta la formulación matemática del problema.

- **Conjuntos:**
  - I : Conjunto de nodos de demanda i.
  - J : Conjunto de posibles instalaciones j.
  - K : Conjunto de recursos para apagado de incendios forestales.
  - $N_{ik} = \{j \in J : \ t_{ij}^{k} \leq Tmax_i\} \ \forall i \in I \ \forall k \in K$: Conjunto de posibles instalaciones j que pueden satisfacer la demanda i con el recurso k.

- **Parámetros:**
  - t_{ij}^{k} : Tiempo requerido para que un recurso del tipo k pueda viajar de la demanda i a la instalación j.
  - $Tmax_i$: Tiempo límite para realizar el ataque inicial para cada nodo de demanda i.
  - w_i : Peso según prioridad de apagado para la demanda i.
  - S_k : Número máximo de recursos de tipo k.
- **Variables:**
  - $y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda i está cubierta por al menos un recurso} \\ 0 & \sim \end{cases}$
  - $x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si el recurso k está en la instalación j} \\ 0 & \sim \end{cases}$

Modelo compacto:

$$\max_{x,y} \quad \sum_{i \in I} w_i y_i \tag{4.1}$$

$$\text{sujeto a} \quad y_i \leq \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_{ik}} x_{jk} \quad \forall i \in I \tag{4.2}$$

$$\sum_{j \in J} x_{jk} \leq S_k \quad \forall k \in K \tag{4.3}$$

$$x_{jk},\ y_i \in \{0,1\} \quad \forall j \in J\ \forall k \in K\ \forall i \in I \tag{4.4}$$

La función objetivo (4.1) maximiza la suma de demanda de cada nodo i, ponderada por su respectivo peso, que está siendo cubierta por algún servidor j. La restricción 4.2 asegura que para que nodo i se considere cubierto, debe estar instalado al menos un servidor j con algún recurso k dentro de la vecindad N_{ik} y por tanto que esté a lo más a un tiempo $Tmax_i$ de la demanda. La restricción 4.3 restringe el número de instalaciones, pudiendo instalarse sólo S_k servidores. Y finalmente la restricción 4.4 tiene relación con la naturaleza binaria de las variables.

Este tipo de modelo de Máxima Cobertura, suele utilizarse cuando se está trabajando con bienes público o necesidades básicas, pues se busca cubrir de la mejor manera la demanda con una restricción donde se limita la cantidad de instalaciones y no se busca, como en otros modelos, minimizar los costos asociados. Es por esta razón que se ha considerado que es un modelo adecuado para las catástrofes de incendios forestales, dónde busca la mejor manera de llegar con los recursos disponibles, a los puntos de incendios.

4.2. Localización con Cobertura Total

Además del modelo anteriormente mencionado, es posible resolver el problema que plantea localizar la mínima cantidad de instalaciones de manera tal que se cubran los puntos de demanda en su totalidad.

Con este objetivo es que se utiliza un modelo de Cobertura Total, LSCP (por su sigla en inglés Location Set Covering Problem). Fue desarrollado por Toregas et al. (1971). El modelo se detalla de la siguiente manera.

- **Conjuntos:**
  - I : Conjunto de nodos de demanda i.
  - J : Conjunto de posibles instalaciones j.
  - $N_i = \{j \in J : \ t_{ij} \leq Tmax_i\} \ \forall i \in I$: Conjunto de posibles instalaciones j que pueden satisfacer la demanda i.
- **Parámetros:**
  - t_{ij} : Tiempo requerido para que un recurso pueda viajar de la demanda i a la instalación j.
  - $Tmax_i$: Tiempo límite para realizar el ataque inicial para cada nodo de demanda i.
- **Variables:**
  - $x_j = \begin{cases} 1 & \text{si se instala en j} \\ 0 & \sim \end{cases}$

Modelo compacto:

$$\underset{x}{\text{Min}} \quad \sum_{j \in J} x_j \tag{4.5}$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \tag{4.6}$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \tag{4.7}$$

La función objetivo (4.5) minimiza la suma total de las instalaciones localizadas. La restricción 4.6 asegura que para todo nodo i debe existir un servidor j dentro de la vecindad N_i y por tanto que esté a lo más a un tiempo $Tmax_i$ de la demanda, de manera tal que todo nodo de demanda esté cubierto por al menos un servidor. La restricción 4.4 tiene relación con la naturaleza binaria de la variable.

5 | Caracterización de la Región

Este capítulo describe la metodología utilizada en el trabajo Atienza et al. (2010) para caracterizar la región de Valparaíso según las distintas prioridades de protección. Esta metodología se materializa finalmente en un mapa de prioridades de protección.

El mapa clasifica zonas a través de tres índices, a saber, **Riesgo, Peligro y Daño Potencial** y establece tres categorías en cada uno de ellos: Alta, Media y Baja.

Atienza et al. (2010) divide la región de Valparaíso en cuadrantes de 900[m^2] (30[m]x30[m]). En cada cuadrante se determina la prioridad de protección como función de los índices de Riesgo, Peligro y Daño Potencial.

Cada índice del modelo de Atienza et al. (2010) es una variables generales, compuesta de variables específicas, que se dividen en tres niveles (nivel 1, nivel 2, nivel 3). Los índices están normalizados en base 1000, como una forma de asignar importancia a cada uno, es decir, la suma de los tres índices en términos de importancia es 1000. La tabla 5.1, indica la asignación del puntaje normalizado a cada índice y a sus variables específicas.

La tabla 5.1 indica que Atienza et al. (2010), determina que el índice de mayor importancia es el de riesgo, al cuál le asigna un puntaje de 380 de mil, por tanto un 38 % del total. La tabla también indica los puntajes asignados a cada variable específica, por ejemplo, la ocurrencia histórica pesa en éste índice (riesgo) 52 % ($\frac{200}{380}$). A continuación se describe cada uno de los índices.

5.1. Índice de Riesgo

El riesgo es entendido como la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales y para esto, Atienza et al. (2010) estimó que los mejores indicadores son la **ocurrencia histórica**

Tabla 5.1: Variables y Puntajes para la Determinación de Prioridades. Fuente: Atienza et al. (2010)

Variables	Variables	Especificas		Puntaje	Sub
Generales	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Normalizado	total
Índice	Ocurrencia Histórica			200	
de	Ocurrencia	Red Vial		70	380
Riesgo	Potencial	Población		110	
Análisis	Combustible			80	
de	Resistencia al Control			50	
Peligro	Topografía	Pendiente		70	270
		Exposición		40	
	Clima			30	
Análisis	Daño	Recursos Productivos		100	
de	Directo	Captura de Carbono		30	
Daño		Interfaz		80	
Potencial	Daño	Paisaje	Geomorfología	20	350
	Social	y Belleza	Vegetación	30	
	y Ambiental	Escénica	Agua	30	
		Conservación		60	

y la **ocurrencia potencial** de incendios en la región. Ésta última se explica por dos factores de influencia: **población y red vial**.

Para el caso de la ocurrencia histórica, se evaluaron los incendios ocurridos en el periodo 2000-2009 registrados por CONAF. Atienza et al. (2010) normaliza el puntaje según incendios ocurridos históricamente por cuadrante, tal como se expresa en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Puntajes por Número de Incendios por Cuadrante. Fuente: Atienza et al. (2010)

N° Incendios/ cuadrante	Puntaje Normalizado	N° Incendios/ cuadrante	Puntaje Normalizado
1	10	49-58	110
2	20	59-68	120
3-4	30	69-78	130
5-7	40	79-88	140
8-11	50	89-108	150
12-14	60	109-128	160
15-21	70	129-148	170
22-28	80	149-168	180
29-38	90	169-188	190
39-48	100	189-405	200

La Tabla 5.2, indica por ejemplo, que si en un cuadrante hubo históricamente 1 incendio, este cuadrante tiene un puntaje normalizado 10, y si en un cuadrante hubo históricamente entre 189-405 incendios, ese cuadrante tiene un puntaje normalizado máximo, es decir 200 puntos.

Otra variable especifica para este índice de riesgo, es la población. Atienza et al. (2010) clasificó la región según centros poblacionales, obtenidos de información del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2005). Los centros poblacionales abarcan un conjunto de cuadrantes, es decir, polígonos, a los cuales se les asignó un rango de influencia según número de habitantes, lo que se ve traducido en la cantidad de cuadrantes adyacentes a éste polígonos, que se ven influenciados por su rango de población, tomando su valor de puntaje.

La tabla 5.3 muestra como Atienza et al. (2010) normaliza el puntaje, entregando mayor peso a aquellos polígonos donde existe mayor rango de población y a su vez mayor rango de influencia a éstos mismos.

Tabla 5.3: Puntajes Según Población y Franja de influencia. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Población (Número de Habitantes)	**Puntaje Normalizado**	**Franja de Influencia [m]**
0-10000	10	50
10000-20000	20	100
20000-30000	30	200
30000-40000	40	300
40000-5000	50	400
50000-60000	60	500
60000-70000	70	600
70000-80000	80	700
80000-90000	90	800
90000-100000	100	900
> 100000	110	1000

En la Tabla 5.3 se aprecia como, por ejemplo, para un polígono con rango de población entre 0-10000 habitantes, se asignó un puntaje normalizado de 10 y un rango de influencia 50 [m], a diferencia de un centro poblacional con mayor número habitantes, que tiene un rango mayor a 100000 habitantes que se le asigna un puntaje máximo de 110 y un rango de influencia de 1000[m].

Para la variable específica de red vial, también considerada dentro de este índice, se hace una clasificación de la región según el tipo de camino. Se diferencian tres tipos de caminos, a saber, carreteras, caminos con carpera de ripio y caminos públicos y privados con carpeta de tierra, según la información proporcionada por el Ministerio de Obras Públicas. La franja de influencia nuevamente, corresponde a la influencia sobre los cuadrantes adyacentes a aquellos donde se encuentran estos caminos.

Atienza et al. (2010) normalizó el puntaje asignado a cada tipo de camino según la intensidad de tránsito, dando mayor riesgo a las carreteras y menor riesgo a los caminos

con carpeta de tierra. De igual manera se asignó el rango de influencia, tal como se aprecia en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Puntajes y Franja de Influencia por Tipo de Red Vial. Fuente: Atienza et al. (2010)

Tipo de Red Vial	Puntaje Normalizado	Franja de Influencia [m]
Carreteras	70	200
Caminos con Carpeta de Ripio	40	100
Caminos Públicos y Privados con carpeta de tierra	20	50

La Tabla 5.4 muestra como, por ejemplo para los cuadrantes que corresponden a carreteras, se asignó un puntaje de 70 y un rango de influencia de 200[m].

Finalmente con estas tres variables, Atienza et al. (2010) genera un mapa de riesgo para la región. En la Tabla 5.5 se presentan los puntajes totales, que reflejan la suma ponderada de cada variable y los rangos, que se establecieron procurando que la cantidad de cuadrantes con prioridad BAJA sea el doble que los de prioridad MEDIA y éstos el doble que los de ALTA.

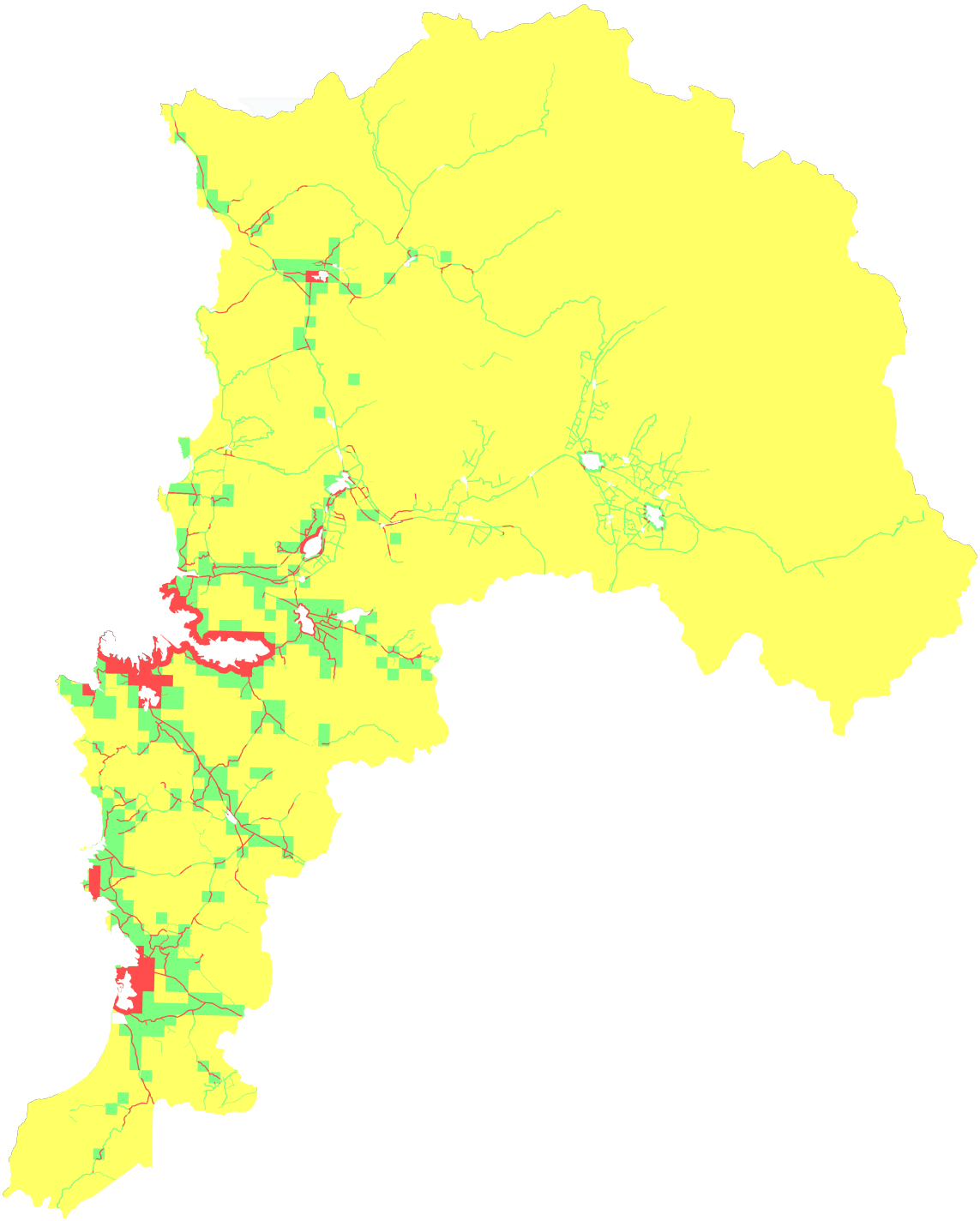
Tabla 5.5: Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis del Riesgo. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Puntaje Total	Porcentaje de Superficie	Prioridad
90-380	13.9	ALTA
30-89	35.4	MEDIA
1-29	50.7	BAJA

