



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ANÁLISIS DE  $CO_2EQ$  LIBERADO EN LOS INCENDIOS FORESTALES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

**FLORENCIA FRANCISCA CRISTENSEN ÁLVAREZ**

PROFESOR GUÍA:  
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

PROFESOR CO-GUÍA:  
JAIME CARRASCO BARRA

COMISIÓN:  
FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL Y GRADO DE MAGÍSTER EN  
GESTIÓN DE OPERACIONES  
POR: **FLORENCIA FRANCISCA CRISTENSEN ÁLVAREZ**  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: ANDRES WEINTRAUB POHORILLE

## ANÁLISIS DE $CO_2EQ$ LIBERADO EN LOS INCENDIOS FORESTALES

Hoy en día debido al cambio climático se espera que los incendios forestales sean cada vez más frecuentes y tengan una mayor severidad sobre el paisaje forestal (Canadell et al., 2021), es por esto que el manejo de incendios a través del tratamiento de combustible juega un rol clave, debido a que este tiene como objetivo reducir la severidad de los incendios forestales y la tasa de propagación (ROS), disminuir la intensidad del fuego y la longitud de las llamas, y hacer que el control sea más fácil y menos costoso (Ager, Vaillant, y Finney, 2010). Es en este contexto que, como objetivo de esta Tesis, se busca obtener una estimación de las emisiones de los incendios forestales a través de la simulación, integrando el cálculo de gases de efecto invernadero en el simulador Cell2Fire. Luego de esto se creará una heurística para la localización de cortafuegos, con el fin de disminuir las emisiones de  $CO_2eq$  a través de la gestión forestal.

Para el cálculo de las emisiones se utilizó como base lo establecido por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), institución que entrega un manual con métodos reconocidos a nivel mundial para el cálculo de las emisiones, entre otras cosas. Estos métodos difieren según uso de suelo y niveles de información que se tengan del país para el cual se quiera calcular las emisiones. Los niveles que establece el IPCC son tres, los cuales van del menor nivel de detalle al mayor nivel de detalle, en relación con la información específica de la vegetación del lugar. Para el simulador se utilizó una adaptación de la fórmula genérica del nivel 1 del IPCC para el cálculo de  $CO_2$  y otros gases de efecto invernadero. Para validar este cálculo, se compararon las emisiones de  $CO_2eq$  generadas al simular incendios forestales utilizando la fórmula genérica del IPCC para el nivel 1, sin modificaciones y las emisiones de  $CO_2eq$  obtenidas al utilizar la ecuación modificada que se incorporó en Cell2Fire, llegando a que hay diferencias debido al porcentaje de biomasa consumida que consideran ambos métodos, dado que Cell2Fire tiene algoritmos sofisticados que permiten ver cuánto se consumió de combustible en cada una de las celdas del bosque y el tipo de incendio.

Por otro lado, para la localización de cortafuegos, se utiliza una heurística basada en la maximización de la resta entre el  $CO_2eq$  generado aguas abajo al encenderse una determinada celda del paisaje forestal y el  $CO_2eq$  que posee esa celda en particular. Este modelo entrega como resultado, las celdas donde se deberían localizar los cortafuegos, según el porcentaje de tratamiento que se quiera aplicar. Se estudio la eficiencia de esta heurística en dos escenarios distintos para distintos niveles de tratamiento (1 %, 3 %, 5 %, 7 % y 10 % del paisaje forestal), obteniendo como resultados preliminares que para estos dos escenarios de estudio en específico, donde uno correspondía a un paisaje forestal heterogéneo y otro homogéneo, el nivel de tratamiento más efectivo para los casos estudiados fue de 3 % y 5 %, respectivamente.

*Para mi familia y amigos, quienes siempre estuvieron conmigo.*

# Agradecimientos

Quisiera agradecer a quienes estuvieron conmigo a lo largo de este proceso. Primero a mi familia, quienes siempre han sido un pilar fundamental a lo largo de mi carrera.

A los Bachis, siempre han sido mi grupo incondicional en la universidad, compartimos muchos momentos juntos desde bachi hasta Beauchef y siempre han sido un grupo con el cual me he podido sentir a gusto. Mención especial a Sebastián López, Isidora González, María Jose Martínez, Nicolás Villa, José Canto, Diego Pinto, Juan José Gutiérrez y Diego Castañeda.

A Los amigos que hice ya en industrias, la Marcela Aguirre y la Marya Fuentes, quienes fueron mis amigas con las que más compartía en industrias, sé que no habría sido lo mismo sin ustedes. También a mis amigos de Taller II, fue lo mejor ser con ustedes en grupo y de ahí poder acércanos y compartir tantos buenos momentos. A mi amiguita de la tripleta, la Camila Hidalgo, pese a que solo disfrutamos un semestre de convivir no-online, no perdimos el contacto. Por último, al Shebin, quien fue mi amigo de baile y industrias.

Para mis amiguitos del MGO, Magdalena Badal, Felipe Hernández y Joaquín Siebert. Increíblemente con ustedes me acerque más en pandemia, pero me encanto haberlos conocido, fueron un apoyo fundamental en la Tesis, me ayudaron hasta contestándome dudas de programación.

Finalmente, a mi profesor de Tesis Andrés Weintraub, a mi profesor co-guía Jaime Carrasco y a Jorge Hoyos, por orientarme con este tema de Tesis y siempre tener buena disposición para esto.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	3
1.1.1. Objetivo general . . . . .	3
1.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Metodología . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Tipos de Incendios . . . . .	4
2.2. Sistema de fuego canadiense . . . . .	4
2.2.1. Fire Behavior Prediction (FBP) System . . . . .	5
2.2.2. Combustible Consumido . . . . .	6
2.2.3. Taza de esparcimiento e intensidad del fuego . . . . .	8
2.3. Cell2Fire . . . . .	9
2.3.1. Las Celdas . . . . .	9
2.3.2. Datos requeridos para hacer la simulación . . . . .	11
2.3.3. Principales datos entregados por la simulación . . . . .	11
2.3.4. Propagación del incendio en el simulador . . . . .	12
2.4. Emisiones de Carbono . . . . .	13
2.4.1. Calentamiento Global . . . . .	13
2.5. Gestión del Carbono . . . . .	14
2.5.1. Gestión de carbono y que herramientas existen / Estado del Arte . . . . .	15
2.5.2. Cálculo de Carbono emitido en los incendios forestales . . . . .	17
2.5.3. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC): Cálculo de emisiones en los incendios forestales . . . . .	17
2.6. Downstream Protection Value . . . . .	19
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
3.1. Estimación de las emisiones de carbono en Cell2Fire . . . . .	21
3.1.1. Área de estudio . . . . .	23
3.1.2. Caracterización de los experimentos . . . . .	24
3.1.2.1. Cálculo de las emisiones con la fórmula del IPCC para las distintas simulaciones . . . . .	24
3.2. Protección de carbono a través del diseño de paisaje . . . . .	25
3.2.1. Heurística de selección de cortafuegos . . . . .	26

<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>28</b>
4.1. Resultados obtenidos en las simulaciones . . . . .	28
4.1.1. Experimento 1: . . . . .	28
4.1.2. Experimento 2: . . . . .	31
4.2. Evaluando el carbono liberado en las simulaciones . . . . .	34
4.2.1. Comparando Emisiones Obtenidas por Cell2Fire con las del IPCC . .	34
4.3. Localización de cortafuegos con el objetivo de disminuir el carbono emitido .	37
4.3.1. Testeando la efectividad de los Cortafuegos . . . . .	38
4.3.2. Alcances . . . . .	40
<b>5. Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>42</b>
<b>Anexo A.</b>	<b>44</b>
A.1. Marco teórico . . . . .	44
A.2. Resultados . . . . .	44
A.2.1. Simulaciones . . . . .	45
A.2.2. Cálculos realizados Biomasa disponible . . . . .	47

# Índice de Tablas

2.I.	FBP System tipos de combustible . . . . .	6
2.II.	$G_{ef}$ para cada gas y tipo de vegetación . . . . .	19
3.I.	$G_{ef}$ para cada gas y tipo de vegetación . . . . .	22
3.II.	GWP horizonte de 100 años . . . . .	22
3.III.	Biomasa disponible para la combustión según tipo de combustible . . . . .	25
4.I.	Experimento 1: Simulación 1 . . . . .	29
4.II.	Experimento 1: Simulación 2 . . . . .	30
4.III.	Experimento 1: Simulación 3 . . . . .	30
4.IV.	Experimento 1: Comparación de $CO_2eq$ entre las simulaciones . . . . .	30
4.V.	Experimento 2: Comparación de $CO_2eq$ entre las simulaciones . . . . .	32
4.VI.	Experimento 2: Simulación 1 . . . . .	32
4.VII.	Experimento 2: Simulación 2 . . . . .	33
4.VIII.	Experimento 2: Simulación 8 . . . . .	33
4.IX.	Experimento 2: Simulación 9 . . . . .	33
4.X.	Tabla resumen de emisiones obtenidas con la fórmula del IPCC para los porcentajes de biomasa consumida más similares a lo obtenido con el simulador . . . . .	35
4.XI.	Tabla resumen de emisiones obtenidas con la fórmula del IPCC para los porcentajes de biomasa consumida más similares a lo obtenido con el simulador . . . . .	36
A.1.	Experimento 2: Simulación 3 . . . . .	45
A.2.	Experimento 2: Simulación 4 . . . . .	45
A.3.	Experimento 2: Simulación 5 . . . . .	45
A.4.	Experimento 2: Simulación 6 . . . . .	46
A.5.	Experimento 2: Simulación 7 . . . . .	46
A.6.	Experimento 2: Simulación 10 . . . . .	46

# Índice de Ilustraciones

2.i.	Celdas Adyacentes Fuente: Carrasco, J. (2019). <i>Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty</i> . . . . .	10
2.ii.	Flujo Cell2Fire . . . . .	13
2.iii.	Grafo del bosque adyacente Fuente: Carrasco, J. (2019). <i>Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty</i> . . . . .	19
2.iv.	Propagation Tree $\mathcal{T}_i = (\mathcal{N}_i, \mathcal{E}_i)$ . . . . .	20
3.i.	Flujo del simulador para el cálculo de emisiones . . . . .	23
3.ii.	Paisajes forestales para los casos de estudio . . . . .	24
4.i.	Cicatriz de incendio Simulación 1 . . . . .	28
4.ii.	Cicatriz de incendio Simulación 2 . . . . .	29
4.iii.	Cicatriz de incendio Simulación 3 . . . . .	29
4.iv.	$CO_2eq$ a medida que avanza el incendio . . . . .	31
4.v.	Resultados de Cell2Fire vs IPCC . . . . .	35
4.vi.	Resultados de Cell2Fire vs IPCC para el 70 % de la biomasa consumida . . . . .	36
4.vii.	Solución de la localización de cortafuegos para el caso heterogéneo . . . . .	37
4.viii.	Solución de la localización de cortafuegos para el caso heterogéneo . . . . .	37
4.ix.	$CO_2eq$ promedio neto, para los distintos porcentajes de cortafuegos . . . . .	38
4.x.	$CO_2eq$ promedio neto, para los distintos porcentajes de cortafuegos . . . . .	38
A.1.	Valores para calcular el ROS para cada tipo de combustible . . . . .	44
A.2.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C1 . . . . .	47
A.3.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C2, M3, M4 . . . . .	47
A.4.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C3,C4 . . . . .	48
A.5.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C5, C6 . . . . .	48
A.6.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C7 . . . . .	49
A.7.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo D1 . . . . .	49
A.8.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo D2 . . . . .	50
A.9.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S1 . . . . .	50
A.10.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S2 . . . . .	51
A.11.	Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S3 . . . . .	51



# Capítulo 1

## Introducción

Se ha presentado evidencia de que si el cambio climático aumenta la temperatura por sobre los 1.5 °C habría cambios irreversibles en el planeta, lo cual traería costos sociales y económicos para los seres humanos alrededor del mundo. Para evitar esto el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) requiere que el mundo disminuya sus emisiones de  $CO_2eq$ , el cual se entiende como la suma ponderada de los gases de efecto invernadero llevado a  $CO_2$  por medio del “Global Warming Potential” y con esta disminución se logre llegar al carbono neutralidad para el año 2050.

En esta línea, un gran desafío que se tiene es la disminución de los mega incendios forestales, los cuales contribuyen en gran número a las emisiones de  $CO_2$ . Por ejemplo, en Chile el mega incendio que ocurrió en el verano del año 2017 emitió 100 millones de toneladas de  $CO_2$ , lo cual equivale al 90% del total de emisiones de  $CO_2$  del año 2016. Estos mega incendios forestales son cada vez más frecuentes y extensos respecto al área quemada, dada la actividad humana, los cambios en los usos de suelo y el cambio climático (Gonzalez et al., 2020). Según predicciones climáticas, estos mega incendios deberían ser cada vez más frecuentes, por lo que se debería tener un enfoque de prevención, junto con promover paisajes más resilientes y resistentes a los incendios, de lo contrario será muy difícil llegar a la carbono neutralidad al 2050.

La gestión forestal, podría disminuir el riesgo que existe de los incendios a través de métodos como la reducción de combustible o la localización estratégica de cortafuegos. (Anderegg et al., 2020). Gracias a la tecnología existen distintos modelos de predicción de incendios los cuales ayudan a la gestión forestal a través de la predicción de las zonas más propensas a incendios forestales, esta información les permite a los encargados de la gestión, tomar acciones que contribuyan a disminuir el impacto que tendrían estos. Sin embargo, estos modelos espaciales no han incorporado las emisiones dentro de sus simulaciones.

En esta Tesis se implementará la predicción de las emisiones directas que causarían los incendios simulados por Cell2Fire, un simulador espacial de incendios de base abierta programado en C++ y Python. Además, se planteó un modelo de optimización para localizar cortafuegos de manera tal que se logre disminuir las emisiones directas de  $CO_2eq$ , este modelo se evaluó para dos escenarios uno que correspondía a un bosque homogéneo y otro uno heterogéneo dando como resultado un porcentaje de tratamiento óptimo diferente para cada escenario.

Se espera que esta información contribuya con la que tienen los tomadores de decisiones en la gestión forestal y que a su vez contribuya a objetivos ligados a la disminución de carbono liberado en los incendios.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

Obtener una estimación de las emisiones de carbono en la simulación de incendios forestales. Para después generar una heurística que permita hacer gestión forestal al entregar la localización más óptima de cortafuego, que permita disminuir el  $CO_2eq$ .

## 1.2. Objetivos específicos

1. Analizar cómo integrar en el simulador Cell2Fire las emisiones de carbono en función de la intensidad de un incendio simulado, a través de una expresión que agregue este factor de liberación de carbono a medida que la celda se quema.
2. Simular la liberación de  $CO_2eq$  a través del simulador Cell2Fire.
3. Generar una heurística para localizar cortafuegos que contribuya a la disminución esperada de  $CO_2eq$  por efecto de los incendios futuros.