La Tabla 5.5 muestra como el rango de puntaje entre 90-380, representa un 13,9 % del total de cuadrantes y éstos tienen prioridad alta.

El mapa que se obtuvo con este análisis, es el siguiente (Figura 5.1) :

Figura 5.1: Mapa Análisis Riesgo. Fuente: Atienza et al. (2010)



5.2. Índice de Peligro

El peligro de incendios forestales se entiende como la posibilidad de ignición, propagación y las dificultades de control del fuego una vez iniciado. Para este índice se consideraron las variables de **combustible** (potencial de propagación), **la resistencia al control**, la topografía (que se descompone en **pendiente y exposición**) y **el clima**.

Para la primera variable, combustible, pretende medir el potencial de propagación de los combustibles forestales. En el trabajo de Atienza et al. (2010) compararon los tipos de vegetación, sacados del trabajo de CONAF y CONAMA (1999), con los modelos de combustibles para Chile definidos por el sistema Kitral, presentados en el trabajo de Julio et al. (1995). La clasificación del modelo de combustible y la comparación con el tipo de vegetación se presenta en Anexo A.

El trabajo de Atienza et al. (2010), normalizó el puntaje en función del modelo de combustible, entregando mayor valor a aquellos dónde su velocidad de propagación es mayor, tal como se presenta en Tabla 5.6:

En la Tabla 5.6 se puede evidenciar como, por ejemplo para el modelo de combustible A1, que tiene una velocidad de propagación 0.01670 $[m/seg]$, se le asignó un puntaje normalizado de 80.

Otra variable para este índice, es la resistencia al control, que se puede definir como la dificultad de contener la propagación de un incendio y por tanto el esfuerzo para la construcción de líneas de control. Atienza et al. (2010) entrega valor a la resistencia al control [m/hombre/h primer ataque], evaluando la cantidad de metros de superficie es posible proteger del fuego por un hombre durante una hora (en el ataque inicial). Cada modelo de combustible, obtenido de la información entregada por Julio et al. (1995), tiene valores diferentes de resistencia al control. La tabla 5.7, muestra como Atienza et al. (2010) normaliza los puntajes según resistencia al control, entregando mayor valor a aquellos con un menor valor de resistencia a control (por tanto se protegen menos metros por cada hombre en una hora).

La tabla 5.7 muestra como para el modelo de combustible A1, se pueden proteger 66 metros de superficie por cada hombre en una hora del ataque inicial, tiene puntaje

Tabla 5.6: Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Velocidad de Propagación. Fuente: Atienza et al. (2010)

Modelo	**Velocidad de propagación** $[m/seg]$	**Puntaje Normalizado**
A1	0.01670	80
A2	0.01670	80
A3	0.01670	80
B1	0.00870	42
B2	0.01400	67
B3	0.01470	70
C1	0.00710	34
C2	0.00462	22
C3	0.01400	67
C4	0.01470	70
D1	0.00760	36
D2	0.00810	39
D3	0.01400	67
D4	0.01470	70
E1	0.00350	17
E2	0.00489	23
E3	0.01400	67
E4	0.01470	70
F1	0.00380	18
F2	0.00380	18
F3	0.01470	70
F4	0.01150	55
G1	0.00264	13
G2	0.00156	7
H1	0.00280	13
H2	0.00485	23
H3	0.00900	43
I1	0.00491	24
I2	0.00456	22
J1	0.00350	17
J2	0.00489	23
J3	0.01400	67
J4	0.01470	70
K1	0.00350	17
K2	0.01000	48

normalizado 1. Mientras que para otro modelo, por ejemplo K2, se protegen 50 metros por cada hombre en una hora de ataque inicial y por tanto tiene un puntaje de 50.

Por parte la pendiente, es otra variable para el índice de peligro. El trabajo de Atienza

Tabla 5.7: Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Resistencia al Control. Fuente: Atienza et al. (2010)

Modelo	Resistencia al control	Puntaje normaliza-do	Modelo	Resistencia al control	Puntaje normaliza-do
A1	66	1	F1	30	32
A2	66	1	F2	20	41
A3	66	1	F3	60	6
B1	30	32	F4	40	23
B2	60	6	G1	9	50
B3	60	6	G2	20	41
C1	12	47	H1	9	50
C2	30	32	H2	15	45
C3	50	15	H3	50	15
C4	60	6	I1	9	50
D1	12	47	I2	15	45
D2	30	32	J1	9	50
D3	50	15	J2	25	36
D4	60	6	J3	50	15
E1	9	50	J4	60	6
E2	50	15	K1	25	36
E3	50	15	K2	50	15
E4	60	6			

et al. (2010), determinó que una vez obtenida las pendiente promedio de cada cuadrante, se construyó una escala de rangos de pendientes promedios, a la cual se le asigno el respectivo puntaje normalizadose . En la Tabla 5.8, se muestra como la asignación de puntaje es mayor para aquellos cuadrantes con mayor pendiente.

Tabla 5.8: Puntaje por Rangos de Pendiente Promedio. Fuente: Atienza et al. (2010)

Porcentaje de Pendiente Promedio	Puntaje Normalizado
0-12	10
13-25	20
26-38	30
39-51	40
52-64	50
65-77	60
> 77	70

De la tabla 5.8 se puede obtener como, por ejemplo, para un cuadrante que su porcentaje por rango de pendiente promedio es 0-12, se asigna puntaje 10.

El otro factor topográfico relevante para este índice, es la exposición, que se comprende como la radiación solar que llega al área en cuestión y como ésta influye en el comportamiento del fuego. Atienza et al. (2010) busca la posición predominantes de las laderas, con respecto a la radiación solar y para esto se generaron las exposiciones promedios para cada cuadrante. En la tabla 5.9 muestra como se realizó la asignación de puntaje normalizado según cada uno de los cuatro puntos cardinales

Tabla 5.9: Puntajes Según Exposición Topográfica. Fuente: Atienza et al. (2010)

Exposición Topográfica	Puntaje Normalizado
Noroeste	40
Noreste	30
Sureste	20
Suroeste	10

La tabla 5.9 entrega, por ejemplo, que para un cuadrante que su ladera está noroeste, el puntaje normalizado es 40.

La última variable para este índice es el clima. Atienza et al. (2010) obtiene la información base para el análisis de esta variable del trabajo de Santibañez y M. (1990), que identifica distritos climáticos para el país y en este caso específico, para la región de Valparaíso. Se evaluaron los distritos climáticos de la región de Valparaíso y a cada uno se le asignó un puntaje normalizado, tal como se muestra en la Tabla 5.10:

Tabla 5.10: Puntajes Normalizado por Clima. Fuente: Atienza et al. (2010)

Distrito Climático	**Puntaje Normalizado**
5.1-5.2-5.3	30
54.1-54.2-54.3	25
54.4-54.5	20
5.4-5.5-5.6	15
50.1-50.2	10
65.1-65.2-65.3	5
54.6-54.7-74.1-54.8-50.4-54.9-74.2-65.4-50.3	1

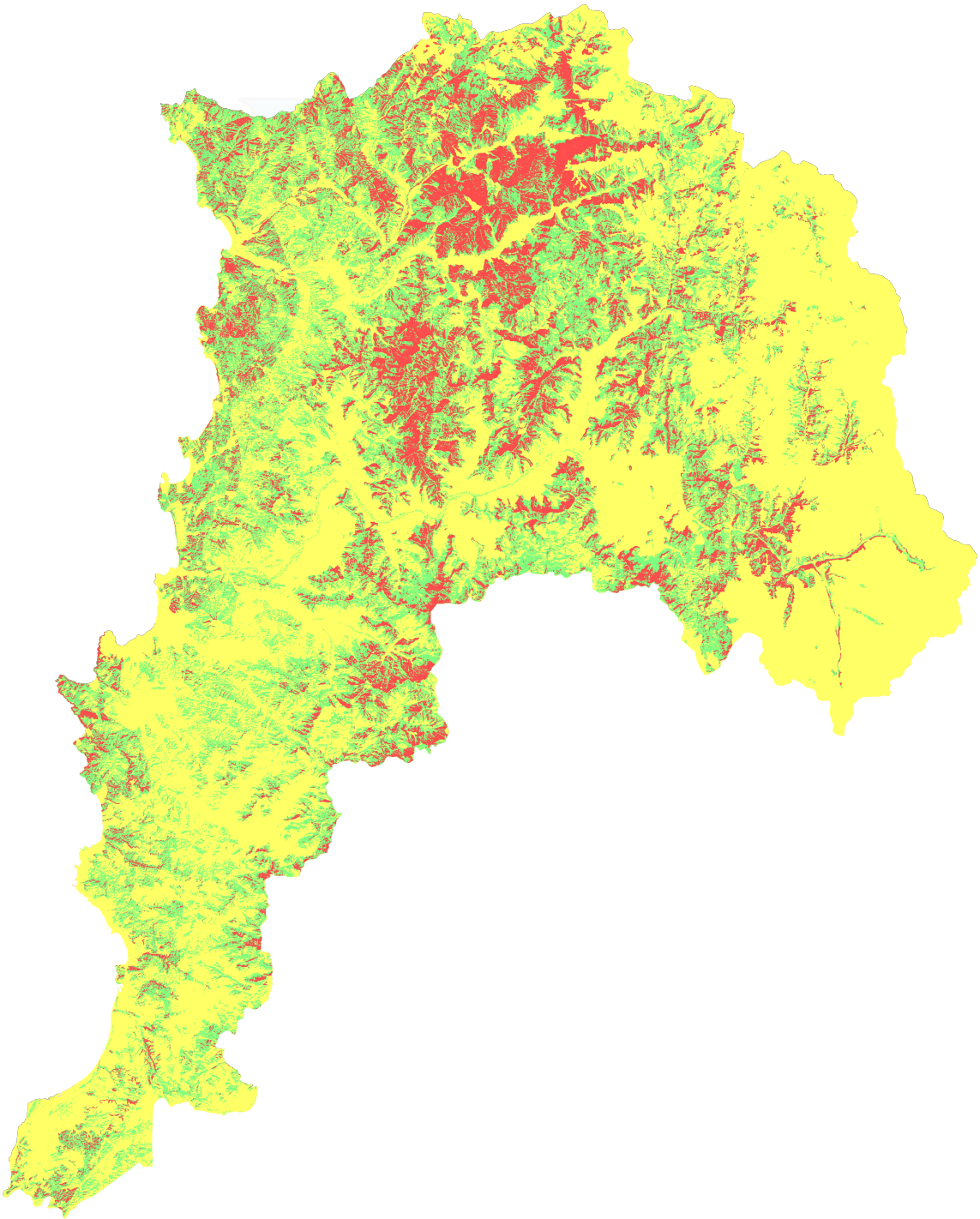
Finalmente la clasificación según el índice de peligro, al igual que en el índice anterior, se realiza sumando los puntajes ponderados de cada variable en cada cuadrante. Y los rangos de puntajes totales para el índice de peligro se presentan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis de Peligro. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Puntaje Total	**Porcentaje de Superficie (Has.)**	**Prioridad**
157-223	15.2	ALTA
128-156	28.2	MEDIA
11-127	56.6	BAJA

De la tabla 5.11, se puede evidenciar, por ejemplo, que aquellos cuadrantes que tengan puntaje entre 157-223, representan el 15,2 % de los cuadrantes y tienen prioridad alta. El mapa que se obtuvo con este análisis, se presenta en la Figura 5.2.

Figura 5.2: Mapa Análisis Peligro. Fuente: Atienza et al. (2010)



5.3. Índice de Daño Potencial

El daño potencial refiere al valor de los recursos bajo protección que se afectan con un incendio, pudiendo ser un daño comercial o directo, social y ambiental. Para este índice se seleccionaron variables tales como **los recursos productivos, la captura de carbono, el interfaz, la geomorfología, vegetación, agua y conservación.**

Atienza et al. (2010), considera la variable de recursos productivos, como los recursos naturales renovables y otros bienes tangibles, a los que es posible determinar su valor monetario. Los autores clasifican los modelos de combustile, información obtenida de CONAF y CONAMA (1999) y en conjunto a opiniones de expertos en la materia, se determina el daño directo a la producción, en $\frac{U\$\$}{ha}$, que se produce en el caso que se queme. Los puntajes se normalizan en función de éste valor monetario, entregando mayor peso a aquellos modelos de combustible que producen mayor daño directo a la producción. En la Tabla 5.12, es posible apreciar la asignación de puntaje.

Tabla 5.12: Clasificación y Puntaje de Modelos de Combustible. Recursos Productivos. Fuente: Atienza et al. (2010)

Modelo	Daño directo a la producción	Puntaje	Modelo	Daño directo a la producción	Puntaje
A1	135	3	F1	3908	100
A2	135	3	F2	2658	68
A3	135	3	F3	850	22
B1	233	6	F4	500	13
B2	192	5	G1	2248	58
B3	150	4	G2	1499	38
C1	274	7	H1	1500	38
C2	233	6	H2	817	21
C3	192	5	H3	500	13
C4	150	4	I1	1500	38
D1	274	7	I2	817	21
D2	233	6	J1	773	20
D3	192	5	J2	615	16
D4	150	4	J3	458	12
E1	274	7	J4	300	8
E2	233	6	K1	2658	68
E3	192	5	K2	2230	57
E4	150	4			

Con los datos entregados por la tabla 5.12, se puede conocer, por ejemplo, para el modelo de combustible A1, se produce un daño directo a la producción de 135 U$$ por hectárea quemada, y por tanto su puntaje normalizado es 3.

La captura de carbono se considera un elemento relevante ya que hoy es imprescindible mencionar el cambio climático como un efecto relevante dentro de este análisis. Una de las mayores incidencias en este cambio climático, son las emisión de gases invernaderos, lo que significa el aumento significativo de la concentración de dióxido de carbono, metano

y óxido nitroso debido a la actividad humana y la extracción de recursos naturales. Los bosques contribuyen a la mitigación de este fenómeno con su función en la fijación del carbono atmosférico y por eso su quema es perjudicial para el bienestar ambiental del planeta. Atienza et al. (2010) para esta variable y con la información proporcionada por CONAF y CONAMA (1999), considera la captura de carbono que se produce para tipo de recurso productivo, en particular Plantaciones Forestales Jóvenes, Plantaciones Forestales Adultas, Formaciones Forestales Nativas y Cultivos Agropecuarios. El trabajo de Atienza et al. (2010) asigna puntaje normalizado de manera tal que aquellos recursos que capturen más carbono a nivel aéreo, tengan mayor puntaje, como se muestra en la tabla 5.13.

Tabla 5.13: Puntajes Normalizados Captura de Carbono. Fuente: Atienza et al. (2010)

Recursos Productivos	Puntaje normalizado
Plantaciones Forestales Jóvenes	30
Plantaciones Forestales Adultas	20
Formaciones Forestales Nativas	10
Cultivos Agropecuarios	5

En la tabla 5.13 se demuestra como, por ejemplo, para las plantaciones forestales jóvenes, el puntaje normalizado es de 30.

Otra variable dentro de éste índice de daño potencial, es el interfaz, que busca medir el daño en las viviendas localizadas en la zona de interfaz urbano-rural que podría estar afectado por incendios. Se relaciona con el perímetro de contacto entre centros poblados y la vegetación susceptible de propagar fuego. Atienza et al. (2010) considera que mientras mayor sea el contacto, mayor es la exposición a ser afectado y por tanto mayor será el puntaje normalizado. Utilizó la información proporcionada por INE (2005), se estableció un rango de perímetro de los polígonos de centros poblados, y a partir de ésto la distancia entre el borde del polígono y los sectores susceptibles a iniciar incendios. A partir de ésta distancia se asignaron los puntajes normalizados tal como se indica en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Rangos de Contacto y Puntaje Normalizado de Área de Interfaz. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Perímetro de Contacto (m)	Puntaje Normalizado	Distancia desde borde de perímetro (m)
> 40.000	80	1500
35.000-40.000	70	1300
30.000-35.000	60	1100
25.000-30.000	50	900
20.000-25.000	40	700
15.000-20.000	30	500
10.000-15.000	20	300
5.000-10.000	10	100
<5.000	0	0

La Tabla 5.14 muestra como, por ejemplo, para un perímetro mayor a 40000 metros, existe una distancia desde el borde del perímetro a un sector susceptible a iniciar incendios de 1500 metros y por tanto el puntaje normalizado es de 80.

Para la variable de geomorfología, Atienza et al. (2010) utilizó la clasificación de Boergel (1983) que divide la región en 4 categorías:

- Planicies litorales o litoral central
- Cordillera de la costa
- Depresión intermedia
- Cordillera de los andes

Se asignaron puntajes de acuerdo a calificando el paisaje o belleza escénica desde la perspectiva estética, como se muestra en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15: Puntaje Normalizado para Geomorfología. Fuente: Atienza et al. (2010)

Forma del Terreno	Puntaje Normalizado
Cordillera de los Andes	20
Planicies Litorales	15
Cordillera de la Costa	10
Depresión Intermedia	5

La tabla 5.15 muestra como por ejemplo, la Cordillera de los Andes toma puntaje normalizado 20, a diferencia de la Depresión Intermedia, que toma valor 5.

La variable de vegetación se dividió en dos sub-variables: cobertura vegetacional y la diversidad visual que entrega la vegetación. Atienza et al. (2010) utiliza la información proporcionada por el trabajo de CONAF y CONAMA (1999) y en conjunto con expertos determinó los puntajes normalizados: considerando el tipo de cobertura vegetacional para la primera subvariable, expresado en la tabla 5.16 y según el tipo vegetacional para la subvariable de diversidad visual, expresado en la tabla 5.17.

Tabla 5.16: Puntaje Normalizado para Cobertura Vegetacional. Fuente: Atienza et al. (2010)

Tipo de Cobertura	Porcentaje de Cobertura	Puntaje Normalizado
Ninguna o Mínima	0-5	0
Rala	6-25	5
Media	26-50	10
Densa	51-100	15

Para un tipo de cobertura "ninguna o mínima", por tanto entre 0-5 % de cobertura, se asigna un puntaje 0.

Otra variable a considerar para la construcción de éste índice, es el agua. Atienza et al. (2010) realiza la puntuación con ayuda del estudio de CONAF y CONAMA (1999), con esto se asignó el puntaje normalizado según cuerpo acuático en el que se encuentra el cuadrante, tales como: Ríos, Embalses, Arroyos y Quebradas y, Lagos y Lagunas. La puntuación se puede ver en la Tabla 5.18.

Como se ve en la Tabla 5.18, si el cuadrante se encuentra en un río, entonces el puntaje

Tabla 5.17: Puntaje Normalizado para Diversidad Visual. Fuente: Atienza et al. (2010)

Tipo Vegetacional	Especificación	Puntaje normalizado
I-Praderas	anuales	5
	perennes	5
	estepa andina central	5
II-Matorrales praderas	semidenso	5
	abierto	5
	muy abierto	5
III-Matorral	denso	8
	semidenso	8
	abierto	5
	muy abierto	5
IV-Matorral arborescente	denso	8
	semidenso	8
	abierto	5
	muy abierto	5
V-Matorral suculentas	denso	8
	semidenso	8
	abierto	5
	muy abierto	5
VI-Plantaciones	plantación	10
	bosque exóticas asilvestrado	10
	Plantación Joven	8
	Plantación recién Cosechada	3
VII-Bosque nativo adulto	denso	15
	semidenso	15
VIII-Bosque nativo renoval	denso	10
	semidenso	10
	abierto	10
IX-Bosque nativo adulto renoval	denso	15
	semidenso	15
X-Bosque nativo achaparrado	denso	10
	semidenso	10
	abierto	10
	muy abierto	10
XI-Bosque nativo plantaciones	semidenso	10
	abierto	10
Cascos urbanos		3
Terrenos denudados		0

es 30.

Por último, a través de la variable de conservación, se busca valorar las áreas que

Tabla 5.18: Puntaje Normalizado para Agua. Fuente: Atienza et al. (2010)

Cuerpo Acuático	Puntaje Normalizado
Ríos	30
Arroyos y Quebradas	20
Embalses	10
Lagos y Lagunas	10

poseen especial riqueza natural (flora y fauna). Para esto se consideraron las áreas silvestres protegidas por el estado y por privados, presentes en la región (Parque Nacional, Reserva Nacional y Monumento Natural), las áreas protegidas complementarias (Santuario de la Naturaleza) y Sitios de Interés para la conservación de la biodiversidad. Atienza et al. (2010) normaliza el puntaje entregando mayor relevancia a aquellas categorías de conservación de mayor extensión y por tanto importancia. Entonces en la Tabla 5.19 se detallan los puntajes normalizados.

Tabla 5.19: Puntaje Normalizado para Conservación. Fuente: Atienza et al. (2010)

Categoría de Conservación	Puntaje Normalizado
Parque Nacional	60
Reserva Nacional	60
Santuario de la Naturaleza	30
Sitio de Interés	30

Con la tabla 5.19 podemos ver que a la categoría parque nacional se le asigna un puntaje 60, a diferencia de los sitios de interés que tiene puntaje 30.

Con todas estas variables, Atienza et al. (2010) construye el mapa de Daño Potencial. Tal como lo realiza con los índices anteriores, construye los rangos de puntaje totales y la priorización que se detallan en la tabla 5.20:

Tabla 5.20: Rangos de Puntajes Totales y Priorización. Análisis de Daño Potencial. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Puntaje	Total Porcentaje de Superficie (Has.)	Prioridad
70-280	14.6	ALTA
46-69	26.8	MEDIA
5-45	58.6	BAJA

En la tabla 5.20, se observa que para un rango de puntaje de 70-280, que significan el 14,6 % de los cuadrantes, se tiene una priorización alta.

El mapa que resume este análisis se presenta en la Figura 5.3.

5.4. Determinación Prioridad de Protección

Atienza et al. (2010) realiza la determinación de prioridades de protección, realizando una suma ponderada para cada cuadrante, de los puntajes asignados en los tres índices.

Con el mismo método utilizado en las otras clasificaciones (Riesgos, Peligro y Daño potencial), obtiene la siguiente clasificación que se expone en la Tabla 5.21.