## 1.3. Metodología

1. Revisión de bibliografía: Esta fase inicial se enfoca en la revisión bibliográfica en torno al cálculo de  $CO_2$  para los incendios forestales. En específico se ve el fuel management o gestión de combustible forestal, en relación con el carbono, cuánto carbono se libera y también la parte bioquímica del cálculo de  $CO_2$ .
2. Encontrar relación de la quema de combustibles y la liberación de los gases de efecto invernadero de manera tal de encontrar una ecuación para obtener estas emisiones en los incendios.
3. Trabajar con el simulador Cell2Fire con la información correspondiente a los bosques de Canadá implementando esta fórmula en el simulador y así obtener un estimado de las emisiones de  $CO_2eq$  como resultado de las simulaciones.
4. Análisis de resultados: Evaluar las emisiones obtenidas para ver si se encuentran dentro de los rangos de emisión esperados y analizar si existen relaciones entre las emisiones obtenidas.
5. Diseñar un modelo de optimización que disminuya las emisiones liberadas y testear su solución.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Tipos de Incendios

Un incendio forestal, corresponde a un fuego que se propaga sin control por una superficie rural a través de la vegetación existente y genera algún tipo de peligro para el ambiente. Hay tres tipos de incendios que dependen de cómo se propaga fuego en la vegetación:

**Incendio de suelo:** Este tipo de incendios se caracteriza por mantener una combustión incandescente e humeante, la cual consume la capa que se encuentra por debajo de la superficie de las hojas recién caídas y los suelos orgánicos profundos. (Reardon, 2019).

**Incendio superficial:** Se caracteriza por propagarse a través de llamas, este incendio consume las ramas caídas, hojas y otro tipo de combustibles que se encuentren en el suelo. (Heward, 2019).

**Incendio de copa:** Se define como un incendio que ha ascendido del suelo a la copa de los árboles y se está expandiendo a través de esta. Este tipo de incendios tiene una intensidad e impacto ecológico mayor al de los incendios mencionados anteriormente. (Xanthopoulos y Athanasiou, 2020).

### 2.2. Sistema de fuego canadiense

Canadá es uno de los países más avanzados respecto a los estudios que giran en torno a la gestión del fuego, por lo que cuentan con distintos sistemas y modelos. Dentro de los sistemas canadienses tenemos el “Fire Weather Index”(FWI), este es un sistema que ve el comportamiento del fuego a través de los efectos que tiene la humedad del combustible y las condiciones climáticas sobre este (*Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) Systeml*, s.f.)

Su estructura consiste en las observaciones diarias de la temperatura, humedad relativa, precipitaciones y velocidad del viento, las cuales son utilizadas para evaluar la humedad del suelo y otras materias orgánicas que se encuentra en él. Esta humedad existente en la superficie del bosque y se divide en tres categorías, cada una con su respectivo código:

- Fine Fuel Moisture Code (FFMC): Este código indica que tan fácil se quemará el combustible fino, el cual corresponde al que se encuentra en el suelo del bosque aproximadamente en sus primeros 5 cm.

- Duff Moisture Code (DMC): Este indica la combustión que se tendrá en esta capa la cual se encuentra entre 5 y 10 cm bajo el nivel de la superficie forestal.
- Drought Code (DC): Indica los efectos de las sequías en los combustibles forestales y corresponde a la capa que se encuentra en la profundidad del bosque a aproximadamente entre 10 y 20 cm bajo el nivel de la superficie.

Además de evaluar cómo afectan las condiciones climáticas en la superficie del bosque, esta información aporta cómo será la propagación del fuego, lo cual se ve expresado en el “Initial Spread Index” (ISI) que indica numéricamente la tasa de propagación del fuego utilizando la velocidad del viento y el FFMC (*Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*, s.f.).

También existe otro parámetro importante del FWI, el cual es el Buildup Index (BUI), este corresponde a la medida relativa del peso creciente de combustible disponible para la combustión a medida que avanza un período de sequía, el cual tiene un lapso de 10 días de clima normal (Fire Danger Group, 1992) .

### **2.2.1. Fire Behavior Prediction (FBP) System**

Otro de los sistemas canadienses corresponde al “Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System”, el cual proporciona un método para evaluar el comportamiento del fuego en el incendio. El FBP System está basado en parte en el FWI System y en observaciones meteorológicas de los incendios (K.G.Hirsch, 1996)

El FBP System, entrega distintos componentes sobre el comportamiento del fuego, entre los cuatro principales que entrega se encuentran: la tasa de propagación (ROS), el combustible consumido, intensidad del fuego y una descripción del fuego, la cual indica si fue de copa y/o superficie. Además, entrega la distancia de esparcimiento del fuego de copa, área y perímetro de la elipse del incendio (Fire Danger Group, 1992). Esto se obtiene tomando información sobre los combustibles presentes en el área donde ocurre el incendio, el clima, la topografía, el contenido de humedad foliar y tipo y duración de la predicción del incendio.

Este sistema organiza los combustibles en 5 grupos: coníferas, hoja caduca, bosque mixto, restos de poda y pastizales. Cada uno de estos grupos tiene distintas especies pertenecientes a él y códigos asociados para cada uno como se muestra en la tabla 2.I.

Tabla 2.I: FBP System tipos de combustible

<b>Categoría</b>	<b>Code</b>	<b>Nombre</b>
<b>Coníferas (Coniferous)</b>	C-1	Bosque de abetos y líquenes
	C-2	Abeto boreal
	C-3	Jack maduro o pino Lodgepole
	C-4	Jack inmaduro o pino Lodgepole
	C-5	Pino rojo y blanco
	C-6	Plantación de coníferas
	C-7	Pino Ponderosa - Abeto Douglas
<b>Hoja caduca (Deciduous)</b>	D-1	Álamo temblón sin hojas
<b>Bosque mixto (Mixedwood)</b>	M-1	Coníferas poco densas y álamo sin hojas
	M-2	Coníferas poco densas y álamo con hojas verdes
	M-3	Abetos negros, blancos, jack y abeto balsámico muerto en sotobosque
	M-4	Abetos negros, blancos, jack y abeto balsámico muerto en sotobosque y hojas
<b>Restos de poda (Slash)</b>	S-1	Resto de poda del aclarado jack pine y logepole
	S-2	Restos de poda de aclarado de abetos
	S-3	Restos de poda del aclarado de cedro, abeto douglas etc
<b>Pastizal (Open)</b>	O-1a	Hierba espesa
	O-1b	Hierba aclarada

### 2.2.2. Combustible Consumido

El combustible consumido predice la cantidad de combustible presente en el suelo del bosque, combustible de superficie y follaje de la copa de los árboles que se consumirá en el incendio. El consumo de combustible depende tanto de lo seco que este el combustible, como del grado del fuego de copa predicho (Fire Danger Group, 1992). El FBP System asume cantidades estándar de combustible disponible para todos los combustibles excepto para el pasto, también a modo de simplificación se asume que en el fuego de copa solo el combustible foliar contribuye a la intensidad del fuego y no las ramas que también están en la copa. Cabe destacar que se asume que los pastizales se consumen completamente en el incendio.

Las ecuaciones del FPB System para calcular el combustible consumido en el fuego de superficie son las siguientes:

C1:

$$SFC = 1.5 \cdot [1 - e^{-0.230 \cdot [FFMC-81]}]$$

C2, M3 o M4:

$$SFC = 5.0 \cdot [1 - e^{(-0.0115 \cdot BUI)}]^{1.00}$$

C3 o C4:

$$SFC = 5.0 \cdot [1 - e^{(-0.0164 \cdot BUI)}]^{2.24}$$

C5 o C6:

$$SFC = 5.0 \cdot [1 - e^{(-0.0149 \cdot BUI)}]^{2.48}$$

C7:

$$\begin{aligned} FFC &= 2 \cdot [1 - e^{(-0.104 \cdot [FFMC - 70])}] \\ WFC &= 1.5 \cdot [1 - e^{(-0.0201 \cdot BUI)}] \\ SFC &= FFC + WFC \end{aligned}$$

D1:

$$SFC = 1.5 \cdot [1 - e^{(-0.0183 \cdot BUI)}]$$

M1 o M2:

$$SFC = \left[ \frac{PC}{100} \cdot (SFC \text{ for } C2) \right] + \left[ \frac{PH}{100} \cdot (SFC \text{ for } D - 1) \right]$$

S1:

$$\begin{aligned} FFC &= 4.0 \cdot [1 - e^{(-0.013 \cdot BUI)}] \\ WFC &= 4.0 \cdot [1 - e^{(-0.034 \cdot BUI)}] \\ SFC &= FFC + WFC \end{aligned}$$

S2:

$$\begin{aligned} FFC &= 10.0 \cdot [1 - e^{(-0.013 \cdot BUI)}] \\ WFC &= 6.0 \cdot [1 - e^{(-0.060 \cdot BUI)}] \\ SFC &= FFC + WFC \end{aligned}$$

S3:

$$\begin{aligned} FFC &= 12.0 \cdot [1 - e^{(-0.0166 \cdot BUI)}] \\ WFC &= 12.0 \cdot [1 - e^{(-0.0210 \cdot BUI)}] \\ SFC &= FFC + WFC \end{aligned}$$

O1a o O1b:

$$SFC = 0.35 \frac{kg}{m^2}$$

Donde FFC es Fores Fuel Consumption, SFC es Surface fuel consumption, BUI Buildup Index, FFMC Fine Fuel Moisture Code.

Estas fórmulas de consumo de combustible son las impuestas por el FBP System, estas fueron elaboradas a través de data recolectada de incendios experimentales y quemaduras prescritas bien documentadas (Fire Danger Group, 1992).

Por otro, el fuego de copa se calcula como producto del combustible disponible de la copa

por la fracción quemada de este. Para el combustible disponible en la copa el FBP tiene asignado una cantidad estándar para cada tipo de combustible, en cambio, para la fracción de combustible consumido se calcula lo siguiente:

$$CFB = 1 - e^{-0.23 \cdot (ROS - RSO)} \quad (2.1)$$

ROS= La predicción de la tasa de propagación.

RSO= Es la tasa crítica de propagación del fuego de superficie.

El combustible total consumido (TFC), se encuentra compuesto por lo consumido en el fuego de superficie del bosque más lo consumido en el fuego de copa.

### 2.2.3. Taza de esparcimiento e intensidad del fuego

La tasa de esparcimiento del fuego, conocida como "rate of spread", se calcula en base a una tasa de propagación inicial (RSI) la cual se modifica en función del BUI, el efecto de la pendiente y el efecto de la coronación de incendio. Para calcular la tasa de esparcimiento inicial, se utiliza el ISI y parámetros para cada tipo de combustible (Fire Danger Group, 1992). La fórmula genérica del RSI es  $a \cdot [1 - e^{(-b \cdot ISI)^c}]^c$ , donde a, b y c son los valores específicos de cada tipo de combustible, estos valores pueden ser vistos en el anexo.

Respecto al efecto de la pendiente, su efecto se incorpora en el ROS mediante la conversión de este efecto a un equivalente en la velocidad del viento, este es sumado a la velocidad del viento observada, generando un neto de la velocidad del viento que incluye tanto la dirección como la velocidad (Fire Danger Group, 1992). Luego con esto se genera un ISI influenciado por la pendiente y velocidad del viento.

Por último, se incorpora también la influencia del BUI. Esta se incorpora mediante el Buildup Effect (BE), mediante la siguiente fórmula:

$$BE = e^{[50 \cdot \ln(q) \cdot (\frac{1}{BUI} - \frac{1}{BUI_0})]} \quad (2.2)$$

Donde  $BUI_0$  es el promedio del BUI para los tipos de combustible y es la proporción de la máxima tasa de esparcimiento posible para cualquier ISI dado. Esta fórmula asume que la tasa de propagación debe ser cero cuando el BUI está en cero, y que a medida que aumenta el BUI aumenta rápidamente la tasa de propagación, una vez que se estabiliza el BUI también lo hace la tasa de propagación (Fire Danger Group, 1992).

Con esto la tasa de propagación se calcula como:

$$ROS = RSI \cdot BE \quad (2.3)$$

Por otro lado, la intensidad del fuego juega un rol clave para saber si el incendio corona. La intensidad del fuego es calculada en base a una adaptación de la fórmula de Byram:

$$I = H \cdot w \cdot ROS \quad (2.4)$$



I= intensidad del fuego en  $\frac{kW}{m}$   
H= Calor neto bajo combustión  $\frac{kJ}{kg}$   
w= Cantidad de combustible consumido  
ROS= tasa de propagación del fuego  $\frac{m}{s}$

A medida que la tasa de propagación del fuego aumenta, llega un momento en donde la copa de los árboles se ve involucrada en el incendio, este punto fue definido como la intensidad crítica del fuego de superficie (CSI), la cual depende de la altura de la copa (CBH) y el contenido de humedad foliar (FMC). Esta intensidad crítica se compara con la intensidad del fuego predicha, si esta es menor entonces el fuego permanece en la superficie, en caso contrario este sube a copa (Fire Danger Group, 1992).

## 2.3. Cell2Fire

Cell2Fire es un simulador de base abierta desarrollado en Python y C++. Este simulador permite que el usuario simule el crecimiento del fuego a lo largo de una cuadrícula que representa un bosque real, utilizando variables tales como el tipo de combustible y elevación para cada celda, punto de ignición del fuego y clima (J.Carrasco, 2019). Este simulador está basado en el sistema de comportamiento del fuego canadiense del FBP System.

En el Cell2Fire un paisaje forestal es transformado en una región rectangular compuesta por n filas y m columnas, divididas en celdas de áreas idénticas para producir una cuadrícula. Cada celda, representa una porción específica de este paisaje forestal, la cual tiene la información topográfica y el combustible disponible específico para esta porción y puede interactuar con las demás celdas del sistema. Esto permite que el algoritmo simule el crecimiento del fuego al ver el estado de las celdas.

### 2.3.1. Las Celdas

La información del paisaje forestal que poseen las celdas está compuesta por:

1. Tipo de combustible: A cada celda se le asigna un tipo de combustible, los cuales están clasificados según el criterio del FBP System mostrado anteriormente. Cada Tipo de combustible posee un código asociado, el cual es utilizado posteriormente al momento de la simulación para calcular la propagación del fuego y así calcular la tasa de este esparcimiento (ROS).
2. Pendiente: El porcentaje de elevación vertical sobre el tramo horizontal y adyacente a las celdas, con su respectiva dirección.
3. Elevación: La altura de la celda en metros respecto al nivel del mar.
4. Ubicación: Las coordenadas de latitud y longitud que se proporcionan con la instancia.
5. Estado: Existen 5 estados diferentes durante los periodos de la simulación en los cuales se clasifican las celdas.

Estos estados son los siguientes:

- Available, este estado indica que la celda contiene algún tipo de combustible.
- Burning, representa si es que en la celda hay fuego activo.
- Burned, indica las celdas por las que ha pasado el fuego.
- Non-Fuel, son las celdas que contienen combustibles no inflamables (ríos, rocas, lagos).
- Harvest, este estado es para las celdas cosechadas. Por lo que no poseen combustible.

Las celdas a su vez pueden funcionar como puntos de ignición, lo cual consiste en el punto en el que empieza el incendio, una vez que se define este punto comienza el fuego en la simulación. El simulador mide el radio de propagación a través de las celdas, las cuales emiten una señal al cambiar su estado a “Burning” una vez que el fuego haya alcanzado el centro de ellas. La propagación del fuego es actualizada en cada periodo por medio de este cambio de estado de las celdas.

Cada celda tiene a lo más 8 celdas adyacentes como se muestra en la figura 2.i, esto porque se asume una grilla rectangular para representar al bosque. Además, se considera que las celdas que están adyacentes a la que se está quemando son posibles áreas de esparcimiento del fuego, una vez que la celda que se está quemando no tienen más celdas a su alrededor para que se esparza el fuego, es que cambia la celda de estado “Burning”, a “Burned” y es omitida de la simulación en los periodos posteriores dado que ya se quemó el combustible disponible. Este proceso se repite hasta que se llega a un estado de finalización del incendio.

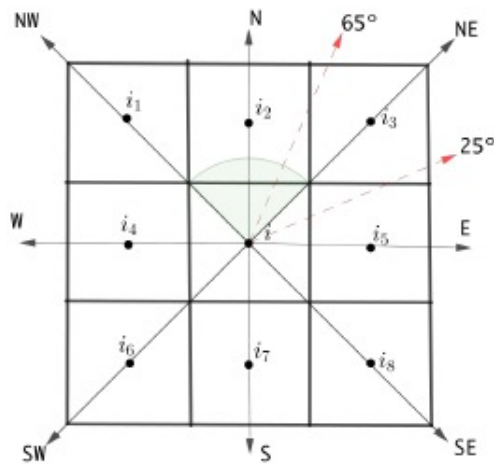


Figura 2.i: Celdas Adyacentes

Fuente: Carrasco, J. (2019). *Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty*.

El radio de propagación del fuego, que indica que celdas se irán quemando y por tanto pasarán al estado de “Burning”, se predice mediante el Head Rate of Spread (HROS), Flank Rate of Spread (FROS) and Back Rate of Spread (BROS) del FBP System, los cuales son utilizados simulando una geometría elíptica para el crecimiento del incendio (J. Carrasco, 2019).

### 2.3.2. Datos requeridos para hacer la simulación

Para que el Cell2Fire comience la simulación necesita una serie de datos utilizados como entradas iniciales, para modelar de esta forma el paisaje forestal y las condiciones que estarán para cuando se simule el incendio. Esta información requerida es la siguiente:

1. **Datos raster del bosque:** Son archivos de los paisajes forestales de cuadrícula ASCII, los cuales especifican el número de celdas que tiene el bosque, las coordenadas geográficas de este y la información relativa de cada celda.
2. **Diccionario de tipos de combustibles:** Contiene las descripciones de los combustibles y el respectivo código asociado para cada tipo, el cual coincide con el del FBP System.
3. **Punto de Ignición:** Es donde se inicia el fuego y en el simulador se compone por un archivo en donde se especifica que celda es la que da inicio al fuego en la simulación y el periodo en el cual esto ocurre.
4. **Clima:** Se tienen los registros del clima del día por cada hora. Estas son enviadas por las estaciones cercanas de donde se simulará el incendio y indican la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, escenario ID y la clasificación diaria de riesgo de incendio con sus códigos e índices respectivos.

### 2.3.3. Principales datos entregados por la simulación

1. **Grillas quemadas:** Un archivo en donde se construye una matriz donde los 1 indican las celdas quemadas (Burned) y los 0 las disponibles para quemarse (Availabe).
2. **Gráficos:** gráficos que muestran el bosque antes del incendio y la evolución de la cicatriz del incendio en cada periodo de la simulación.
3. **Estadísticas:** Estado final del paisaje forestal posterior al incendio, indicando las fechas de ignición del fuego, evolución del fuego (distancia por eje y los valores del ROS), número promedio de celdas quemadas y celdas disponibles y el promedio del porcentaje de bosque que se encontraba disponible para todos los posibles escenarios de la simulación, incluyendo múltiples climas y puntos de ignición.

Otro dato importante que entrega el simulador es el “**Total Fuel Consumption**” (TFC), que corresponde al total de combustible consumido en el incendio y su unidad es  $Kg/m^2$ . El TFC se calcula mediante la siguiente la siguiente fórmula:

$$TFC = SFC + CFC \quad (2.5)$$

la cual corresponde a la suma del combustible consumido en la superficie y si es que corona el incendio el combustible consumido de las copas de los árboles.

**Surface Fuel Consumption (SFC):** Corresponde al combustible consumido por fuego de superficie, este se calcula utilizando los índices BUI y FFMC del FWI, estos índices son específicos para cada tipo de combustible. Para el cálculo se utilizan las fórmulas de FBP System.

**Crown Fuel Consumption (CFC):** Es calculado a partir de la siguiente formula:

$$CFC = CFL \cdot CFB \quad (2.6)$$

donde el CFL corresponde al “Crown fuel load”, que es el combustible total disponible para la combustión y CFB “Crown Fraction Burn”, que indica el grado en que se vio afectada la copa del árbol.

Respecto a cuando ver si el incendio pasa a fuego de copa, el Cell2Fire se basa en las ecuaciones del FBP System.

### 2.3.4. Propagación del incendio en el simulador

Todo parte una vez programados los componentes más relevantes para la simulación del incendio. Es decir: el bosque, las celdas, las componente meteorológicas (clima, viento, humedad,etc), los puntos de ignición y se fijan los diferentes objetivos. Una vez que ocurre esto, el bosque esta creado y parte la simulación en el punto de ignición definido, el cual inicia el fuego en el centro de la celda seleccionada y dependiendo de las condiciones definidas, este se propaga a las celdas adyacentes.

Los parámetros relevantes del incendio se calculan llamando al módulo del FBP System para calcular la tasa de propagación del fuego (ROS), para cada eje de propagación disponible de la celda que se está quemando. Esto se calcula dadas las características del combustible, la topografía y el clima. De acá se obtiene el ROS el cual es la dirección promedio calculada del radio de propagación del fuego y como se mencionó anteriormente tiene una figura elíptica (J.Carrasco, 2019).

A partir de los ROS calculados a lo largo de cada eje de las celdas, se empieza a modelar la propagación del fuego entre ellas. Esto se hace a partir de un sistema que utiliza un enfoque de envío y recepción de mensajes, lo cual permite la paralelización. Esta interacción es la que ocurre entre las celdas cuando el fuego llega al centro de una celda durante el tiempo de la simulación. Es ahí cuando la celda manda el mensaje a las celdas aledañas a ella, la cual se quema o no dependiendo de lo que arroje el chequeo que hace el simulador sobre las características de la celda y las características del ambiente que la rodea. Estos pasos se repiten hasta que se satisfaga un criterio de término (máximo número de periodos de la simulación, máximo número de climas simulados o algún evento que condicione el término del incendio) (J.Carrasco, 2019).

Este flujo se puede ver ejemplificado en la figura 2.ii, donde se ven los datos necesarios para partir la simulación, luego de esto se genera el ROS determinando el crecimiento del incendio y una vez que esto termina el simulador entrega los resultados a través de las métricas.

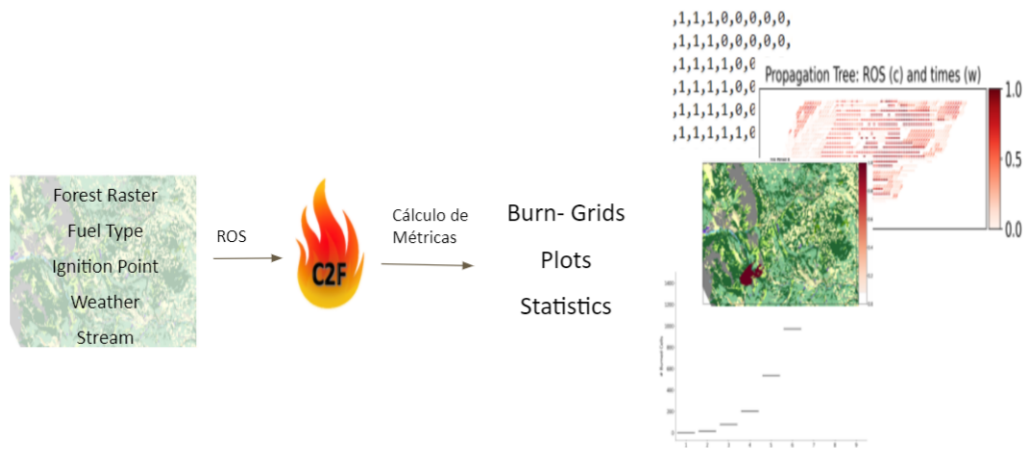


Figura 2.ii: Flujo Cell2Fire

## 2.4. Emisiones de Carbono

En el marco de esta investigación siempre se hablará de las emisiones carbono refiriéndose a las emisiones emitidas en el instante del incendio, las cuales son conocidas como la emisión directa de carbono generada por los incendios forestales.

Cell2Fire está especialmente diseñado para que se utilice como herramienta para el fuel management, con el objetivo de mitigar el impacto perjudicial que tienen los incendios forestales, sin embargo, hoy en día este simulador no cuenta con herramientas que ayuden al management desde una perspectiva enfocada en disminuir los impactos ambientales que traen los incendios. Es por esto que con esta tesis se busca complementar el simulador Cell2Fire con el fin de poder a futuro mitigar la liberación de gases de efecto invernadero a través de la gestión de combustible que se podría hacer con la información obtenida por el simulador. Para esto se contextualizará sobre las emisiones de carbono y el calentamiento global, para luego hablar de la gestión de carbono y los simuladores existentes que predicen las emisiones de los incendios.

El carbono capturado por los bosques cumple un rol importante en el balance global del carbono en la Tierra (Dixon et al. 1994). Pero los bosques no sólo impactan la secuestro de carbono, sino que también la emisión de gases de efecto invernadero a través de los incendios, los cuales liberan  $CO$ ,  $CH_4$ , óxido de nitrógeno, material particulado y mayormente  $CO_2$ , lo cual afecta de manera directa en el cambio climático (Amiro. 2001). Hoy en día debido al cambio climático, ha habido un aumento de incendios forestales en distintos países del mundo, entre ellos Canadá y Chile.

### 2.4.1. Calentamiento Global

Para entender que es el calentamiento global, primero definiremos que es el cambio climático y el efecto invernadero. El cambio climático, para el efecto de esta tesis, se refiere a *“un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad climática natural observa-*

*da durante períodos de tiempo comparables"* (Convención Marco sobre el Cambio Climático, s.f.), es importante acá notar que señalan que los cambios son provocados por la actividad humana dado que hay cambios en el clima que ocurren por procesos naturales internos de la Tierra. Por otro lado tenemos el efecto invernadero, este es provocado por los gases de efecto invernadero, estos son *"aquellos componentes gaseosos de la atmósfera , tanto naturales como antropogénicos , que absorben y emiten radiación en longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, la propia atmósfera y las nubes"*(Convención Marco sobre el Cambio Climático, s.f.), mediante este proceso de absorción de calor de los gases es que se provoca lo que conocemos como el efecto invernadero. Este ocurre naturalmente, pero el problema es que como nosotros generamos más emisiones de estos gases que lo que ocurriría en circunstancias naturales, por esto generamos un sobre calentamiento de la Tierra al aumentar su temperatura, a esto le denominamos Calentamiento Global.

Los principales gases de efecto invernadero son: el vapor de agua, dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y el ozono. Para el caso de los incendios forestales, principales gases de efecto invernadero que se liberan son monóxido de carbono ( $CO$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y mayormente dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Pese a que este último sea el que más se libera siendo casi un 90 %, los demás gases también deben ser considerados al momento de estudiar las emisiones dado que hacen más daño que el  $CO_2$ . Es por esto que para reportar las emisiones utilizaremos algo conocido como  $CO_2eq$ , que corresponde a una suma ponderada de los diferentes gases de efecto invernadero llevados a unidades de dióxido de carbono, esto a través del Potencial de Calentamiento Global (GWP). Este factor corresponde a una medida relativa de cuanto gas puede ser capturado por los gases de efecto invernadero en función del  $CO_2$ , por un determinado periodo, lo cual en otras palabras correspondería a la cantidad de toneladas de  $CO_2eq$  que deberían ser emitidas para generar el mismo impacto que una tonelada de otro gas de efecto invernadero, por ejemplo en el caso del metano serían 28 millones de toneladas de  $CO_2eq$  (Pinault, 2018).

## 2.5. Gestión del Carbono

La gestión del carbono es crítica para mitigar la concentración de las emisiones de carbono. Para esto existen distintas estrategias que buscan poder favorecer la adaptación de los bosques ante el cambio climático ya sean acciones relacionadas a mantener el carbono existente o a mejorar la capacidad que tienen los bosques para capturar carbono. Estas estrategias llevan consigo distintas acciones para gestionar el carbono de los bosques(Ontl et al., 2019).

Dentro de las estrategias relacionadas a la adaptación de los bosques frente a los desastres naturales, tales como los incendios forestales, se encuentran los siguientes enfoques relacionadas a la gestión del carbono:

1. Restaurar o mantener el fuego en ecosistemas que estén adaptados a este.
2. Gestionar los cortafuegos ya sean naturales o artificiales, para frenar la propagación del fuego de mega incendios.
3. Modificar la estructura o composición del bosque para así reducir el riesgo, la severidad o la extensión de los incendios forestales.

4. Reducir el riesgo de mortalidad de los árboles, debido a estrés biológico o climático en sistemas propensos al fuego.
5. Alterar la estructura del bosque para reducir el riesgo, la severidad y la extensión del daño por el viento o por el hielo.

También hay otras estrategias que van ligadas más a priorizar la gestión de los lugares que posean un alto valor de carbono en su paisaje. Dentro de estas estrategias tenemos:

6. Priorizar los sitios que tengan una baja vulnerabilidad con respecto a las pérdidas de carbono, para que estos mantengan o mejoren las reservas de carbono.
7. Establecer las reservas en áreas donde la densidad de carbono sea alta.

Para lograr estos enfoques uno debe realizar distintas acciones, estas pueden ser a corto, medio o largo plazo. Por ejemplo, si escogemos el enfoque (3), que habla sobre alterar la estructura de los bosques con el fin de reducir el riesgo, la severidad o extensión de los incendios forestales, una acción a largo plazo que nos ayudaría a lograrlo sería implementar una cosecha de ciertos sectores del bosque (Ontl et al., 2020), mientras que una acción que lograría esto solo en el corto plazo sería crear cortafuegos antes de la temporada de incendios de este año. En esta investigación solo nos enfocaremos en medidas a corto plazo.

Estas estrategias fueron desarrolladas como parte del “Forest Carbon Management Menu”, el cual es utilizado en la gestión de los bosques, específicamente en temas relacionados al carbono.

### **2.5.1. Gestión de carbono y que herramientas existen / Estado del Arte**

Canadá reporta los gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera y el carbono removido debido a la gestión de este utilizando el “Canada’s National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System (NFCMARS)”, este modelo estima las existencias de carbono forestal, cambios en estas existencias y emisiones de  $CO_2$ . Esto lo hace dado que NFCMARS, integra datos de inventario forestal y curvas de rendimiento con datos que tiene realizadas para la gestión del carbono y la distribución natural del bosque, además de utilizar valores sobre el clima en el bosque y valores ligados a la ecología de este mismo. Con esto el modelo simula las transferencias de carbono que hay hacia la madera cosechada y hacia la atmósfera (Sources y Canada, 2019).