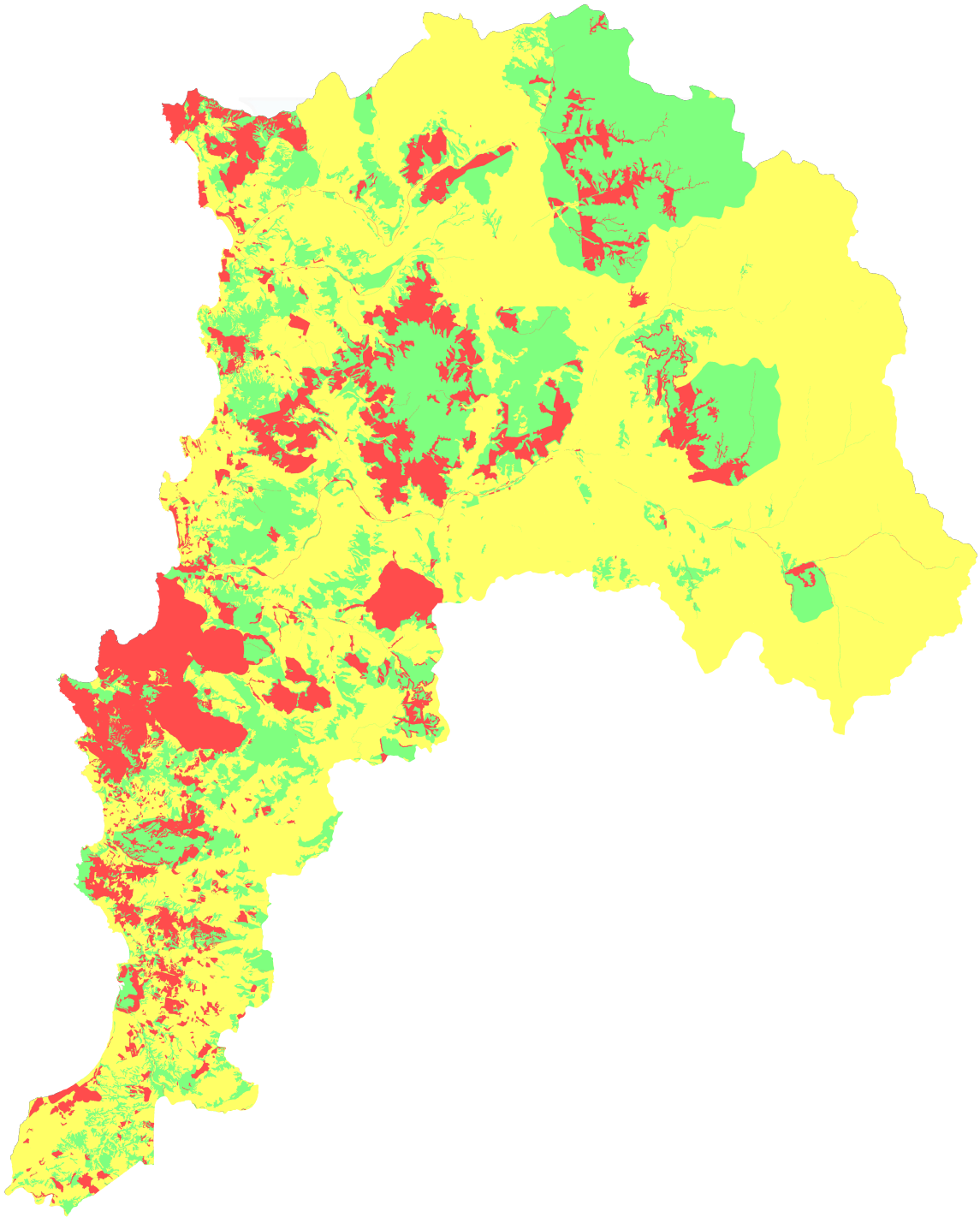
Tabla 5.21: Distribución según Categoría de Protección. Fuente: Atienza et al. (2010)

Rango de Puntaje Total	Superficie (Ha)*	Porcentaje	Categoría de Prioridad
230-770	208.060	13.0	ALTA
187-229	446.140	27.9	MEDIA
20-186	907.198	56.7	BAJA
Subtotal	1.561.398	97.6	
Otras Áreas	37.300	2.4	
Total Área de Estudio	1.598.698	100.0	

* No se consideran los cascos urbanos, cuerpos de agua y carreteras

En la tabla 5.21 se evidencia como los cuadrantes con puntaje entre 230-770, representan el 13 % del total y tienen una alta prioridad de protección. De igual manera los que están

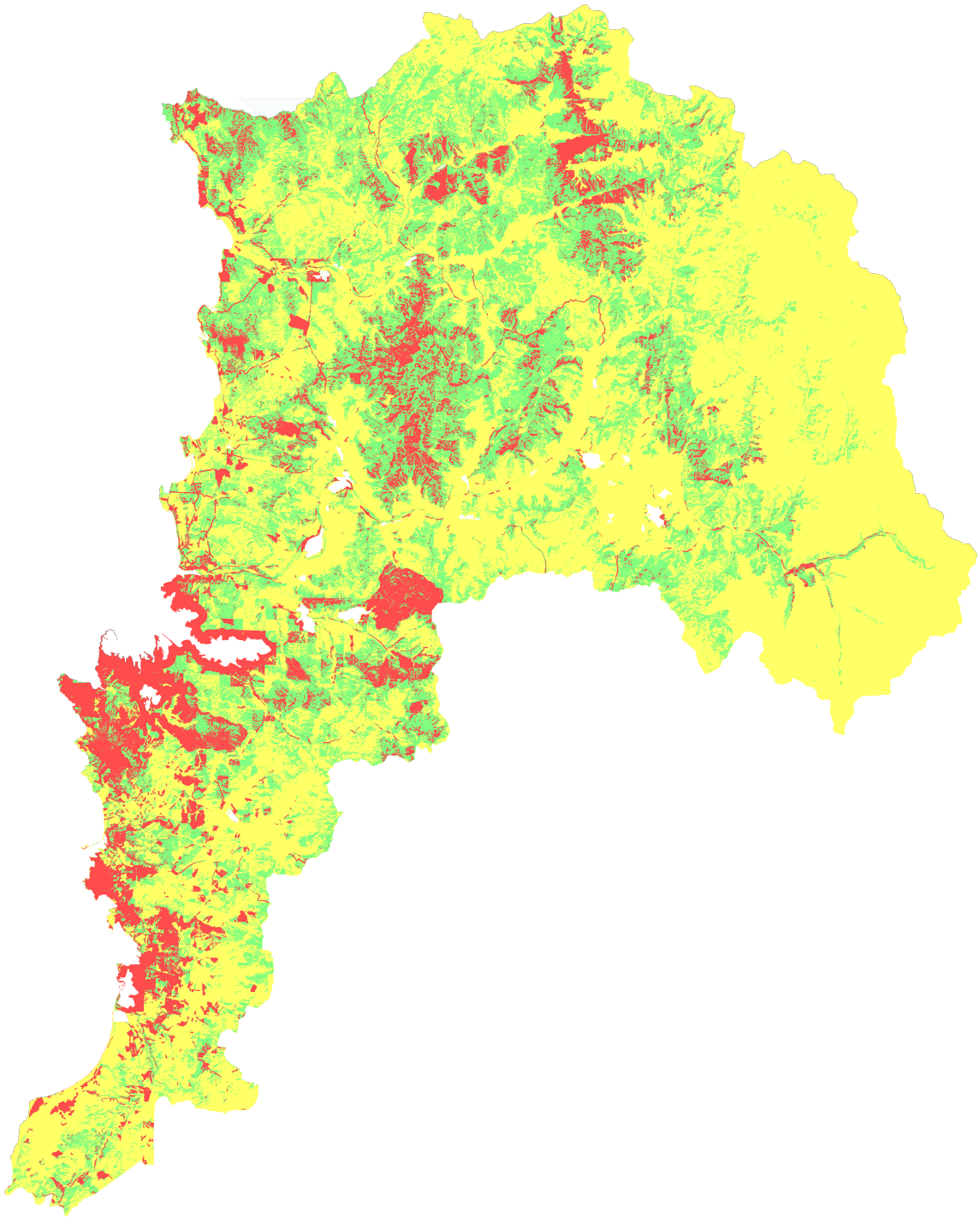
Figura 5.3: Mapa Análisis Daño Potencial. Fuente: Atienza et al. (2010)



en el rango 187-229, que son el 27,9 %, tienen una prioridad media. Y finalmente los que están en el rango de 20-186, representan el 56,7 % y tienen prioridad baja de protección.

El mapa de prioridades de protección nos entrega la distribución geográfica de los sectores que necesitan un mayor esfuerzo de protección y se detalla es la siguiente Figura 5.4

Figura 5.4: Mapa Prioridades de Protección. Fuente: Atienza et al. (2010)



6 | Generación de Parámetros

En este capítulo se describe como se obtienen los parámetros necesarios para implementar los modelos de cobertura que permitirán determinar la localización óptima de recursos para apagado de incendios forestales en la V región de Valparaíso.

Se dividió la región de Valparaíso en *nxm* cuadrantes y siguiendo la metodología de Díaz Romero (2011) se generaron nodos demanda. En esta metodología las zonas de alta prioridad, según el mapa de prioridad de protección descrita en el capítulo anterior, contienen un mayor proporción de nodos demanda y aquellos de baja contienen menos nodos. Por simplicidad, en este trabajo se considera que cada nodo demanda es también un nodo factible para asignar un recurso contra incendios y que sólo existe un tipo de recurso disponible para ser asignados, en particular brigadas, terrestres.

Dado que se considera las brigadas terrestres como único tipo de recurso a instalar, existe un tiempo máximo de viaje entre una instalación y una nodo de demanda, para que éste último sea contenido por el recurso. Por otro lado los tiempos de viaje entre instalación y nodo de demanda es calculado considerando distancia euclidiana y velocidad promedio de 30 $\left[\frac{km}{hr}\right]$.

Para hacer la asignación de prioridad tratable computacionalmente, se utilizaron dos refinamientos del mallado de Valparaíso, a saber, Refinamiento 1, un cuadrante de 6000$[m]x$6000$[m]$ y Refinamiento 2, un cuadrante de 3000$[m]x$3000$[m]$. A continuación se describe en forma detallada, como se obtuvieron estos parámetros.

6.1. Demanda y Posibles Instalaciones

Tal como se mencionó anteriormente, se busca asignar mayor cantidad de puntos de demanda a aquellas zonas donde existen mayor prioridad de protección y viceversa.

El mallado se trabajó asignando los puntos de demanda en los vértices. Si un vértice es de prioridad alta, entonces se asignó un punto de demanda a un cuadrante de distancia en el eje x (vale decir a $\pm 6000[m]$ o $\pm 3000[m]$) y en el eje y de dicho punto. Si es de prioridad media, entonces se asignó un punto de demanda a dos cuadrantes de dicho punto. Y a tres cuadrantes para vértices de baja prioridad. (Anexo C)

- Con un mallado con cuadrante de $6000[m]$, se obtuvo el conjunto I de demandas con 326 nodos, de los cuales 59 son de nivel ALTA, 87 de nivel MEDIA y 180 de BAJA.
- Con un mallado con cuadrante de $3000[m]$, se tiene 1398 nodos de demanda, de los cuales 225 son de nivel ALTA, 395 de nivel MEDIA y 778 de BAJA.

La representación gráficas de éstos nodos, es posible apreciarla en la imagen que se muestra a continuación. Para el caso de un cuadrante de $6000[m]$ en la Figura 6.1 y para un paso de un cuadrante de $3000[m]$ en la Figura 6.2. Dónde los puntos de color negros representan las demandas.

6.2. Recursos

Los recursos para apagado de incendios forestales pueden ser variados, tales como:

- Brigadas terrestres
- Camiones cisterna, con agua y con químicos
- Helicópteros, con agua y con químicos
- Aviones
- Tractores

Figura 6.1: Mapa Puntos de Demanda y Posibles Instalaciones (cuadrante de 6000[m])