#### **FireMARS**

Para el caso de los incendios Canadá utiliza FireMARS, un sistema de informes, contabilidad y monitoreo de incendios. FireMARS está compuesto de cuatro componentes claves:

- El “National Based Area Composite (NBCA)”, el cual consiste en una base de datos GIS y un sistema que calcula el área quemada en los bosques a nivel nacional, generando un mapa de esta área para cada año desde 1986.
- El “Canadian Wildland Fire Information System (CWFIS)”, este monitorea el clima diario y las condiciones de peligro de incendio, creando mapas del clima y los comportamientos de los incendios a lo largo de Canadá.

- El Modelo canadiense de los efectos del fuego (CANFIRE), a través de este se estiman las emisiones de carbono, cabe destacar que este modelo es integrado por un conjunto de simuladores con los cuales puede simular los efectos de los incendios forestales tanto de primer orden como de segundo orden.
- El modelo de presupuesto de carbono del sector forestal canadiense (CBM-CFS3), el cual modela las reservas de carbono, el cambio en estas y tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como también la absorción de estos, mediante los bosques de Canadá. Este modelo cumple con los estándares impuestos por el IPCC.

A través de estos componentes es que FireMARS entrega la siguiente información que permite hacer gestión del carbono en Canadá:

- Un mapa de las áreas quemadas anualmente por los incendios, mediante la integración de datos satelitales.
- Un reporte anual de que contribuye al sistema nacional de informes, contabilidad y monitoreo de carbono forestal de Canadá (NFCMARS), el cual calcula las emisiones y absorciones de los gases de efecto invernadero de los bosques pertenecientes a Canadá, esta información también aporta en el inventario nacional de gases de efecto invernadero de Canadá (Government of Canada, 2017).

## **CanFire**

CanFire, como se mencionó anteriormente es un modelo utilizado para el cálculo de emisiones de carbono, el cual puede ser utilizado para simular un paisaje forestal agregando datos a nivel de rodal. Este simula el comportamiento y los efectos del fuego, ya sean tanto a nivel físico y ecológico.

Este modelo se base en el FBP System para calcular la tasa de propagación del fuego. Surgió como una variante al BORFIRE, que pretendía estudiar los efectos que provocarían los futuros incendios los cuales cambiarían su régimen respecto a los anteriores debido al cambio climático, por esto mismo este modelo también calcula el carbono almacenado en los bosques y las emisiones de carbonos que surgen de estos. CanFire puede simular las condiciones para 6 combustibles forestales, los cuales corresponden a las especies de árboles boreales que más se encuentran en Canadá, pino jack, abeto negro, abeto blanco, álamo temblón, abeto balsámico y abedul blanco y también otros combustibles como pastizales o restos de poda. Este simulador es capaz de entregar combustible consumido, las emisiones y el comportamiento del fuego (si es que hubo fuego de copa o no en el incendio) (Groot, 2009).

## **CONSUME 3.0**

En Norte America, encontramos otra herramienta para la gestión del carbono, este corresponde a un software computacional llamado CONSUME 3.0. Este Software fue creado por FERA (Fire and Environmental Resource Application Group of the Pacific Northwest Research Station), con el fin de crear modelos para calcular el consumo de combustible y las emisiones de incendios prescritos en el noroeste del pacifico. En CONSUME 3.0, a diferencia de sus predecesores, se incorporó un nuevo sistema de clasificación de combustible de acuerdo a sus características, llamado el Fuel Characteristic Classification System (FCCS). Con esta



adaptación el CONSUME 3.0 es capaz de predecir el consumo de combustibles y las emisiones las distintas vegetaciones de Estados Unidos, además de predecir el calor liberado por la quema de los combustibles (Ottmar, 2009).

Según un estudio realizado por French en 2011, donde comparan distintos modelos para la estimación de gases de efecto invernadero, ellos concluyen que todos los modelos coinciden en las emisiones que reportan con alrededor de un 25 % de diferencias entre ellos, esto debido a diferencias en el área quemada, el tipo de combustible y las características de la vegetación y la masa. Se menciona que para el modelo CONSUME se están haciendo mejoras para la cuantificación de las cargas de combustible y el consumo de combustible de los arbustos, mientras que para el CanFire se están generando modelos de combustible adicionales (French et al., 2011). Tanto el CONSUME 3.0 como el CanFire, son simuladores estáticos por lo que difieren al Cell2Fire, dado que es un simulador espacial, por lo cual es capaz de entregar como resultado además la cicatriz del incendio. Además, no incluyen un módulo de optimización para la ubicación de cortafuegos, con lo que se puede aportar al diseño de paisajes, esto podría hacerse si se incluyen las emisiones a simuladores sofisticados como PROMETHEUS, pero hasta donde sabemos no se ha hecho.

### 2.5.2. Cálculo de Carbono emitido en los incendios forestales

En Canadá ha habido una serie de estudios sobre el  $CO_2$  emitido en los incendios forestales, dado que se les exigen estimar las emisiones anuales de carbono y otros gases de efecto invernadero, incluyendo las emisiones producidas por los incendios forestales en los cuales se ha hecho gestión de incendios y además del registro de las gestiones de carbono, que impliquen remover material que contenga carbono.

La mayor incertidumbre al modelar las emisiones de carbono de los incendios forestales es la estimación que se debe hacer del combustible ubicado en el suelo del bosque el cual en algunas partes es casi la mitad de este. En este caso se trabajó con lo reportado por el FBP para los bosques canadienses.

### 2.5.3. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC): Cálculo de emisiones en los incendios forestales

El IPCC ha establecido métodos para calcular las emisiones de carbono y otra variedad de gases de efecto invernadero. Los métodos que plantea el IPCC difieren en las fórmulas utilizadas según los datos que se tengan sobre la vegetación antes y después del incendio, el combustible quemado, el área que se quemó y la intensidad.

Se hace diferencia entre los distintos niveles que se pueden usar según la información acerca del bosque y el incendio. En particular existen tres tipos de niveles:

- **Nivel 1:** Para poder utilizar los métodos correspondientes a este nivel, es necesario tener los datos sobre la cantidad de biomasa disponible en el lugar del incendio. Para

este nivel se utilizan un factor de combustión y un factor de emisión que se está por defecto según el tipo de vegetación, estos valores son entregados por el IPCC.

- **Nivel 2:** Para los métodos correspondientes a este nivel, es necesario saber los datos de la cantidad de combustible quemado en el incendio y un factor de emisión específico para cada combustible. Para el factor del gas emitido en los incendios forestales se utiliza el factor entregado por el IPCC.
- **Nivel 3:** En este se debe tener información detallada de la biomasa para estimar pérdida de carbono usando modelos dinámicos o algoritmos, para eso debe haber un registro de la biomasa pre incendio y post incendio. Además de tener la cantidad de combustible consumida en el incendio (Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories, Greenhouse, y Inventories, 2006).

La fórmula genérica que plantea el IPCC para el cálculo de los gases de efecto invernadero es la siguiente:

$$L_{fire} = A \cdot M_b \cdot C_f \cdot G_{ef} \cdot 10^{-3} \quad (2.7)$$

*Fuente: Ecuación 2.27; Capítulo 2, Volumen 4, (Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories et al., 2006)*

$L_{fire}$  = Toneladas emitidas de gases de efecto invernadero.

$A$  = Área quemada.

$M_b$  = Toneladas por hectárea de biomasa disponible para la combustión.

$C_f$  = Factor de combustión (adimensional).

$G_{ef}$  = Factor de emisión del gas, su unidad es  $\frac{g}{kg}$  de materia seca

Acá el factor  $10^{-3}$  se utiliza como factor de corrección para las unidades del  $G_{ef}$ .

En el fondo lo que hace esta ecuación matemática es transformar lo que se quemó de combustible en emisiones de los distintos gases al multiplicar el consumo que hubo con los factores de emisión que hay para cada gas, estos factores a su vez dependen del tipo de combustible que se consumió en el incendio. Cabe destacar que esta ecuación considera las emisiones directas de carbono generadas por el incendio.

El IPCC da valores por defecto para los factores de emisión a utilizar para cada tipo de gas, estos factores de emisión tienen un error asociado para cada gas y tipo de combustible. Estos factores fueron hecho a raíz de una revisión exhaustiva de Andreae y Merlet (2001). Los estudios de Nivel 3, no utilizan estos factores dado que pueden sacarlos a través del registro actualizado de biomasa pre y post incendio.

El factor de emisión del gas a utilizar son los siguientes:

Tabla 2.II:  $G_{ef}$  para cada gas y tipo de vegetación

	$CO_2$	$CO$	$CH_4$	$N_2O$	$NO_x$
Category	mean	mean	mean	mean	mean
<b>Savanna and Grassland</b>	1613	65	2,3	0,21	3,9
<b>Extra tropical forest</b>	1569	107	4,7	0,26	3

Fuente: Tabla 2.5; Capitulo 2, Volumen 4, (*Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories et al.*, 2006)

Se utilizaron los factores de estas categorías de combustible porque eran las que más se ajustaban con la biomasa de los bosques canadienses, esto debido a que las otras categorías disponibles para estos datos eran: residuos agrícolas, bosques tropicales y quemado de biocombustibles.

## 2.6. Downstream Protection Value

El Downstream Protection Value (DPV) es un concepto introducido por primera vez por J. Carrasco (2019). EL DPV es una métrica adaptable que le asigna un puntaje a las celdas del bosque según el impacto que tengan en la propagación del incendio (J.Carrasco, 2019).

Para obtener el DPV el bosque se modela como una red, la cual es bidimensional y tiene áreas idénticas para las celdas. Estas celdas tienen a su vez distintos atributos que se le pueden agregar (volumen, tipo de combustible, etc.), según sea necesario para calcular el objetivo que se busca. Para modelar la relación espacial de las celdas, se utilizó un grafo plano no dirigido  $G = (\mathcal{N}, \varepsilon)$ , donde  $\mathcal{N}$  representa las celdas del bosque las cuales actúan como nodos del grafo y  $\varepsilon$  representa a los bordes de las celdas. Esto se puede ver ilustrado en la siguiente figura:

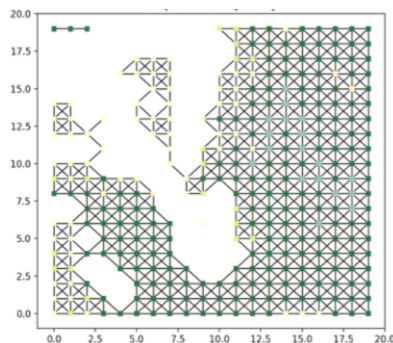


Figura 2.iii: Grafo del bosque adyacente

Fuente: Carrasco, J. (2019). *Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty.*

A su vez el recorrido del incendio en el bosque puede ser modelado como un árbol de propagación  $\mathcal{T}_i = (\mathcal{N}_i, \mathcal{E}_i)$ , este muestra el camino más corto por el que llegó el incendio de una celda a otra.

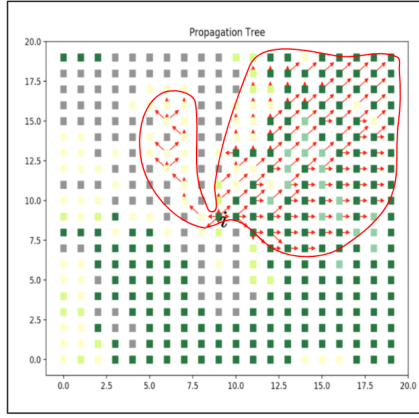


Figura 2.iv: Propagation Tree  $\mathcal{T}_i = (\mathcal{N}_i, \mathcal{E}_i)$

Matemáticamente, sea  $i \in \mathcal{N}$ , y  $\mathcal{T}_i = (\mathcal{N}_i, \mathcal{E}_i)$  el árbol del camino más corto con nodo de ruta  $i$ . Luego, el Downstream Protection Value,  $DPV(i)$  se define como

$$DPV(i) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} V_j$$

donde  $V_j$  es un valor de riesgo específico para el nodo  $j$ , estos valores de riesgos son asignados según se estime conveniente para el estudio. Por ejemplo, en este caso el factor de riesgo que quisiéramos estudiar es el  $CO_2eq$  liberado por las celdas.

Cuando se generen  $R$  simulaciones, podemos definir un DPV promedio (ADPV), para cada celda  $i \in \mathcal{N}$  con:  $ADPV(i) = \frac{1}{R} \sum_{r=1:R} DPV(i)$ . Intuitivamente, DPV en una celda  $i$ , representa los valores de  $V_j$  ( $j \in \mathcal{N}(i)$ ) que provoca la celda  $i$  “aguas abajo”, para una simulación  $r$ . Estos valores a su vez dependen de las condiciones del incendio que se asociaron a la simulación (Puntos de ignición, climas).

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Estimación de las emisiones de carbono en Cell2Fire

Dado que Cell2Fire posee información específica de cada celda con relación al tipo de combustible, la intensidad del fuego y cuanto combustible se quemó. Se decidió adaptar la fórmula del IPCC (3.1), con los datos disponible y así tener una fórmula más acorde a lo que ocurre en la simulación en relación con los gases de efecto invernadero.

$$L_{fire} = A \cdot M_b \cdot C_f \cdot G_{ef} \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

Por esto se pasó de la fórmula 3.1 a una en donde se incorporó el combustible total consumido en el incendio, el cual es entregado por el simulador en kg y corresponde a la suma del combustible consumido (TFC) en cada celda, este correspondería a lo siguiente  $TFC = A \cdot M_b \cdot C_f = \sum FC$ , por lo que al incorporarlo a la fórmula esta quedaría de la siguiente manera:

$$L_{fire} = TFC \cdot G_{ef} \cdot 10^{-2} \quad (3.2)$$

$L_{fire}$  = Toneladas emitidas de gases de efecto invernadero.

$TFC$  = El total de combustible consumido por el siniestro en kilogramos.

$G_{ef}$  = Factor de emisión del gas.

Acá se debió cambiar el factor de corrección de unidades dado que el simulador calcula el Combustible consumido en  $\frac{kg}{m^2}$ , por lo que el TFC se encuentra en kilogramos en lugar de hectáreas.

Por otro lado, se incorporó el  $G_{ef}$ , dado por defecto por el IPCC, para los distintos tipos de combustibles, estos combustibles debieron ser traspasados a los códigos estipulados por el FBP System, para ser incorporados al simular. Con esto se tiene que las categorías llevadas al FBP Sytem son:

Tabla 3.I:  $G_{ef}$  para cada gas y tipo de vegetación

Category		$CO_2$	$CO$	$CH_4$	$N_2O$	$NO_x$
IPCC	FBP System	mean	mean	mean	mean	mean
<b>Savanna and Grassland</b>	Grass, Slash	1613	65	2,3	0,21	3,9
<b>Extra tropical forest</b>	Mixed-wood, Coniferous	1569	107	4,7	0,26	3

Una vez incorporado el  $G_{ef}$  específico para cada tipo de combustible, se prosiguió a incorporar la fórmula al simulador. Para poder aplicar esta fórmula en el simulador, hubo que hacer una modificación y calcular primero las emisiones de los gases por celda y luego sumarlos, en otras palabras, se realizó lo siguiente:

$$L_{fire}(\mathcal{G}_D) = \sum_{i \in \mathcal{N}_D} (TFC_i \cdot G_{ef}(i) \cdot 10^{-2}) \quad (3.3)$$

$L_{fire}(\mathcal{G}_D)$ = Toneladas de gases de efecto invernadero emitidas

$TFC_i$ = El combustible total consumido en kilogramos (emitido por la celda  $i$ ).

$G_{ef}(i)$ = El factor de emisión del gas dependiendo del tipo de combustible de la celda  $i$ .

Para poder comparar las emisiones, se calculó el  $CO_2eq$ , para esto se utilizaron los siguientes GWP, los cuales fueron calculados en base a un horizonte de 100 años. (Pinault, 2018).

Tabla 3.II: GWP horizonte de 100 años

Gas	GWP
$CO$	1.8
$CH_4$	28
$N_2O$	265
$NO_x$	-8.2

Con esto el flujo del simulador para obtener las emisiones sería el que se ve en la figura 3.i, donde se parte de la cicatriz de incendio generada por el simulador, de acá se toma la celda quemada, en la cual se extraen las características de la celda como el tipo de combustible, luego se calcula el Ros y se calcula el total del combustible consumido por el fuego. Este corresponderá solo al combustible consumido en la superficie del bosque, o en caso de que corone el incendio, al combustible consumido en la superficie más lo consumido en la copa del árbol. Luego con la fórmula (3.3), se obtienen los gases de efecto invernadero por celda.

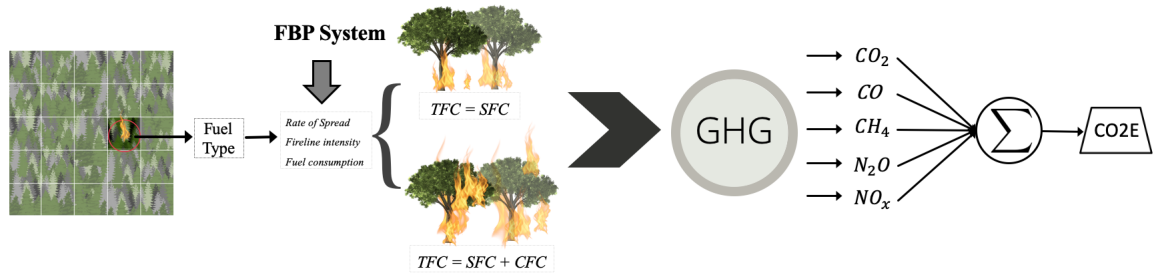


Figura 3.i: Flujo del simulador para el cálculo de emisiones

Este proceso se repite para cada celda quemada con los datos que se obtuvieron de Cell2Fire para los periodos en que ocurre el incendio, esto permite que se calculen las emisiones para las distintas horas en que ocurrió el incendio. Posteriormente se suman estas emisiones obteniendo las emisiones totales, las cuales se expresan en  $CO_2eq$ . Esta expresión se obtiene mediante a siguiente fórmula:

$$CO_2eq = CO_2 + CO \cdot 1.8 + CH_4 \cdot 28 + N_2O \cdot 265 + N_xO \cdot -8.2 \quad (3.4)$$

Como se puede ver la fórmula 3.4, esta corresponde al a suma ponderada de las emisiones con el GWP respectivo para cada gas.

### 3.1.1. Área de estudio

Para esta investigación se utilizó un paisaje forestal real, el cual se localiza en la región de Alberta en Canadá y se llama "Dogrib", este se puede ver en la siguiente imagen a la izquierda 3.ii. Este se encuentra compuesto por 79611 hectáreas divididas en celdas de  $100 \times 100[m^2]$ , cuyos tipos de combustibles son bosque de abetos y líquenes (C1), abeto boreal (C2), Jack maduro o pino Lodgepole (C3), Jack inmaduro o pino Lodgepole (C4), pino Ponderosa - abeto Douglas (C7), coníferas poco densas y álamos sin hojas (M1), álamo temblón sin hojas (D1) y hierba espesa (O1a). La imagen de la derecha bajo el nombre "Dogrib", corresponde a una ilustración del bosque específico con el que se trabajará, el cual es tomado por el simulador y utilizado para generar la simulación y posteriormente obtener la cicatriz del incendio predicha por Cell2Fire. Para tener una muestra que tuviese un tamaño moderado, para poder ilustrar de mejor manera el testeado de la heurística de selección de cortafuegos, se utilizó un subconjunto de Dogrib el cual llamamos "Sub40z también se puede ver en el costado izquierdo de la imagen. La instancia Sub40 se encuentra compuesta por 1600 hectáreas con celdas de la misma resolución que el Dogrib.

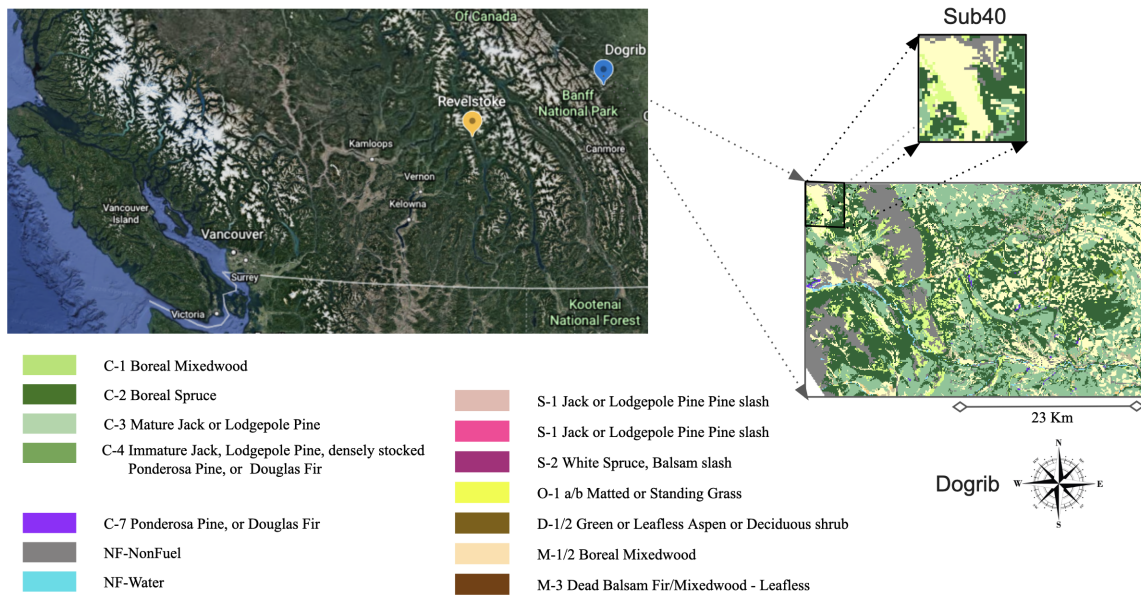


Figura 3.ii: Paisajes forestales para los casos de estudio

### 3.1.2. Caracterización de los experimentos

Para estudiar las emisiones que entregaba el simulador, se realizaron 2 experimentos:

- **Experimento 1:** Se realizaron tres simulaciones con un mismo clima para las horas de la simulación, pero diferentes puntos de ignición.
- **Experimento 2:** Se estudiaron diez simulaciones con climas y puntos de ignición aleatorios.

#### 3.1.2.1. Cálculo de las emisiones con la fórmula del IPCC para las distintas simulaciones

Con el objetivo de poder corroborar como estaban los datos obtenidos con Cell2Fire en términos de emisiones, se decidió utilizar la fórmula genérica para el Nivel 1 del IPCC y comparar que los resultados obtenidos en la simulación estuviesen dentro de lo esperado.

Para utilizar la fórmula 3.1, primero se debió calcular la biomasa disponible pre-incendio, la cual no está definida por Cell2Fire, porque se basa en las fórmulas del FBP System para el consumo de combustible, el cuál como se mencionó anteriormente, relaciona estadísticamente el consumo de combustible en la superficie con variables climáticas. Es por esto que para obtener la biomasa inicial se sacó el límite de las funciones para el consumo del combustible que usa el FBP System (ver Anexo 2.2) y así obtener la biomasa máxima que podría ser consumida por cada uno de los tipos de combustible. Con esto se obtuvieron los valores de la Tabla 3.III.

Estos datos se obtuvieron al calcular el límite de las ecuaciones para el consumo de cada uno de los combustibles, por esto en los datos ya se encuentra presente el factor de combustión en la superficie del bosque, y para el caso de la corona se asumió un consumo del 100% al igual que para los combustibles de tipo O1 que serían pastizales.



Tabla 3.III: Biomasa disponible para la combustión según tipo de combustible

Fuel Type	Floor Fuel $\frac{t}{ha}$	Crown Fuel $\frac{t}{ha}$	Fuel Load $\frac{t}{ha}$
<b>C1</b>	15	7.5	22.5
<b>C2</b>	50	8	58
<b>C3</b>	50	11.5	61.5
<b>C4</b>	50	12	62
<b>C5</b>	50	12	62
<b>C6</b>	50	18	68
<b>C7</b>	35	5	40
<b>M1</b>	30	8	38
<b>M2</b>	30	8	38
<b>M3</b>	50	8	58
<b>M4</b>	50	8	58
<b>D1</b>	14	0	14
<b>D2</b>	14	0	14
<b>S1</b>	80	0	80
<b>S2</b>	160	0	160
<b>S3</b>	300	0	300
<b>O1a</b>	3.5	0	3.5
<b>O1b</b>	3.5	0	3.5

Una vez obtenidos estos datos que corresponderían al combustible consumido por el factor de combustión, se extrajeron los datos obtenidos de las simulaciones correspondientes a la predicción del área quemada. A partir del área quemada se extrajo el tipo de combustible de cada celda para sacar el combustible que se había consumido en el incendio y se multiplico por el  $G_{ef}$  correspondiente para casa tipo de combustible. Cabe destacar que por cómo se encuentra compuesta esta fórmula del IPCC, se asume un consumo de biomasa del 100 % en el área quemada.

Luego lo obtenido en estas simulaciones se contrasto con el resultado obtenido mediante la fórmula del IPCC para los distintos incendios estudiados.

## 3.2. Protección de carbono a través del diseño de paisaje

Una de las decisiones importantes que tienen el tomador de decisiones en el diseño de paisajes donde ubicar los cortafuegos con el fin de proteger las áreas de interés. En este sentido se resolvió un problema de optimización para determinar las celdas que tuviesen mayor DPV en relación con el carbono.

### 3.2.1. Heurística de selección de cortafuegos

La Heurística utilizada fue la de seleccionar las celdas que tuviesen un mayor *Downstream Proteccion Value*. Para esta investigación a esta métrica se le asignó el valor de riesgo del  $CO_2eq$  promedio liberado por celda.

Este valor de riesgo se construyó en base a un set de 100 simulaciones construidas con puntos de ignición y climas aleatorios, este set lo denotaremos  $\mathcal{R}$ , en base a  $\mathcal{R}$  se obtuvo un  $CO_2eq$  promedio para cada celda, este es el que se incorporó como valor de riesgo en  $V_j$ . Con este valor de riesgo el  $DPV(i)$  con  $i \in \mathcal{N}$  representa el  $CO_2eq$  que se genera en el conjunto  $\mathcal{R}$  de simulaciones a partir de la propagación del incendio que se generó producto de que se quemará la celda  $i$ , en otras palabras, el  $CO_2eq$  generado para la ruta del nodo  $i$ .

Luego el problema de optimización que se resolvió para obtener las celdas a cortar fue el siguiente :

$$\begin{aligned} \text{max} \quad & z = \sum_{j \in \mathcal{N}} DPV(j) \cdot x_j - \sum_{j \in \mathcal{N}} CO_2e(j) \cdot x_j \\ \text{subject to} \quad & \sum_{j \in \mathcal{N}} x_j \leq \alpha \cdot |\mathcal{N}|, \\ & x_j \in \{0, 1\}, j \in \mathcal{N}. \end{aligned} \tag{3.5}$$

donde  $X_j = \begin{cases} 1 & \text{si la celda } j \text{ es seleccionada para construir un cortafuego} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$

$\alpha$  denota el porcentaje de tratamiento para distintos niveles 1%, 3%, 5%, 7%, 10% y  $\sum_{j \in \mathcal{N}} CO_2eq(j) \cdot x_j$ , corresponde al máximo  $CO_2eq$  potencial que puede emitir cada celda, el cual se encuentra construido en base al máximo  $CO_2eq$  que puede emitir cada celda. La solución a este problema de optimización, es un set  $S_\alpha \subseteq \mathcal{N}$  tal que:  $S_\alpha = \{j \in \mathcal{N} : x_j^* = 1\}$

Se decidió realizar un set de 1000 simulaciones, construidas con puntos de ignición y climas aleatorios para tener como base el  $CO_2eq$  por celda dado que con este número de simulaciones se logra un intervalo de 85% de confianza con un error de  $\pm 931.27$  toneladas por hectárea de  $CO_2eq$  para el caso heterogéneo y de  $\pm 808.38$  toneladas por hectárea de  $CO_2eq$  para caso homogéneo bajo el mismo intervalo de confianza, lo cual consideramos un error razonable al ser menor a 1000 toneladas por hectárea, cabe destacar que no se ocupó un 95% de confianza para esto por límites de procesamiento computacional dado que esto implicaba hacer más de 1800 simulaciones.

Para testear la eficiencia de los cortafuegos entregados a través de esta heurística se trabajó con 2 bosques de 1600 celdas, uno con tipos de combustible heterogéneos, el cual corresponde al bosque Sub40 mostrado anteriormente, y otro construido con tipos de combustible homogéneos, pero con la misma topografía. Para caso heterogéneo se utilizó una fracción de paisaje forestal perteneciente a Alberta en Canadá, esta se puede ver en la imagen 3.ii. En cambio, para el caso homogéneo se generó un bosque de igual tamaño, pero compuesto solamente por abetos y líquenes.

Luego de generar los cortafuegos para las distintas configuraciones de tratamiento se testeó su efectividad generando 1000 simulaciones más con una pequeña perturbación y 1000 simu-

laciones para cada configuración, todas generadas con climas y puntos de ignición aleatorias construidos en base a la misma semilla aleatorias para poder comparar los resultados.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Resultados obtenidos en las simulaciones

#### 4.1.1. Experimento 1:

En este experimento se estudiaron tres simulaciones de tres incendios distintos, construidos con puntos de ignición aleatorios, pero con un mismo clima. A continuación, se muestran los resultados de menor a mayor área quemada.

- Simulación 1: Corresponde a un incendio en el cual se quemó aproximadamente un 0,2% del bosque. Esto se puede ver expresado en la figura 4.i, donde se muestra de manera gráfica el área quemada por el incendio la cual corresponde a la de color rojo oscuro.