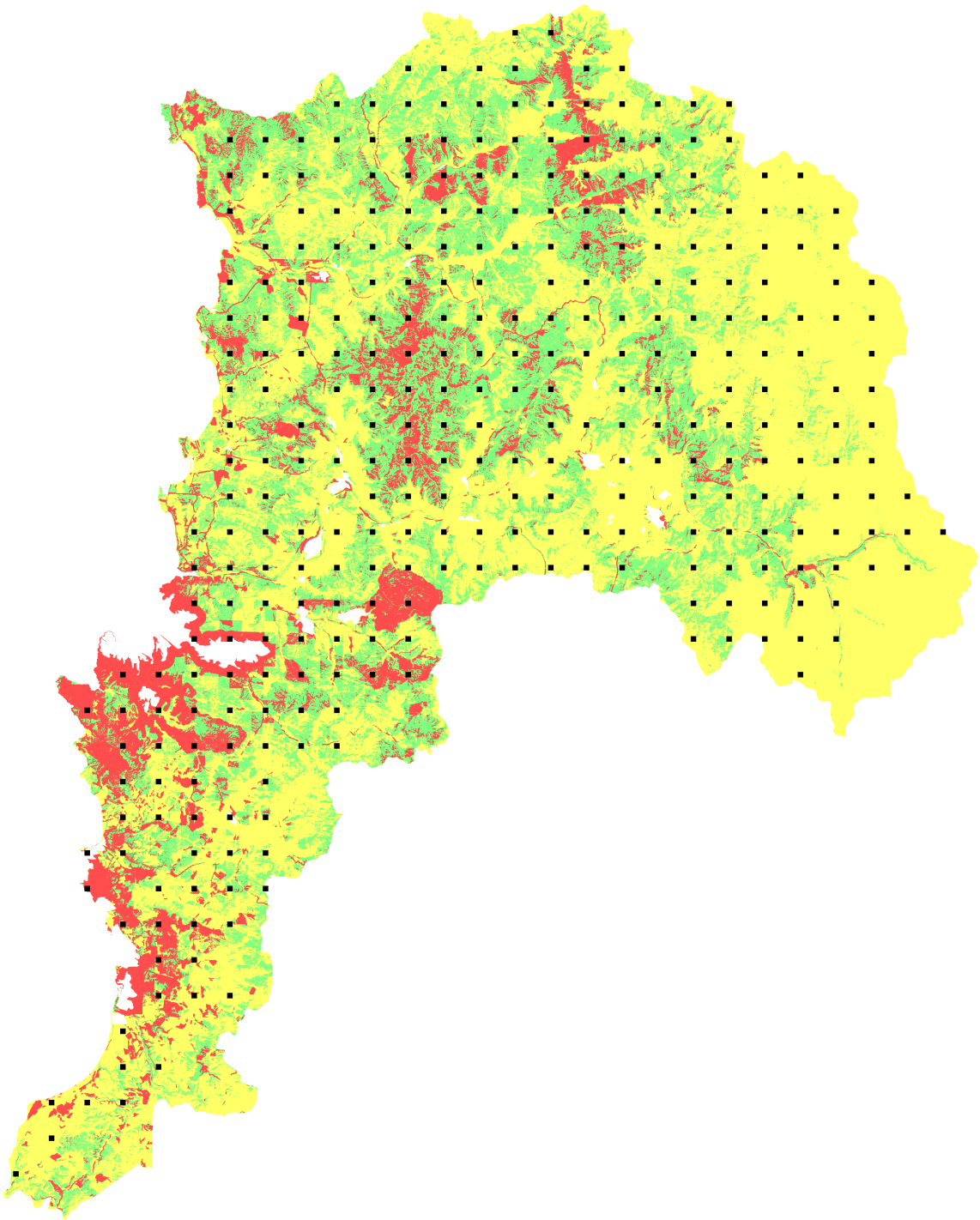
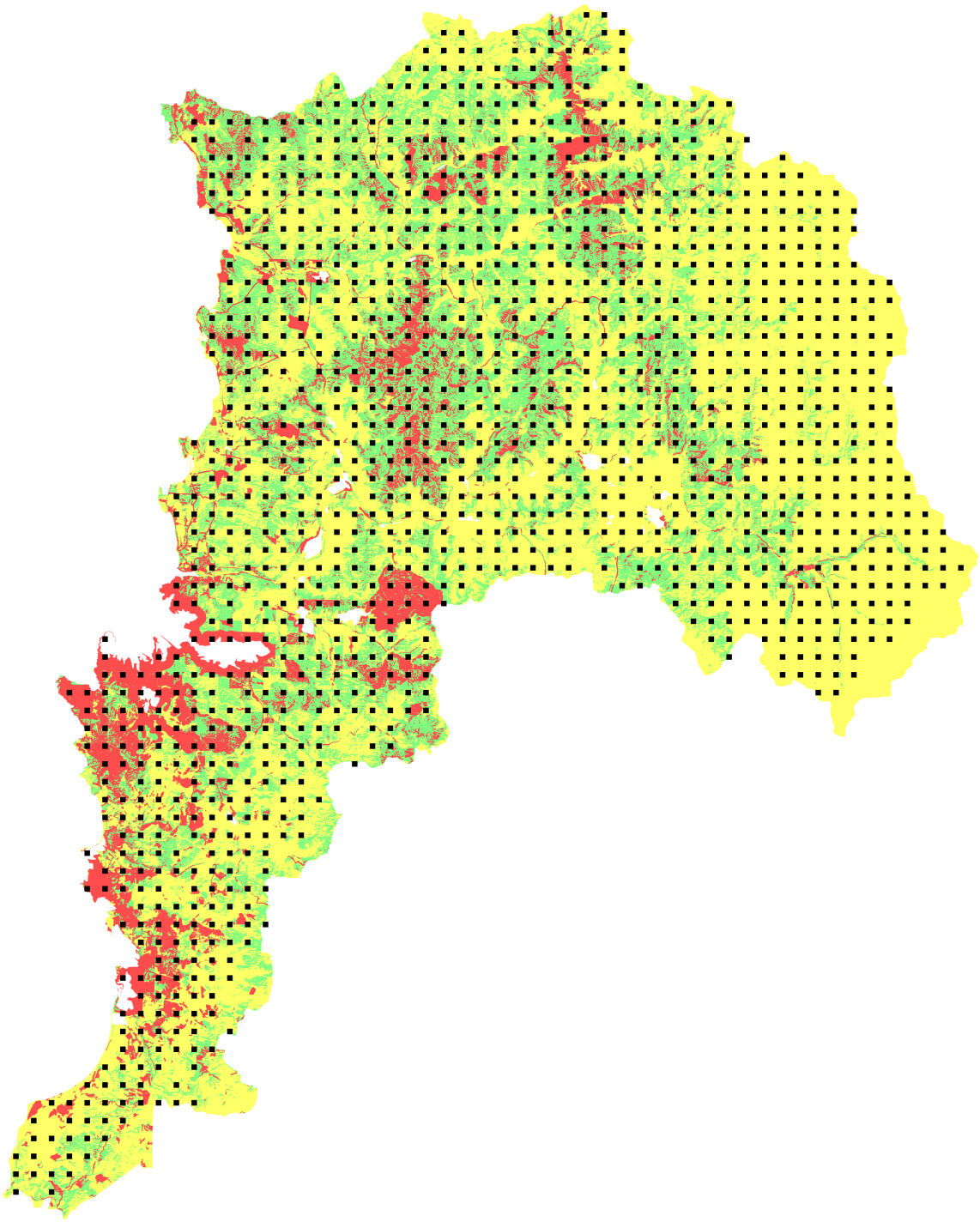


Figura 6.2: Mapa Puntos de Demanda y Posibles Instalaciones (cuadrante de 3000[m])



- Buldócer

Sin embargo, para este trabajo se considera sólo un tipo de recurso, siguiendo el trabajo de Pizarro y Atienza (2000) realizado previamente por CONAF, dónde se busca determinar de manera exploratoria, la cantidad y localización de brigadas terrestres de apagado de incendios para la Región de Valparaíso.

En el trabajo de Pizarro y Atienza (2000) se determinar que las unidades (recursos) relevantes a localizar son **las brigadas**, puesto operacionalmente son los únicos recursos que cada año tienen movilidad. Las brigadas de combate forestal son la unidad operativa básica, que normalmente está compuesta por 10 a 20 personas altamente capacitadas, con vestuario y equipamiento diseñado para el combate de incendios forestales y cuya tarea es construir las líneas de contención que impiden la propagación del fuego.

Con la información proporcionada por el estudio realizado por CONAF, se determina además que en la región de Valparaíso se tiene una restricción presupuestaria para la contratación de brigadas, pudiendo localizar 10 bases en toda la región.

6.3. Tiempos de Viaje y Tiempos Máximos

Para determinar la distancia del punto de demanda i al punto de posible instalación j se consideró una distancia euclidiana entre puntos de demanda (Anexo D). Además se consideró que, si bien la velocidad promedio de desplazamiento de los vehículos que transportan al personal de las unidades de combate se consideran distintas para cada zona (según tipo de camino y tráfico), para este trabajo se aproxima una velocidad promedio general de 30 $\left[\frac{km}{hr}\right]$, por simplicidad.

Finalmente, tenemos que el tiempo de viaje de i a j es igual a la distancia dividida la velocidad para cada (i, j),

$$\frac{d_{ij}}{30} = t_{ij} \qquad \forall (i, j)$$

Por otro lado, considerando que el único recurso a localizar son las brigadas terrestres, los tiempos máximos permisibles para cada punto de demanda, son los tiempos que dispone una brigada para llegar a éste, de tal forma que la superficie del incendio sea menor o igual

a la superficie máxima de ataque inicial a la cual se podrá enfrentar una unidad de combate, sin necesidad de pedir refuerzos. (Pizarro y Atienza, 2000)

Los tiempos límites se detallan a continuación en la Tabla 6.1:

Tabla 6.1: Tiempo máximo según nivel de prioridad. Fuente: Pizarro y Atienza (2000)

Nivel de prioridad	Tiempo máximo (min)
ALTA	25
MEDIA	50
BAJA	80

En la tabla 6.1, se puede apreciar, por ejemplo, que para una demanda con prioridad de protección alta, el tiempo máximo que tiene una brigada para llegar una vez iniciado el incendio, es de 25 minutos.

6.4. Prioridad de Protección

El LSCP trata a todos los nodos demanda en forma idéntica, da lo mismo servir a un nodo con prioridad de protección alta, que otro que tiene prioridad de protección baja. Ésta limitación del LSCP, es superada por el MCLP, al considerar el grado de protección que tiene cada nodo de demanda.

En esta etapa del trabajo la prioridad de protección asignada a un nodo de demanda es cualitativo y medido en alta, media y baja.

7 | Estudio Computacional

En este capítulo se presenta el estudio numérico y sus resultados. El objetivo principal del estudio computacional es determinar la localización óptima de bases de brigadas para el combate de incendios forestales en la región de Valparaíso y medir el desempeño en términos de tiempos computacionales de los modelos de cobertura utilizados en este trabajo.

Los problemas de cobertura fueron modelos resueltos con AMPL y solver CPLEX 12.4. La generación de los nodos demanda y la asignación de prioridad se realizó utilizando MATLAB R2013b, utilizando Image Processing Toolbox. Todos los experimentos computaciones fueron llevados a cabo en un PC con procesador Intel Core i5 con sistema operativo Windows10. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

7.1. MCLP

Al resolver el modelo de localización de máxima coberura se obtuvo que para el análisis realizado con un mallado de cuadrante de 6000[m] se tuvo un tiempo computacional de resolución de 0,046875 segundos y para un mallado de cuadrante de 3000[m] el tiempo fue de 0,984375 segundos.

El MCLP, se resolvió teniendo la restricción de instalar tan solo 10 bases para la región, información indicada por CONAF. La distribución geográfica de las bases se presenta en la Figura 7.1 y Figura 7.2, para un mallado de 6000[m]x6000[m] y de 3000[m]x3000[m] respectivamente. Los puntos de color azul representan las instalaciones y los negros las demandas.

Con la distribución geográfica de las instalaciones que arrojó el MCLP, se obtiene que para un mallado de 6000[m]x6000[m], se cubre un total de 308 puntos de demanda de

Figura 7.1: Mapa Instalaciones Óptimas MCLP (cuadrante de 6000[m])