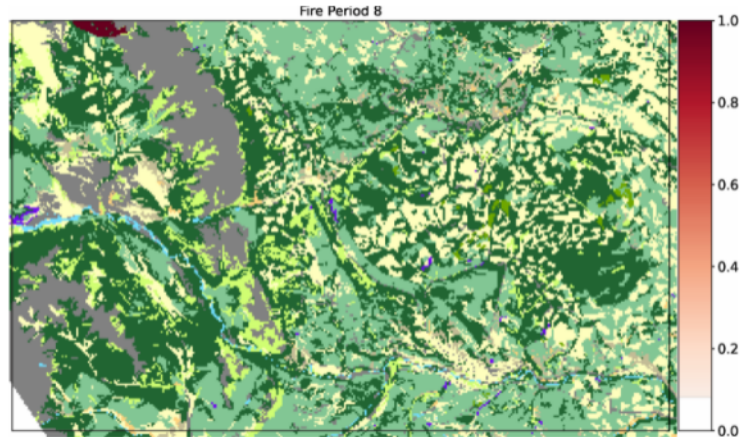


Figura 4.i: Cicatriz de incendio Simulación 1

- Simulación 2: Corresponde a un incendio donde se quemó un 1,3% del bosque. Se muestra en la figura 4.iii, donde se ve el área quemada.

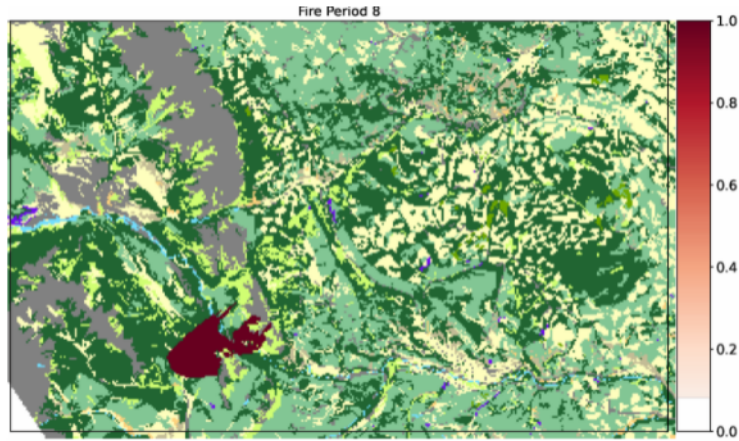


Figura 4.ii: Cicatriz de incendio Simulación 2

- Simulación 3: Corresponde a un incendio donde se quemó un 1,7% del bosque. Esto se puede ver expresado en la figura 4.iii, donde se muestra de manera gráfica el área quemada.

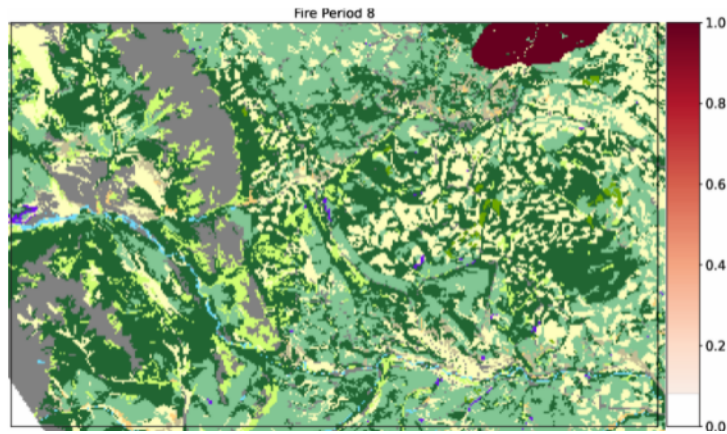


Figura 4.iii: Cicatriz de incendio Simulación 3

A partir de estos incendios se obtuvo la siguiente información:

Tabla 4.I: Experimento 1: Simulación 1

<b>Simulación 1</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	173
Área Quemada Pastizales (ha)	7
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	166
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	6,465.57
<b>Total GHG (t CO<sub>2</sub>eq)</b>	12,114.58
CO <sub>2</sub> (t)	10,145.55
CO (t)	690.79
CH <sub>4</sub> (t)	30.33
N <sub>2</sub> O (t)	1.68
NO <sub>x</sub> (t)	19.42

Tabla 4.II: Experimento 1: Simulación 2

<b>Simulación 2</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	1003
Área Quemada Pastizales (ha)	100
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	903
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	33,428.86
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	62,619.81
$CO_2$ (t)	52,465.28
$CO$ (t)	3,562.19
$CH_4$ (t)	156.28
$N_2O$ (t)	8.67
$NO_x$ (t)	100.60

Tabla 4.III: Experimento 1: Simulación 3

<b>Simulación 3</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	1378
Área Quemada Pastizales (ha)	252
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	1126
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	46,329.09
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	86,756.28
$CO_2$ (t)	72,729.14
$CO$ (t)	4,920.17
$CH_4$ (t)	215.63
$N_2O$ (t)	12.00
$NO_x$ (t)	139.78

A partir de esta información se realizó la siguiente matriz de comparación de pares, donde se ordenaron las simulaciones de menor a mayor área quemada y se dividió el resultado del  $CO_2eq$  entre las simulaciones de las filas por las de las columnas, entregando lo siguiente:

Tabla 4.IV: Experimento 1: Comparación de  $CO_2eq$  entre las simulaciones

	S1	S2	S3
<b>S1</b>	1.00		
<b>S2</b>	5.17	1.00	
<b>S3</b>	7.16	1.39	1.00

En esta matriz se muestra que el  $CO_2eq$  de la de la simulación 2 es 5.17 veces mayor que la que se liberó en la simulación 1, y la simulación 3 es 7.16 veces mayor, en cambio el  $CO_2eq$  liberado en la simulación 3 es 1.39 veces mayor a la de la simulación 2. Esto tiene directa relación con las áreas quemadas y el combustible consumido en las simulaciones.

De hecho, como se puede ver en el gráfico 4.iv que muestra las toneladas de  $CO_2eq$  a medida que avanzan los periodos en que ocurre el incendio en la simulación, a medida que

aumentan las horas aumenta la cantidad de  $CO_2eq$ , esto es debido a que aumenta el área quemada y el combustible consumido.

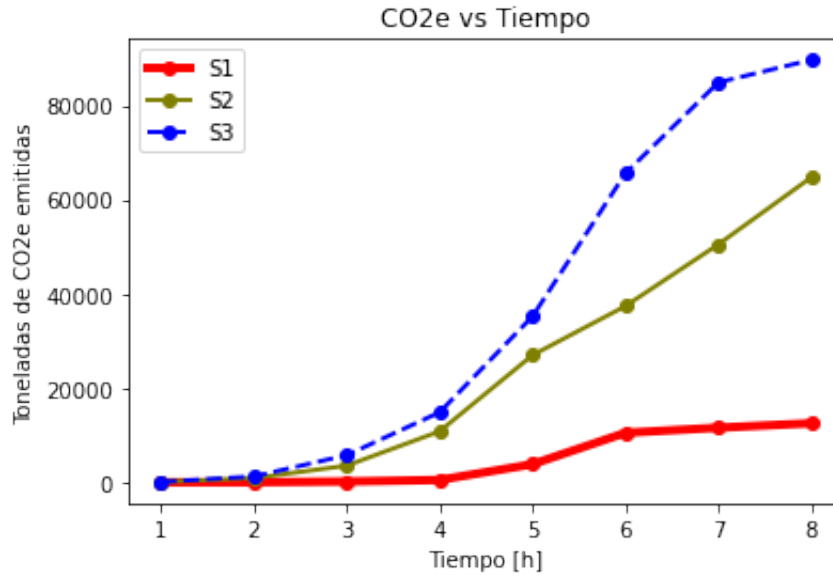


Figura 4.iv:  $CO_2eq$  a medida que avanza el incendio

Esto indicaría que medida que aumentaba el área quemada, aumenta a su vez el combustible consumido y el  $CO_2eq$ , por lo cual se ve una consistencia en la tabla 4.IV.

Al analizar los resultados, podemos ver una cierta proporcionalidad en el combustible quemado con el  $CO_2eq$  liberado, en cambio no existe una proporcionalidad entre el combustible consumido y el área quemada.

#### 4.1.2. Experimento 2:

En el segundo experimento se estudiaron 10 simulaciones, las cuales se generaron con climas y puntos de ignición aleatorias, para poder hacer más representativa la muestra de los incendios estudiados y así poder estudiar más a fondo la relación entre  $CO_2eq$  e áreas quemadas y si hay una influencia relevante del tipo de combustible que participa en la combustión en el  $CO_2eq$  liberado.

En la siguiente matriz de comparación se muestran las 10 simulaciones ordenadas de menor a mayor área quemada y la división entre  $CO_2eq$  de la simulación de la fila con la simulación de la columna:

Tabla 4.V: Experimento 2: Comparación de  $CO_2eq$  entre las simulaciones

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
S1	1.00									
S2	0.97	1.00								
S3	2.27	2.35	1.00							
S4	5.96	6.17	2.62	1.00						
S5	6.70	6.93	2.95	1.12	1.00					
S6	9.56	9.89	4.21	1.60	1.43	1.00				
S7	10.07	10.42	4.43	1.69	1.50	1.05	1.00			
S8	14.19	14.69	6.25	2.38	2.12	1.49	1.41	1.00		
S9	13.99	14.48	6.16	2.35	2.09	1.46	1.39	0.99	1.00	
S10	19.12	19.79	8.42	3.21	2.85	2.00	1.90	1.35	1.37	1.00

Por cómo se encuentra compuesta la matriz, todos resultados en que la fracción mencionada anteriormente haya dado menor a cero, indica que esa simulación pese a tener una mayor área quemada el  $CO_2eq$  liberado es menor. Esto ocurre entre las simulaciones S1 y S2 y de igual forma entre la S8 y S9, a continuación, vamos a ver más en detalle cómo fueron estos incendios.

Tabla 4.VI: Experimento 2: Simulación 1

<b>Simulación 1</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	88
Área Quemada Pastizales (ha)	28
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	60
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	2,558.83
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	4,945.25
$CO_2$ (t)	4,019.12
$CO$ (t)	269.68
$CH_4$ (t)	11.79
$N_2O$ (t)	0.66
$NO_x$ (t)	7.76



Tabla 4.VII: Experimento 2: Simulación 2

<b>Simulación 2</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	97
Área Quemada Pastizales (ha)	21
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	76
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	2,471.51
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	4,779.02
$CO_2$ (t)	3,881.03
$CO$ (t)	261.36
$CH_4$ (t)	11.44
$N_2O$ (t)	0.64
$NO_x$ (t)	7.48

Tabla 4.VIII: Experimento 2: Simulación 8

<b>Simulación 8</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	975
Área Quemada Pastizales (ha)	78
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	897
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	36,251.27
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	70,193.34
$CO_2$ (t)	56,890.26
$CO$ (t)	3,867.42
$CH_4$ (t)	169.73
$N_2O$ (t)	9.41
$NO_x$ (t)	109.00

Tabla 4.IX: Experimento 2: Simulación 9

<b>Simulación 9</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	1126
Área Quemada Pastizales (ha)	273
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	853
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	35,779.17
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	69,197.21
$CO_2$ (t)	56,179.56
$CO$ (t)	3,788.24
$CH_4$ (t)	165.87
$N_2O$ (t)	9.25
$NO_x$ (t)	108.20

Como se puede ver al comparar la tabla 4.VI con la tabla 4.VII, el área quemada de la S1 es de 88 hectáreas y el área quemada de la S2 de 97 hectáreas. Sin embargo, el combustible

consumido de la S1 es mayor que el de la S2, entre estas dos simulaciones se puede notar una leve diferencia en la distribución del tipo de combustible del área quemada.

Al comparar la simulación 8 (ver tabla 4.VIII) con la simulación 9 (ver tabla 4.IX), se puede ver que el área quemada de la S9 aumenta mayormente en pastizales que en coníferas lo cual influye en el consumo de combustible, debido a que la biomasa disponible para la combustión disminuye, esto ocurre dado que los pastizales para este bosque están compuestos por Hierba Seca (O1a). Esto se puede ver en la tabla 3.III, en donde se ve la biomasa real disponible para la combustión ( $M_B \cdot C_f$ ), para cada uno de los tipos de combustibles del FBP System, esto se obtuvo al analizar las fórmulas de consumo de combustible de cada uno de los tipos de vegetación y asumiendo que se quema el todo el combustible disponible para la combustión.

Cabe destacar que hay que tener presente que no solo influye el combustible, sino que también cuanto se consume realmente dado que en el caso de las áreas que no corresponden a pasto, su consumo rara vez alcanza 100% y no siempre sube a copa el incendio por lo que no se consume el combustible disponible en la copa.

En este experimento se puede ver que a medida que aumenta el área quemada, no necesariamente aumenta el  $CO_2eq$ , lo cual se expresa en los datos de la tabla 4.V, donde los números menores a cero representan que hay un mayor  $CO_2eq$  en la simulación anterior pese a tener una menor área quemada.

## 4.2. Evaluando el carbono liberado en las simulaciones

### 4.2.1. Comparando Emisiones Obtenidas por Cell2Fire con las del IPCC

Para poder corroborar los valores que se estaban obteniendo en el simulador, se comparó el resultado obtenido con la fórmula genérica que propone el IPCC. Esto se realizó tanto para los resultados del experimento 1 como del experimento 2 y se estimaron distintos porcentajes de biomasa consumida para la fórmula del IPCC con el fin de encontrar además que porcentaje de consumo de biomasa se encontraba más cercano al entregado por el simulador.

A continuación, se muestran gráficos con el  $CO_2eq$  obtenido en las simulaciones del experimento 1 y 2, en contraste con el IPCC con el 100% de biomasa consumida.

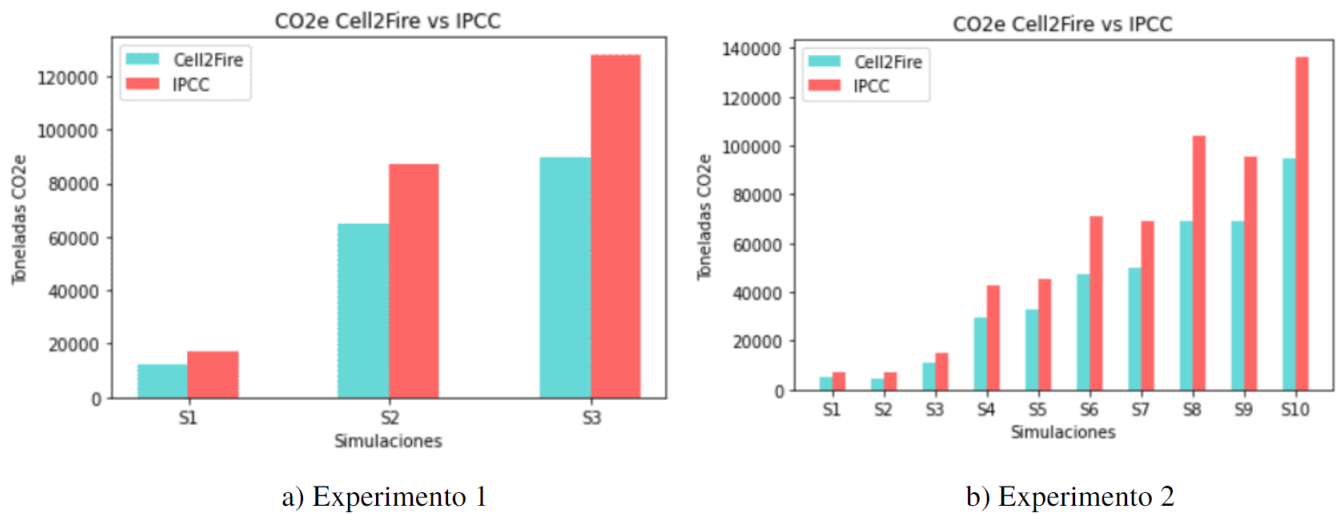


Figura 4.v: Resultados de Cell2Fire vs IPCC

Como se puede ver, las simulaciones distan mucho de lo que da el IPCC esto se debe a que Cell2Fire a través de la intensidad es capaz de simular distintas severidades del incendio en las distintas celdas afectadas, en otras palabras, Cell2Fire puede diferenciar cuando hay que afecta solo a la superficie de uno que sube a copa, además de poder tener un aproximado del combustible total que se quema de la biomasa disponible pre-incendio. Es por esto se calculó el resultado obtenido con el IPCC para distintos porcentajes de biomasa consumida.