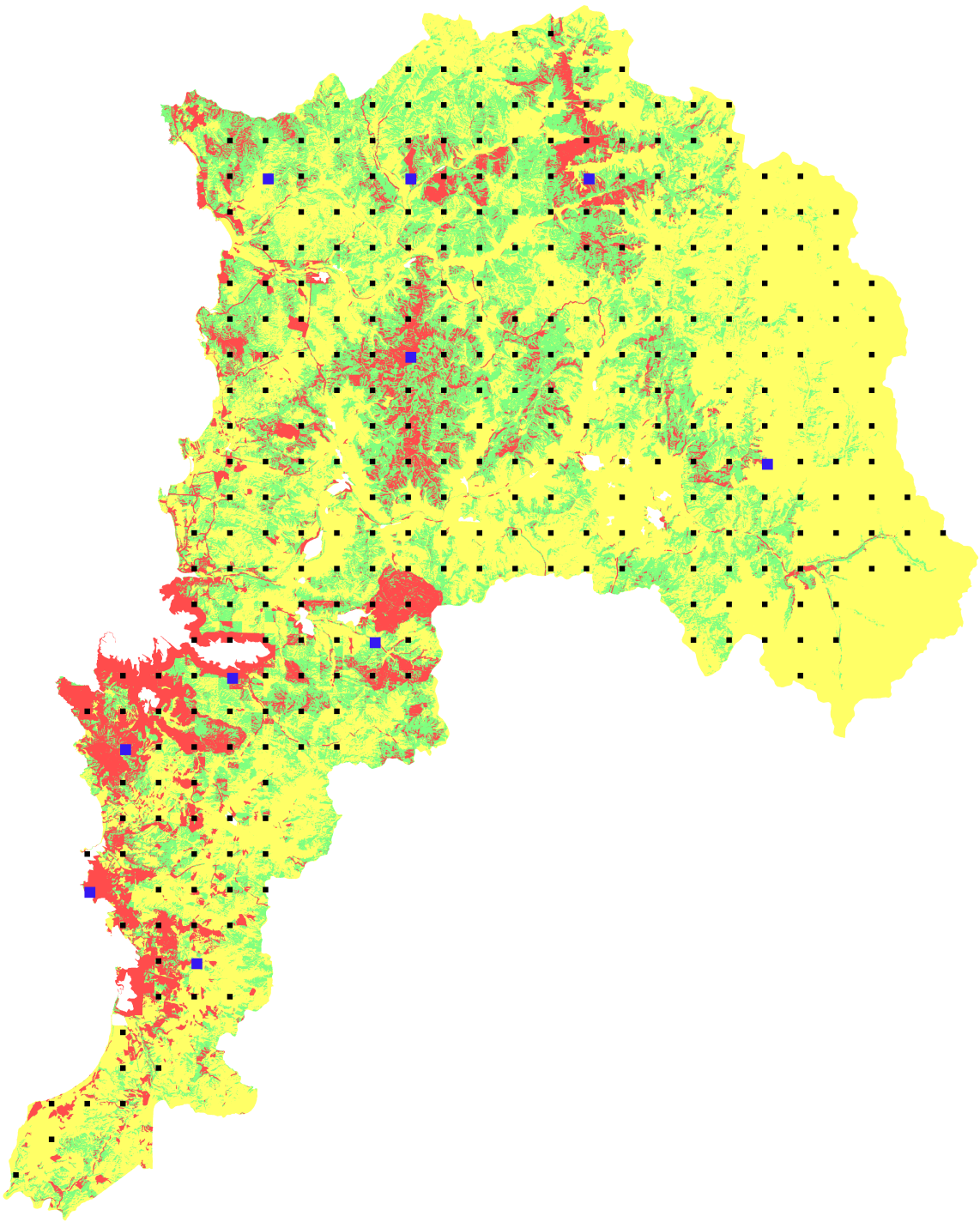
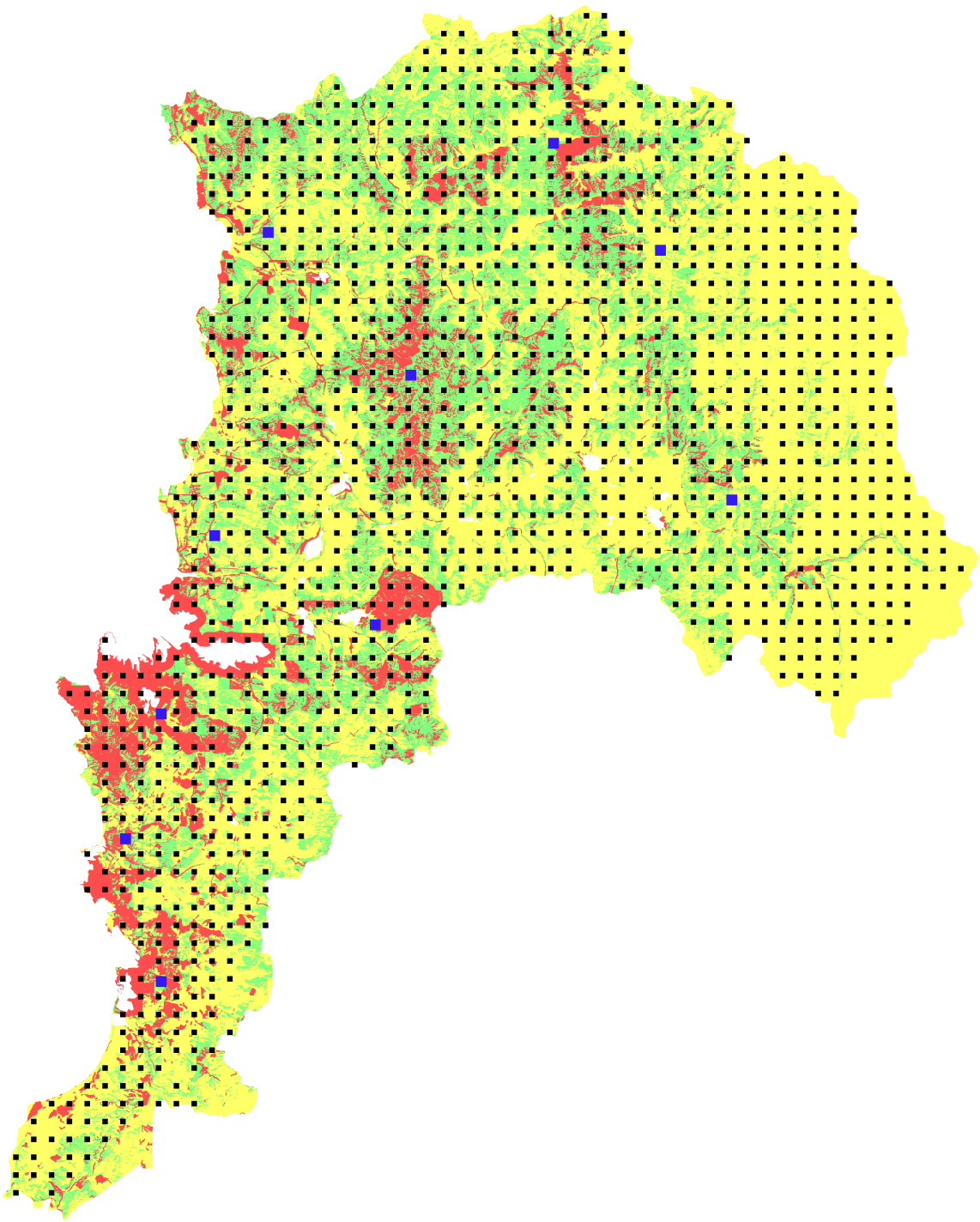


Figura 7.2: Mapa Instalaciones Óptimas MCLP (cuadrante de 3000[m])



326. De estos, 48 son de prioridad ALTA (un 81 % del total de este nivel), 81 de prioridad MEDIA (93 %) y 179 de prioridad BAJA (99 %).

Para el caso de para un mallado de 3000[m]x3000[m], se obtuvo que se cubren 1308 nodos de demanda de 1398. De estos, 159 son de prioridad ALTA (un 71 % del total de este nivel), 375 de prioridad MEDIA (95 %) y 179 de prioridad BAJA (99 %).

La distribución de las demandas cubiertas se presentan en las figuras 7.3 y 7.4. Dónde los puntos pequeños celestes son las demandas cubiertas, los azules las instalaciones (cuyas demandas también se consideran cubiertas) y los puntos de color negro son las demandas no cubiertas

Tal como se aprecia en las figuras 7.3 y 7.4, con los requerimientos de CONAF, no se cubre la totalidad de la demanda. Es posible realizar una sensibilización de la cantidad de nodos demanda cubiertos, en función de la cantidad de brigadas que se instalan. En las figuras 7.5 y 7.6, es posible evidenciar cómo al ir aumentando el número de instalaciones máximas disponibles, aumenta en número de nodos cubiertos, hasta llegar al total.

Figura 7.5: Sensibilización (cuadrante de 6000[m])

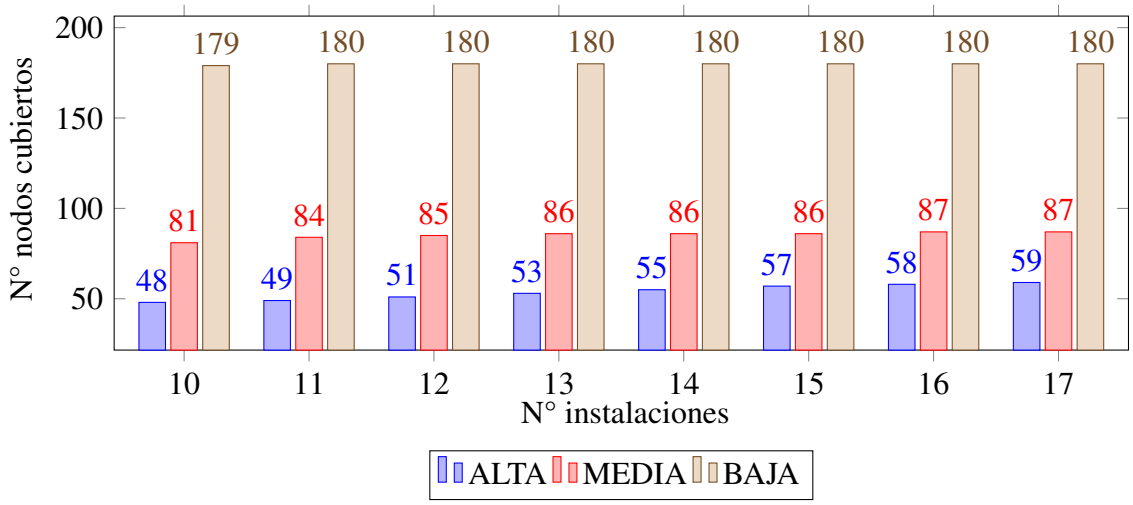


Figura 7.3: Mapa Demandas Cubiertas (cuadrante de 6000[m])

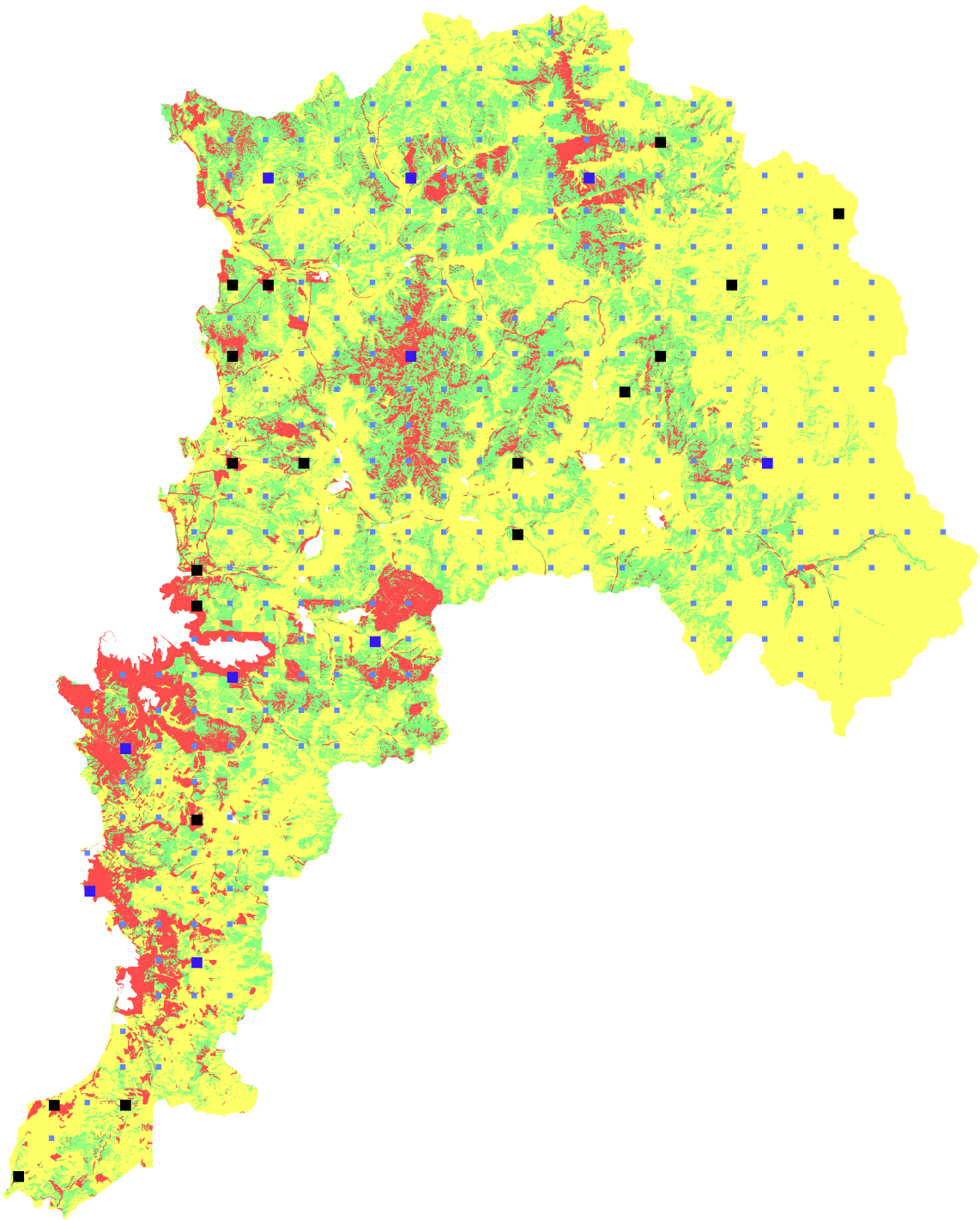


Figura 7.4: Mapa Demandas Cubiertas (cuadrante de 3000[m])

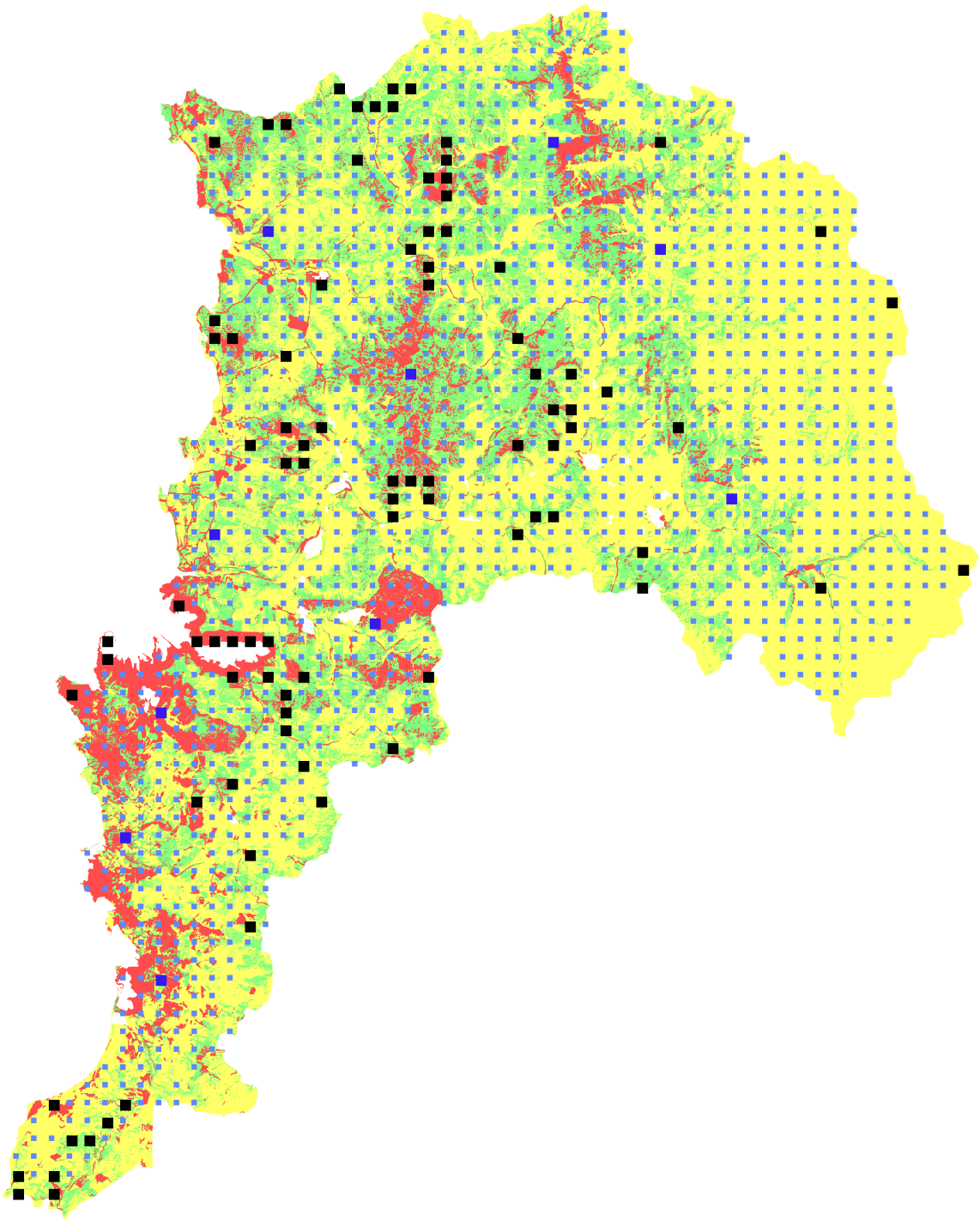
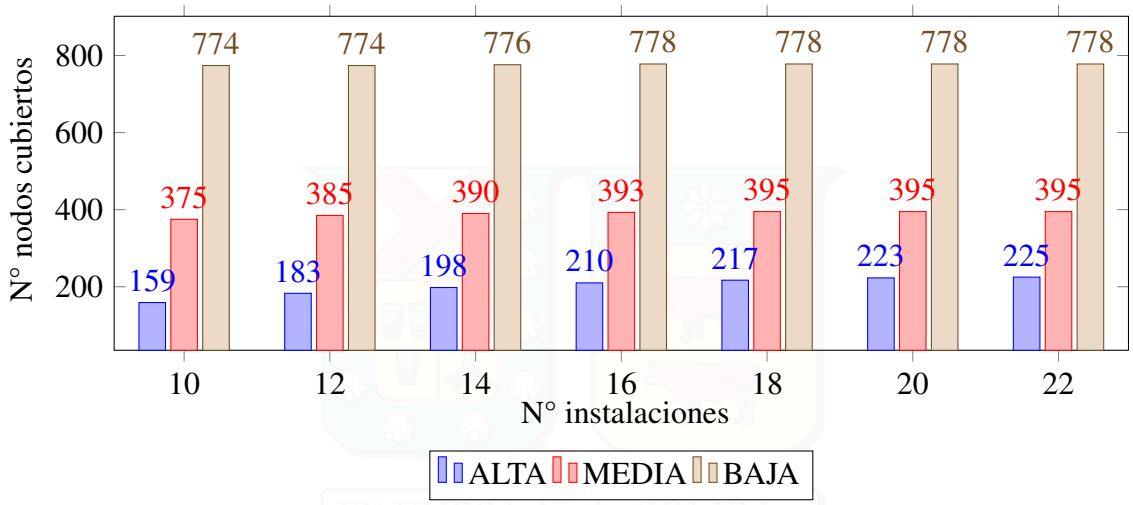


Figura 7.6: Sensibilización (cuadrante de 3000[m])



7.2. LSCP

El modelo localización de cobertura total, se aplica para encontrar la cantidad y distribución geográfica de las instalaciones óptimas de manera tal que se cubran todos los puntos de demanda, pues la cantidad de brigadas actualmente utilizadas por CONAF no dan a basto.

En este problema, el tiempo computacional para la resolución con para un mallado de 6000[m]x6000[m] fue de 0,03125 segundos. Para el análisis con un para un mallado de 3000[m]x3000[m], el tiempo fue de 0,25 segundos.

Los resultados obtenidos para para un mallado de 6000[m]x6000[m], es de 17 instalaciones para cubrir todos los puntos de demanda, para un mallado de 3000[m]x3000[m] 22 bases y su distribución se presenta en la Figura 7.7 en la Figura 7.8 respectivamente.

Figura 7.7: Mapa Instalaciones LSCP (cuadrante de 6000[m])

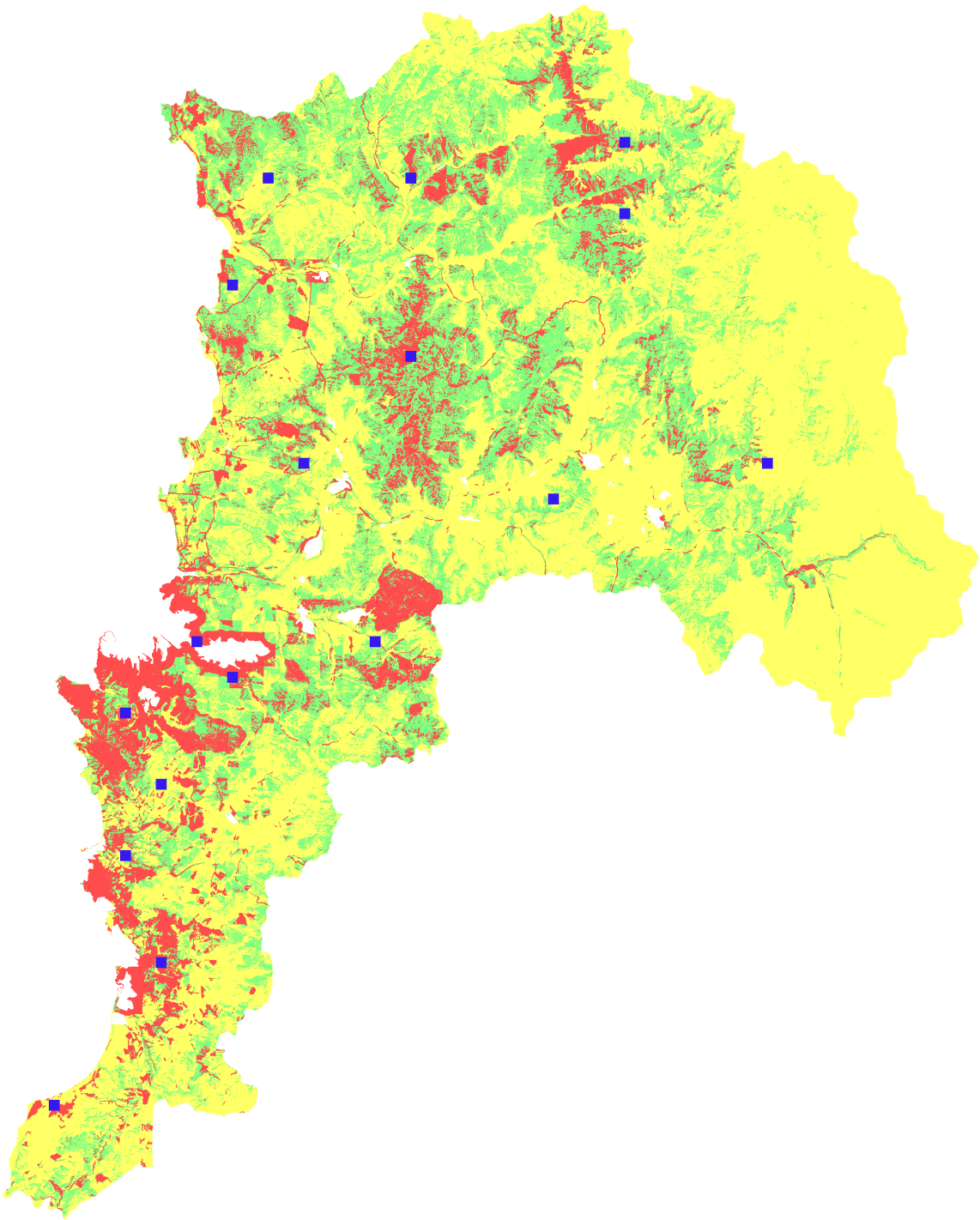
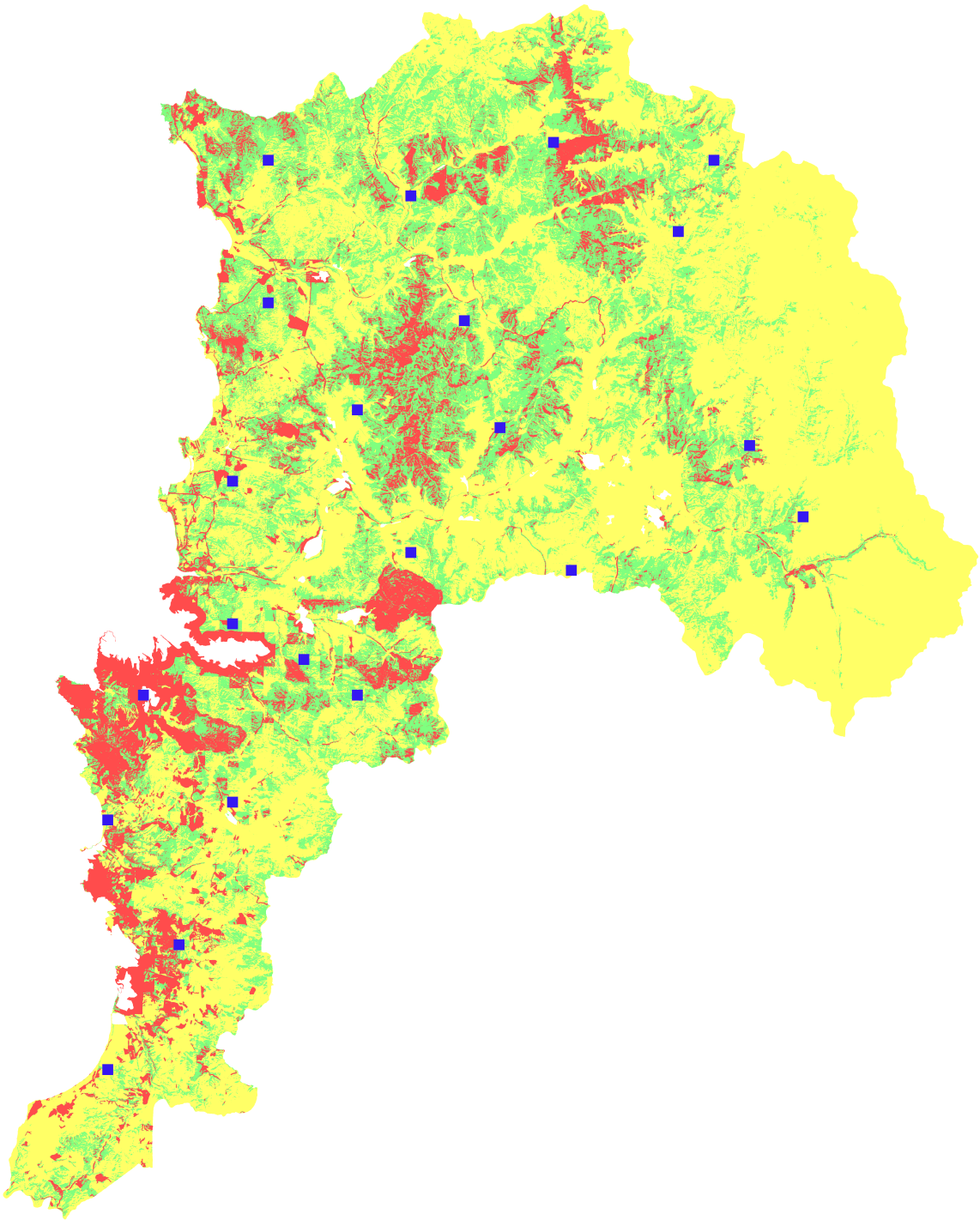


Figura 7.8: Mapa Instalaciones LSCP (cuadrante de 3000[m])



8 | Conclusiones

Este trabajo estudia la localización de bases de brigadas para emergencias forestales en la V región de Valparaíso. Ésta región tiene la mayor cantidad de incendios forestales a lo largo del país, acumulando un 15 % aproximadamente de los incendios a nivel nacional. Para determinar al localización óptima de las bases, se implementaron modelos de cobertura, en particular el MCLP con un numero máximo de instalaciones de 10 brigadas, por requerimiento de CONAF y el LSCP para determinar el número óptimo de brigadas que debiesen contratarse cada temporada para cubrir toda la demanda de protección. Los dos modelos de localización fueron formulados como un problema lineal entero (ILP) y resueltos con solver CPLEX.