Tabla 4.X: Tabla resumen de emisiones obtenidas con la fórmula del IPCC para los porcentajes de biomasa consumida más similares a lo obtenido con el simulador

Simulations	Cel2Fire	Porcentage de biomasa consumida IPCC		
		80 %	70 %	60 %
<b>S1</b>	12114.58	13892.63	12156.05	10419.48
<b>S2</b>	62619.81	69887.83	61151.86	52415.88
<b>S3</b>	86756.28	102563.71	89743.24	76922.78

Como se puede ver en ambos experimentos el resultado obtenido por el simulador se encuentra entre el resultado obtenido para el 80 % y 60 % de la biomasa consumida, al comparar el resultado del simulador con los obtenidos para el 70 % de la biomasa consumida, como se muestra en la figura 4.vi podemos notar que da mucho más cercano a lo que obtuvimos que lo que se obtiene con el 100 % de la biomasa consumida. Esto se debe a que como se mencionó anteriormente, Cell2Fire es capaz de simular distintas intensidades de incendio y con ello obtener distintas severidades, al considerar que en cada celda no se consume necesariamente todo el combustible disponible dado los distintos factores que hacen que esto no ocurra necesariamente.

Estos resultados indican que lo obtenido con Cell2Fire se encuentra dentro del rango esperado, dado que el simulador calcula el combustible consumido de manera más específica que el cálculo del IPCC al diferenciar entre fuego de copa o superficie y obtener además el consumo del combustible en cada celda ligado a las condiciones climáticas y topográficas,

Tabla 4.XI: Tabla resumen de emisiones obtenidas con la fórmula del IPCC para los porcentajes de biomasa consumida más similares a lo obtenido con el simulador

Simulations	Cel2Fire	Porcentage de biomasa consumida IPCC		
		80 %	70 %	60 %
S1	4945.25	5656.55	4949.48	4242.41
S2	4779.02	5736.38	5019.33	4302.29
S3	11233.98	11871.16	10387.27	8903.37
S4	29462.85	34173.26	29901.60	25629.94
S5	33124.17	36135.54	31618.59	27101.65
S6	47259.95	56718.03	49628.27	42538.52
S7	49819.90	55225.81	48322.58	41419.36
S8	70193.34	83267.30	72858.89	62450.47
S9	69197.21	76528.77	66962.68	57396.58
S10	94555.47	109154.66	95510.33	81866.00

además de considerar la intensidad del fuego.

Estos resultados coinciden con lo indicado en por Nancy H.F French, donde señalan que, pese a que el área quemada es un factor que se conoce que tiene incidencia en el total de emisiones de carbono producido por los incendios, también es de gran importancia la influencia que tienen los combustibles y la combustión producida tanto en la etapa de llama como en la etapa de combustión latente, pero que esta puede ser más difícil de cuantificar. (French et al., 2011).

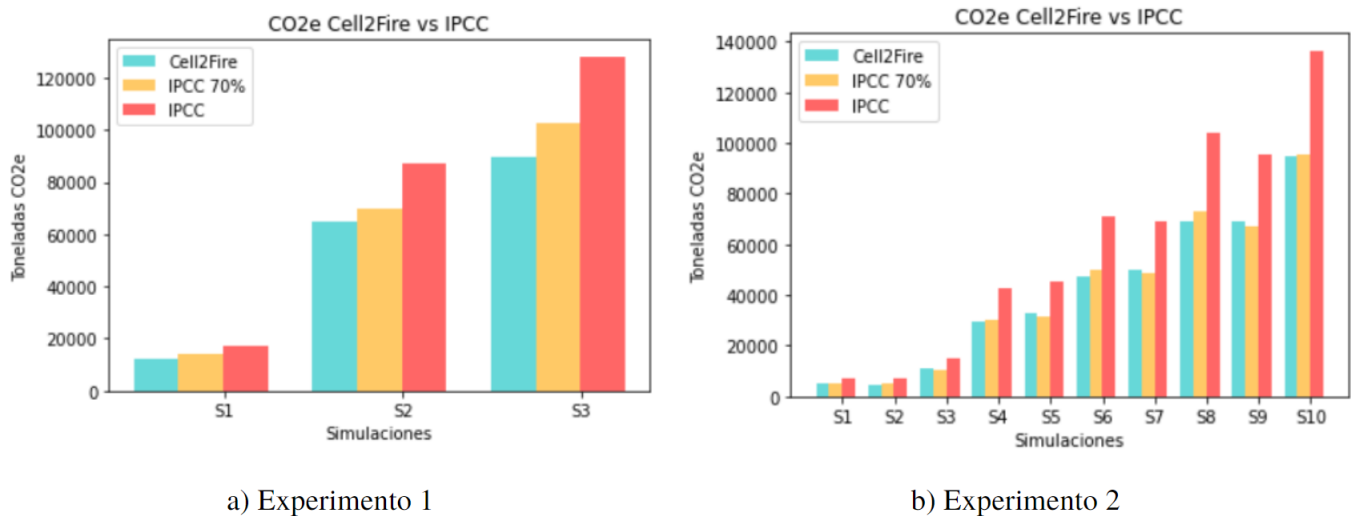


Figura 4.vi: Resultados de Cell2Fire vs IPCC para el 70% de la biomasa consumida

### 4.3. Localización de cortafuegos con el objetivo de disminuir el carbono emitido

Para la asignación de cortafuegos se realizaron 1000 simulaciones para el escenario del paisaje heterogéneo y para el homogéneo, estas simulaciones fueron construidas con puntos de ignición y condiciones climáticas aleatorias, se generaron con la misma semilla aleatoria y con climas que tenían un periodo de duración de 6 horas, se decidió utilizar este periodo de 6 horas dado que este paisaje forestal es pequeño (1600 celdas). En base a la data entregada del  $CO_2eq$  liberado por celda en las simulaciones para cada uno de los escenarios, se resolvió el problema de optimización de asignación de cortafuegos para mitigar las emisiones de GEI anunciado antes (Ver ecuación 3.5), en donde se buscó maximizar la expresión  $z = \sum_{j \in \mathcal{N}} DPV(j) \cdot x_j - \sum_{j \in \mathcal{N}} CO_2eq(j) \cdot x_j$ . Como solución de este problema para niveles de tratamiento de  $alpha$  0.01,0.03,0.05,0.07 y 0.10, se obtuvieron las celdas que se podrían como cortafuego, estas se pueden ver expresadas en los siguientes gráficos:

#### Escenario bosque heterogéneo:

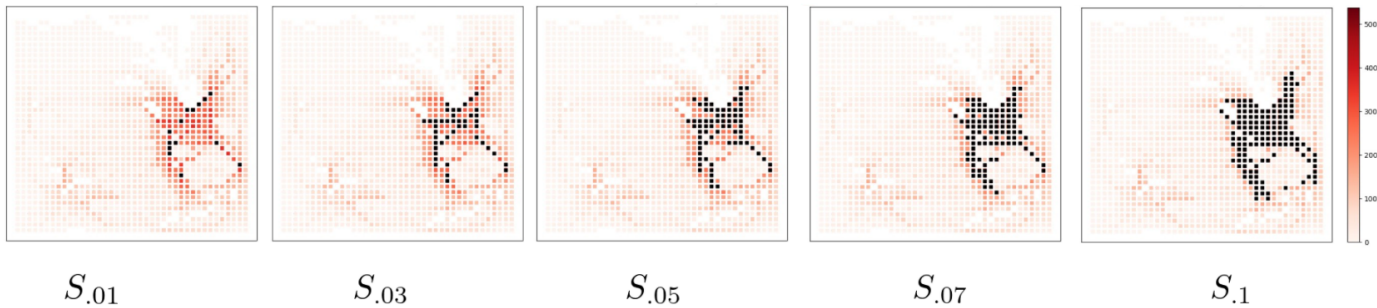


Figura 4.vii: Solución de la localización de cortafuegos para el caso heterogéneo

#### Escenario bosque homogéneo:

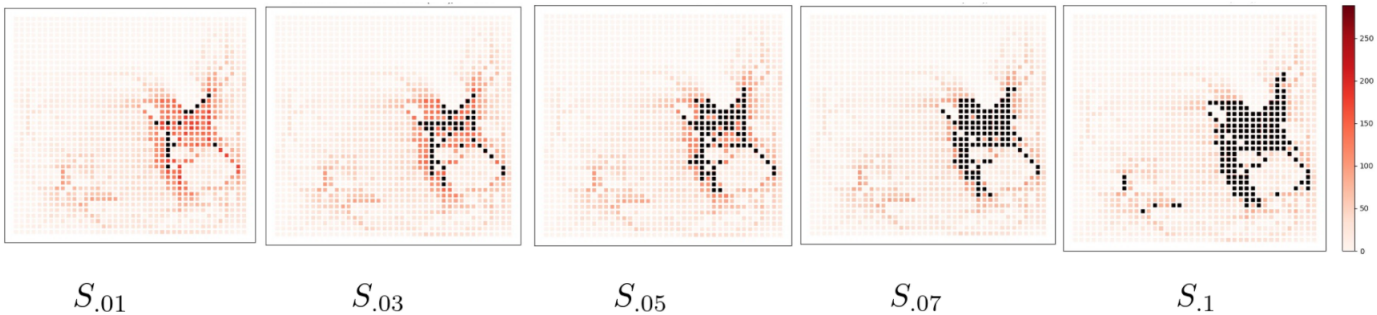


Figura 4.viii: Solución de la localización de cortafuegos para el caso heterogéneo

En las figuras 4.vii y 4.viii, las celdas pintadas de color negro representan la ubicación que tendrían los cortafuegos para los distintos porcentajes de tratamiento y las celdas más coloreadas representan las celdas con mayor  $z$ , para cada uno de los escenarios.

Se puede ver que la configuración no es tan distinta entre ambos escenarios, esto se debe a que, pese a que son distintos paisajes forestales en cuanto a tipo de combustible, ambos escenarios se hicieron en base a una misma semilla aleatoria por lo cual se seleccionaron climas y puntos de ignición iguales que para el caso anterior. Cabe destacar que en este escenario no había celdas que fuesen "Non Fuel" por lo cual la optimización para la localización de los cortafuegos se hace a partir de las celdas disponibles para combustión, el área que se asigna como cortafuego es mayor que en el caso anterior pese a que sean los mismos porcentajes.

### 4.3.1. Testeando la efectividad de los Cortafuegos

Para corroborar los resultados que se obtuvieron al resolver el problema de optimización enunciado, el cual tenía como objetivo dar una localización para los cortafuegos, se realizaron mil simulaciones para testear cada una de las configuraciones de cortafuegos (1 %, 3 %, 5 %, 7 % y 10 %) . Al correr las mil simulaciones para los distintos tratamientos, se agregó una perturbación en el ROS, lo cual generó un ruido en el crecimiento del incendio. Estas simulaciones fueron generadas con la misma semilla aleatoria que dio la ubicación de los cortafuegos.

Para poder ver si la pérdida de carbono, al realizar los cortafuegos, se compensaba con la disminución de carbono lograda por la gestión forestal, se sumó el carbono potencial que se emitiría al realizar los cortafuegos al carbono liberado por los distintos tratamientos. Para el calcular lo emitido por el cortafuego se consideró el  $CO_2eq$  potencial que tiene la celda que se cortó, para esto se tomó como si se quemara completamente, es por esto que algunos porcentajes ya no es eficiente, dado que en un incendio rara vez se quema toda la biomasa disponible, por lo que la cantidad de cortafuegos que hay para la reducción de  $CO_2eq$  que se genera no se compensa. Esto coincide con la afirmación de j.Campbell, quien señala que los tratamientos de reducción de combustibles convencionales generalmente eliminan más carbono del bosque que el eliminado por un incendio forestal. (Campbell, Harmon, y Mitchell, 2012).

Resultados obtenidos para los distintos niveles de tratamiento:

#### Bosque heterogéneo:

Net Average CO2e vs % Firebreaks, burnareas greater than 10% of the forest

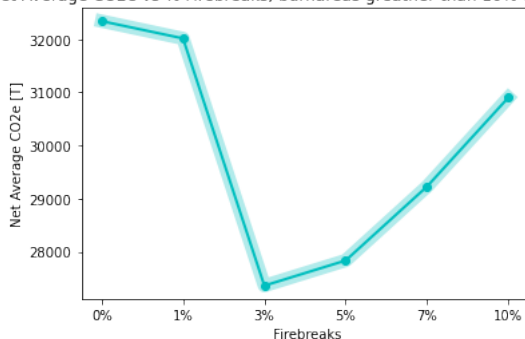


Figura 4.ix:  $CO_2eq$  promedio neto, para los distintos porcentajes de cortafuegos

#### Bosque homogéneo:

Net Average CO2e vs % Firebreaks, burnareas greater than 10% of the forest

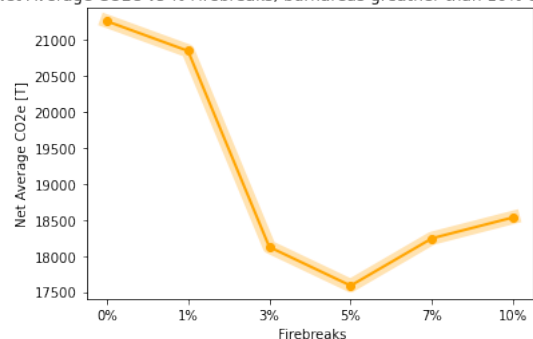


Figura 4.x:  $CO_2eq$  promedio neto, para los distintos porcentajes de cortafuegos

Para ambos escenarios se consideraron solamente los incendios que tuviesen áreas quema-

das superiores al 10% del bosque quemado, esto para evitar contabilizar incendios que se posicionarán cerca del borde del paisaje a estudiar que dadas las condiciones atmosféricas podrían haber tenido un crecimiento afuera de la grilla a estudiar.