Los resultados computacionales muestran que al localizar en forma óptima las 10 brigadas de CONAF, con un mallado de 6000[m]x6000[m] permiten cubrir el 94 % de las demandas de la región de Valparaíso, cubriendo el 81 % de alta prioridad de protección, el 93 % de media prioridad y el 99 % de baja. Con este mismo mallado, si CONAF dispusiera de 17 brigadas y estas se localizaran óptimamente, se podría cubrir el total de la demada. Con un mallado de 3000[m]x3000[m], instalando 10 brigadas se cubre también 94 % del total de demandas, que es un 71 % de alta prioridad de protección, el 95 % de media prioridad y el 99 % de baja. E instalando 22 brigadas se cubre la demanda en su totalidad.

Además en el desarrollo de este trabajo se evidenciaron los siguientes *highlight*:

- Al hacer el análisis de los incendios ocurridos en la región de Valparaíso, es posible evidenciar lo siguiente: La generación de incendios forestales tiene una evidente estacionalidad, el 89 % de las hectáreas quemadas se generan en los meses de enero, diciembre, febrero y marzo. Incluso en los meses de enero y diciembre se quema el 61 % de las hectáreas. Por otro lado el 83 % de las hectáreas se queman en incendios

iniciados en cercanías de senderos, caminos secundarios, caminos primarios y casas o refugios, lo que evidencia una tendencia a la generación de incendios en aquellos lugares con grandes afluencias humanas.

- Las demandas no son cubiertas en su totalidad al tener restringido el número de instalaciones a tal sólo 10 brigadas, por lo que se propone desarrollar un modelo LSCP, donde se obtiene el mínimo número de brigadas a instalar, 17 para un primero refinamiento y 22 para el segundo más fino, de tal manera que se cubra toda la demanda.

- Los modelos implementados en este trabajo no consideran la probabilidad de que los servidores estén disponibles para recurrir a una emergencia forestal. Si se considerara esta probabilidad, la cantidad de servidores necesarios para cubrir a la misma cantidad de nodos demanda, serían mayores.

Existe un número considerable de opciones y asuntos para trabajos futuros. El primero es implementar un modelo que considere la probabilidad de que exista al menos un servidor disponible para atender al nodo de demanda dentro de su radio de cobertura, como por ejemplo el PSCP (Probabilistic Location Set Covering Problem) o el MALP (Maximum Availability Location Problem). Otro asunto es considerar múltiples recursos, a pesar de que CONAF no los tenga disponible, explorando así la dotación óptima de recursos con la que debiese contar la región. Otra opción es considerar la dotación óptima de recursos necesario para apagar un incendio dependiendo de su magnitud y con esto evaluar cantidad y tipo de recursos a despachar para cada tipo de incendio. Y finalmente explorar la posibilidad de realizar una herramienta que logre adecuar la información geográfica en tiempo real para ser aplicada en algún modelo de localización de recursos móviles.

Bibliografía

Atienza, Juan.; Balladares, Patricio .; y Muñoz, Pedro. (2010). Determinación de Prioridades de Protección Contra Incendios Forestales en la Reg ión de Valparaíso. (document), 5, 5, 5.1, 5.1, 5.2, 5.1, 5.3, 5.1, 5.4, 5.1, 5.5, 5.1, 5.2, 5.2, 5.6, 5.2, 5.7, 5.8, 5.2, 5.9, 5.2, 5.10, 5.11, 5.2, 5.3, 5.12, 5.3, 5.13, 5.3, 5.14, 5.3, 5.15, 5.3, 5.16, 5.3, 5.17, 5.18, 5.3, 5.19, 5.3, 5.20, 5.4, 5.21, 5.3, 5.4

Belval, Erin J; Wei, Yu; y Bevers, Michael (2014). A mixed integer program to model spatial wildfire behavior and suppression placement decisions. *Canadian Journal of Forest Research*, 393(November 2014), 141124143656005. 3.4

Castillo, Miguel; Julio-Alvear, Guillermo; y Garfias, Roberto (2014). *Current Wildfire Risk Status and Forecast in Chile: Progress and Future Challenges*. Elsevier Inc. 3.3.1, 3.3.2

Castillo, Miguel Eduardo S.; Garfias, Roberto S.; Julio, Guillermo A.; y Gonzalez, Luis R. (2012). Nativa De Chile. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portuga*, 37(C), 796–804. 1, 3.3.2

Church, Richard L. y Revelle, Charles R. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science*, 32(1), 101–118. 4.1

CONAF y CONAMA (1999). Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. (pp.8̃9). 3.3.2, 5.2, 5.3, 5.3, 5.3, 5.3

Corporación Nacional Forestal (CONAF); Benedetto Acuña, Andres; y Ahumada Portalier, Juan Pablo (2011). Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales. 1, 3.2

Díaz Romero, Minerva A. (2011). *Un marco integrado para el control y gestión de incendios forestales*. PhD thesis. 3.2, 3.4, 4.1, 6

Dimopoulou, Maria y Giannikos, Ioannis (2001). Spatial optimization of resources deployment for forest- fire management. *International Transactions in Operational Research*, 8, 523–534. 3.4, 4.1

Dimopoulou, Maria y Giannikos, Ioannis (2004). Towards an integrated framework for forest fire control. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 476–486. 3.4

Donovan, Geoffrey H. y Rideout, Douglas B. (2003). An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment. *Forest Science*, 49(2), 331–335. 3.4

Drezner, Zvi; Schaible, Siegfried; y Simchi-levi, David (1990). Queueing-Location Problems on the Plane. 3.4

Hu, Xiaolin y Ntaimo, Lewis (2009). Integrated simulation and optimization for wildfire containment. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 19(4), 1–29. 3.4

INE (2005). Chile: Ciudades, pueblos, aldeas y caseríos. (pp. 300). 5.1, 5.3

Julio, Guillermo A.; Pedernera, P.; y Castillo, E. (1995). Diseño Funcional de Simulador de Incendios Forestales. *Actas Taller Internacional. Proyecto FONDEF FI-13. Santiago*, (pp. 182–204). 5.2, 5.2

Lee, Y; Fried, J S; Albers, H J; y Haight, R G (2013). Deploying initial attack resources for wildfire suppression: spatial coordination, budget constraints, and capacity constraints. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(1), 56–65. 3.4

Mendoza Armenta, Sanzon; Ríos Mercado, Roger Z.; y Díaz Romero, Minerva A. (2012). Optimizando el despliegue de recursos en la extinción de un incendio forestal. 3.4

Ntaimo, Lewis; Arrubla, Julián a. Gallego; Stripling, Curt; Young, Joshua; y Spencer, Thomas (2012). A stochastic programming standard response model for wildfire initial attack planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(6), 987–1001. 3.4

Pizarro, Ema y Atienza, Juan (2000). Determinación de la cantidad y localización de brigadas de combate de incendios forestales Valparaíso metropolitano. (pp. 108). (document), 6.2, 6.3, 6.1

Rodriguez-Trejo, Dante A. (2012). Génesis de los incendios forestales. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 357–373. 1

Santibañez, Fernando y M., Juan Manuel Uribe (1990). *Atlas agroclimático de Chile: regiones V y Metropolitana*. Fondo Nacional de Desarrollo Científico Y Tecnológico. 5.2

Toregas, Constantine; Swain, Ralph; Revelle, Charles; y Bergman, Lawrence (1971). The Location of Emergency Service Facilities. (September 2014). 4.2

Wang, Ding Wei y Zhang, Guo Xiang (2006). Model and algorithm for optimization of rescue center location of emergent catastrophe. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, 1(3), 265–268. 3.4

Wei, Y.; Bevers, Michael; Belval, Erin; y Bird, Benjamin (2015). A chance-constrained programming model to allocate wildfire initial attack resources for a fire season. *Forest Science*, 61(2), 278–288. 3.4

Yang, Lili; Jones, Bryan F.; y Yang, Shuang Hua (2007). A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 181(2), 903–915. 3.4

A | Modelo de combustible

Tabla A.1: Descripción modelo de combustible

Tipo Vegetacional	Especificación	Modelo
I-Praderas	anuales	A1
	perennes	A2
	estepa andina central	A3
II-Matorrales praderas	semidenso	B1
	abierto	B2
	muy abierto	B3
III-Matorral	denso	C1
	semidenso	C2
	abierto	C3
	muy abierto	C4
IV-Matorral arborescente	denso	D1
	semidenso	D2
	abierto	D3
	muy abierto	D4
V-Matorral suculentas	denso	E1
	semidenso	E2
	abierto	E3
	muy abierto	E4
VI-Plantaciones	plantación	F1
	bosque exóticas asilvestrado	F2
	Plantación Joven	F3
	Plantación recién Cosechada	F4
VII-Bosque nativo adulto	denso	G1
	semidenso	G2
VIII-Bosque nativo renoval	denso	H1
	semidenso	H2
	abierto	H3
IX-Bosque nativo adulto renoval	denso	I1
	semidenso	I2
X-Bosque nativo achaparrado	denso	J1
	semidenso	J2
	abierto	J3
	muy abierto	J4
XI-Bosque nativo plantaciones	semidenso	K1
	abierto	K2

B | Matriz TA

Para esta matriz (TA), se asignó valor 1 a los puntos de alta prioridad (según mapa de prioridades de protección), 2 para los de media y 3 para los de baja prioridad.

Se trabajó sobre la imagen del mapa de acuerdo al color de cada uno de sus pixeles (de $900m^2$, tal como se mencionó anteriormente).

Para la construcción de esta matriz, se utilizó el siguiente método (Algoritmo 1):

Algorithm 1 Creación matriz prioridades

Require: Mapa Prioridades de protección.

Ensure: TA: Matriz de clasificación de zonas mxn.

for $i = 0$ hasta m **do**
  for $j = 0$ hasta n **do**
    if $pixel(i, j) == ALTA$ **then**
      $TA(i, j) \leftarrow 1$
    else if $pixel(i, j) == MEDIA$ **then**
      $TA(i, j) \leftarrow 2$
    else if $pixel(i, j) == BAJA$ **then**
      $TA(i, j) \leftarrow 3$
    else
      $TA(i, j) \leftarrow -1$
    end if
  end for
end for
return TA

La imagen tiene 5766x7280 pixeles y para lograr trabajarla en tiempos computacionales aceptables, se trabajó en primera instancia sobre un pixel por cada 200, vale decir, considerando un punto por cada 6000m. Con este datos trabajados, se obtuvo una matriz TA de dimensión 37x29. Los tiempos computacionales para la construcción de esta matriz, trabajando con la herramienta MATLAB en un procesador Intel Core i5 con sistema operativo Windows10, fue de 2200,5 segundos.

En segunda instancia se trabajó sobre un pixel por cada 100, por tanto un punto por cada 3000m, lo que dio como resultado una matriz TA de dimensión 73x58 en tiempos computacionales de 8127,93 segundos.

C | Matriz PD

El método utilizado para la generación de la matriz PD de punto de demanda, se detalla a continuación (Algoritmo 2):

Algorithm 2 Generación de punto de demanda

Require: TA: Matriz de clasificación de zonas *mxn*

Ensure: PD: Matriz de puntos de demanda *mxn*.

for $i = 0$ hasta m **do**
  for $j = 0$ hasta n **do**
    if $TA(i, j) \neq -1$ **then**
      $PD(i, j) \leftarrow 1$
      if $TA(i, j) \in TA_{[mxn]}$ & $TA(i \pm TA(i, j), j) \neq 1$ **then**
        $PD(i \pm TA(i, j), j) \leftarrow -1$
      end if
      if $TA(i, j) \in TA_{[mxn]}$ & $TA(i, j \pm TA(i, j)) \neq 1$ **then**
        $PD(i, j \pm TA(i, j)) \leftarrow -1$
      end if
    end if
  end for
end for
return PD

D | Tiempo

Primero se calculó la distancia euclidiana entre los puntos utilizando el Algoritmo 3.

Como se puede observar, lo primero es generar una lista de *demandas*, que almacenará la posición del cada punto de demanda (x, y) considerando que cada pixel tiene dimensiones $30m$x$30m$ y que se toman cuadrantes (de 100 o 200 pixeles). Luego se calculará la distancia euclidiana (en línea recta) entre cada punto de demanda.

Algorithm 3 Generación de tiempos

Require: PD: Matriz de puntos de demanda *mxn*

Ensure: d_{ij}: matriz de distancia de i a j (lxl).

for $i = 0$ hasta m **do**
  for $j = 0$ hasta n **do**
    if $PD(i, j) = -1$ **then**
      $contador = contador + 1$
      $demanda(contador, 1) = i \cdot 30[m] \cdot paso$
      $demanda(contador, 2) = j \cdot 30[m] \cdot paso$
    end if
  end for
end for
for $i = 0$ hasta $contador$ **do**
  for $j = 0$ hasta $contador$ **do**
    $d_{ij} = \sqrt{(demanda(i, 1) - demanda(j, 1))^2 + (demanda(i, 2) - demanda(j, 2))^2}$
  end for
end for
return PD