En los gráficos se puede notar que el caso homogéneo (Fig.4.x) en general se emite menos que el heterogéneo (Fig.4.ix), pese a que en el heterogéneo hay celdas que no tienen combustible. Esto ocurre dado que el caso homogéneo, el cual se compone únicamente de combustible de tipo C1, el cual corresponde a bosque de abetos y líquenes. Este tipo de combustible tiene 22.5 t/ha de biomasa disponibles para la combustión, la cual es menor que la biomasa que tienen otras especies de coníferas (ver tabla 3.III), por lo cual en total este paisaje forestal tiene 36,000 t/ha de biomasa. Por otro lado, el paisaje heterogéneo se encuentra compuesto por 173 celdas de abetos y líquenes (tipo C1), 556 de abeto boreal (tipo C2), 120 de Jack maduro o pino Lodgepole (tipo C3) y 595 de Hierba espesa (tipo O1a), esto hace que este paisaje forestal tenga 45,503 t/ha de biomasa en total para la combustión, lo cual es más que el que contiene el paisaje homogéneo pese a que hay más continuidad en este paisaje al no tener celdas sin combustible, es por esto que se explica que el carbono liberado en este escenario sea menor que en el escenario heterogéneo.

En las simulaciones efectuadas en el escenario heterogéneo, el área quemada promedio sin tratamiento se encuentra cerca de un 35.5% del bosque. En el punto de inflexión de 3% de tratamiento, se logró disminuir en un 8.5% el área quemada de los incendios mientras que con un 5% de tratamiento se disminuyó un 10.8% lo cual es una disminución de un 2.3% de área quemada con respecto a la configuración anterior. Esta disminución no es suficiente para compensar el 2% de cortafuego adicional que se tiene, esto dado que el  $CO_2eq$  potencial de las celdas que se convierten en cortafuego se consideró como si toda la biomasa se emitiera, lo cual en los incendios rara vez ocurre en las áreas que se queman, de hecho, como se puede ver en la parte anterior este porcentaje de biomasa que se quema predica por Cell2Fire, gira en torno al 70%. Es por esto que acá el tratamiento óptimo para este experimento es de 3%.

Por otro lado, en el escenario homogéneo si bien el porcentaje de celdas quemadas en los incendios es similar al anterior (35.7%), el punto de inflexión se da en el 5%, esto dado que en esta configuración con un 5% si se logró compensar el carbono perdido por el tratamiento, porque acá se genera una disminución de 12.1% en el área quemada, además este es el punto de inflexión porque con la configuración de tratamiento para el 7% del bosque, la disminución es de 13.3%, lo cual es sólo un 1.2% menos que con el tratamiento del 5%, con esto no se alcanzan a compensar las emisiones del 2% de área tratada adicional, dando como tratamiento óptimo de este experimento el de 5%.

Además, se puede notar que, en el caso homogéneo, los cortafuegos de 5%, 7% y 10% se compensaron mejor que en el caso anterior, esto se debe a que estos porcentajes de cortafuego disminuyeron en promedio más  $CO_2eq$  que, en el caso anterior, pero aun así solo para el tratamiento donde se trató el 5% del bosque se logra compensar esta disminución de  $CO_2eq$  con la que se emite potencialmente al hacer el cortafuego. Este porcentaje óptimo de cortafuego, que es mayor al del bosque heterogéneo, puede estar vinculada a que el paisaje homogéneo es un paisaje de mucha menor complejidad, al componerse solo de un tipo de combustible y no tener espacios sin combustible en su composición.

### 4.3.2. Alcances

Se trabajó con el simulador Cell2Fire en bosques canadienses dado que no existe un simulador de incendios en Chile que sea capaz de simular la intensidad en las celdas, lo cual está relacionado directamente con la severidad, está para los efectos de este estudio se entenderá como el impacto que tiene el fuego en la biomasa consumida y el área afectada en un incendio. Además, para obtener un cálculo de las emisiones más cercano a la realidad se necesita diferenciar si hay o no coronación en el incendio.

Dentro de las limitaciones del estudio se tiene que se utilizaron los datos de emisiones del IPCC, los cuales diferenciaban entre dos tipos de combustibles en lugar de todos los combustibles del FBP System, además de no ser específicos para el tipo de vegetación. Otra limitación fue que para la obtener la biomasa inicial que había en el bosque y poder realizar la comparación con los cálculos del IPCC, se tuvo que hacer una estimación en base a las fórmulas de consumo de combustible que se tenían del FBP System, dado que no se contaba con la información de la carga de combustible pre-incendio. Además, el simulador Cell2Fire no considera el efecto *spotting* para el esparcimiento del fuego, este efecto consiste en la generación de incendios debido a la propagación de partículas de combustible propagadas por la dirección del viento (Martin y Hillen, 2016), esto podría causar diferencias en la efectividad del cortafuego para proteger la zona seleccionada.

Para realizar una mejora en un futuro estudio, habría que calcular los factores de emisiones para los distintos gases en base a registros de biomasa pre y post incendio de los bosques canadiense. Además, convendría ocupar este registro de biomasa pre-incendio para la comparación del resultado de Cell2Fire con la fórmula del IPCC. También, en relación con la heurística del cortafuego se podría mejorar si tanto la función objetivo, como en el análisis de la efectividad de los cortafuegos, se tuviera el  $CO_2eq$  real que se produce al hacer un cortafuego, dado que el que se utilizó que corresponde al potencial máximo que podría liberar cada celda. Para poder tener este valor es necesario tener datos específicos de las emisiones de la maquinaria que se utilizaría, los cuales no se tenían para esta investigación.

Por otro lado, si este cálculo de emisiones se quisiera realizar en Chile se necesitaría un simulador que tuviese a lo menos la capacidad de generar algún dato para poder identificar la severidad del incendio y diferenciar en fuego de copa o de superficie. También, se necesitaría una data de los climas que incluya factores como el viento, la humedad y una data actualizada de la biomasa del área forestal o en su defecto factores que permitieran modelar el consumo de combustible como se tiene en el FBP System. Actualmente en Chile se calculan las emisiones bajo el Nivel 1 del IPCC, dado que falta información específica de los factores de combustión por lo cual se están usando valores arbitrarios, pero distintas organizaciones están trabajando en obtener la data para generar factores específicos de combustión para los bosques de Chile.



# Capítulo 5

## Conclusiones

El presente estudio expone la implementación del cálculo de emisiones, mediante la búsqueda de una fórmula que permita obtener las emisiones de los distintos gases en el simulador Cell2Fire. La fórmula permite obtener las emisiones de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $NO_x$ , las cuales también se entregan convertidas a  $CO_2eq$ , estas emisiones son calculadas período a período que ocurre el incendio, por lo que se tienen las emisiones por cada hora de la simulación y por el total emitido en la simulación.

El cálculo de las emisiones en el simulador fue validado y calibrado en base a la fórmula general que tiene el IPCC para el Nivel 1 del cálculo de emisiones en los incendios forestales. Para esta validación se generaron dos experimentos de los cuales se obtuvo como principales conclusiones que los resultados obtenidos por Cell2Fire se encuentran dentro del rango esperado y que para el  $CO_2eq$  influye tanto el área quemada como el combustible quemado en esas áreas, el cual tiene una directa relación con la intensidad del incendio. Además de esto se vio que el simulador predice entre un 60-80 % de biomasa consumida en los incendios.

Luego, se implementó una heurística para localizar cortafuegos de manera tal de disminuir el  $CO_2eq$  liberado en las simulaciones y se testeó el resultado de las ubicaciones de cortafuego entregados por la solución del problema de optimización para los distintos porcentajes de tratamiento en ambos escenarios estudiados. De esto se obtuvo como resultado que, para estos dos casos estudiados, el tratamiento más efectivo para el caso heterogéneo fue de un 3 % del bosque disponible, mientras que en el homogéneo el de 5 % dio una mayor efectividad. Esta diferencia en la eficacia del tratamiento para reducir el  $CO_2eq$ , tiene relación con la diferencia en la configuración de ambos bosques, dado que por un lado se tiene un bosque real con varios tipos de combustible y zonas sin combustible, en cambio en el otro escenario se tiene un bosque homogéneo compuesto solamente por abetos y líquenes, por lo cual es un bosque de menor complejidad.

# Bibliografía

- Ager, A. A., Vaillant, N. M., y Finney, M. A. (2010). A comparison of landscape fuel treatment strategies to mitigate wildland fire risk in the urban interface and preserve old forest structure. *Forest Ecology and Management*, 259(8), 1556–1570.
- Anderegg, W. R., Trugman, A. T., Badgley, G., Anderson, C. M., Bartuska, A., Ciais, P., ... Randerson, J. T. (2020). Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 368(6497). doi: 10.1126/science.aaz7005
- Campbell, J. L., Harmon, M. E., y Mitchell, S. R. (2012). Can fuel-reduction treatments really increase forest carbon storage in the western US by reducing future fire emissions? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(2), 83–90. doi: 10.1890/110057
- Canadell, J., Monteiro, P., Costa, M., Cotrim da Cunha, L., Cox, P., Eliseev, A. V., ... Zickfeld, K. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. En V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), (cap. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks). UK: Cambridge University Press.
- Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*. (s.f.).
- Convención Marco sobre el Cambio Climático, C. (s.f.). *Glossary*.
- Fire Danger Group, F. C. (1992). *Development and structure of the canadian forest fire behavior prediction system*. Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate.
- French, N. H., De Groot, W. J., Jenkins, L. K., Rogers, B. M., Alvarado, E., Amiro, B., ... Turetsky, M. (2011). Model comparisons for estimating carbon emissions from North American wildland fire. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(2). doi: 10.1029/2010JG001469
- Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories, I., Greenhouse, N., y Inventories, G. (2006). Chapter 2 Generic Methodologies Applicable To Multiple Land-. , 1–59.
- Gonzalez, M. E., Sapiains A., R., Gómez-González, S., Garreaud, R. D., Miranda, A., Galleguillos, M., ... Castillo, I. (2020). Informe a las naciones: Incendios en Chile: causas, impactos y resiliencia. *CR2 publication*, 1–84.
- Government of Canada, I. (2017). *Fire monitoring and reporting tool*.
- Groot, B. (2009). *Canadian Fire Effects Model: Modeling wildland fire behaviour and fire effects*.
- Heward, H. (2019). Surface fire. En S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of wildfires and*

*wildland-urban interface (wui) fires* (pp. 1–5). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-51727-8\_211-1

- J.Carrasco. (2019). *Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty* (Tesis Doctoral).
- K.G.Hirsch. (1996). *Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: user's guide*.
- Martin, J., y Hillen, T. (2016). The spotting distribution of wild fires. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(6). doi: 10.3390/app6060177
- Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., . . . Patch, N. (2019, 11). Forest Management for Carbon Sequestration and Climate Adaptation. *Journal of Forestry*, 118(1), 86–101. doi: 10.1093/jofore/fvz062
- Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., . . . Patch, N. (2020). Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. *Journal of Forestry*, 118(1), 86–101. doi: 10.1093/jofore/fvz062
- Ottmar, R. (2009). Consume 3 . 0 — A Software Tool for Computing Fuel Consumption. *Fire Science Brief*(55), 1–6.
- Pinault, J. L. (2018). Anthropogenic and natural radiative forcing: Positive feedbacks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(4). doi: 10.3390/jmse6040146
- Reardon, J. (2019). Ground fire. En S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of wildfires and wildland-urban interface (wui) fires* (pp. 1–6). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-51727-8\_27-1
- Sources, G. G. A. S., y Canada, S. I. N. (2019). *National inventory report 1990 –2017: Part 1*.
- Xanthopoulos, G., y Athanasiou, M. (2020). Crown fire. En S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of wildfires and wildland-urban interface (wui) fires* (pp. 183–197). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-52090-2\_13

# Anexo A

## A.1. Marco teórico

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

Figura A.1: Valores para calcular el ROS para cada tipo de combustible

## A.2. Resultados

## A.2.1. Simulaciones

Tabla A.1: Experimento 2: Simulación 3

<b>Simulación 3</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	171
Área Quemada Pastizales (ha)	0
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	171
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	5,799.08
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	11,233.98
$CO_2$ (t)	9,098.75
$CO$ (t)	620.50
$CH_4$ (t)	27.26
$N_2O$ (t)	1.51
$NO_x$ (t)	17.40

Tabla A.2: Experimento 2: Simulación 4

<b>Simulación 4</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	501
Área Quemada Pastizales (ha)	108
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	393
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	15,232.31
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	29,462.85
$CO_2$ (t)	23,916.13
$CO$ (t)	1,613.98
$CH_4$ (t)	70.68
$N_2O$ (t)	3.94
$NO_x$ (t)	46.04

Tabla A.3: Experimento 2: Simulación 5

<b>Simulación 5</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	586
Área Quemada Pastizales (ha)	128
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	458
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	17,126.63
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	33,124.17
$CO_2$ (t)	26,891.40
$CO$ (t)	1,813.73
$CH_4$ (t)	79.42
$N_2O$ (t)	4.43
$NO_x$ (t)	51.78

Tabla A.4: Experimento 2: Simulación 6

<b>Simulación 6</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	662
Área Quemada Pastizales (ha)	35
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	627
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	24,403.57
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	47,259.95
$CO_2$ (t)	38,294.59
$CO$ (t)	2,606.04
$CH_4$ (t)	114.40
$N_2O$ (t)	6.34
$NO_x$ (t)	73.32

Tabla A.5: Experimento 2: Simulación 7

<b>Simulación 7</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	862
Área Quemada Pastizales (ha)	259
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	603
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	25,773.41
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	49,819.90
$CO_2$ (t)	40,478.36
$CO$ (t)	2,719.68
$CH_4$ (t)	118.96
$N_2O$ (t)	6.66
$NO_x$ (t)	78.14

Tabla A.6: Experimento 2: Simulación 10

<b>Simulación 10</b>	
<b>Área Quemada(ha)</b>	1368
Área Quemada Pastizales (ha)	140
Área Quemada Bosque Mixto y Coníferas (ha)	1228
<b>Total del Combustible Consumido (t)</b>	48,840.61
<b>Total GHG (t <math>CO_2eq</math>)</b>	94,555.47
$CO_2$ (t)	76,652.48
$CO$ (t)	5,205.37
$CH_4$ (t)	228.37
$N_2O$ (t)	12.67
$NO_x$ (t)	146.96

## A.2.2. Cálculos realizados Biomasa disponible

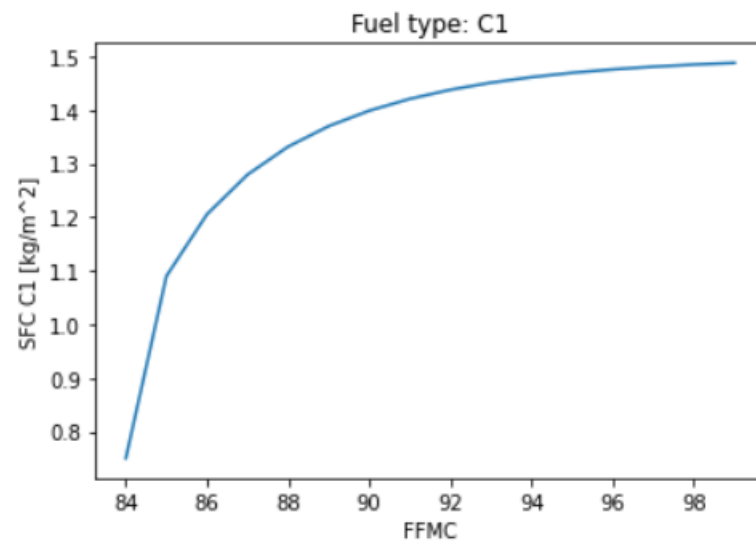


Figura A.2: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C1

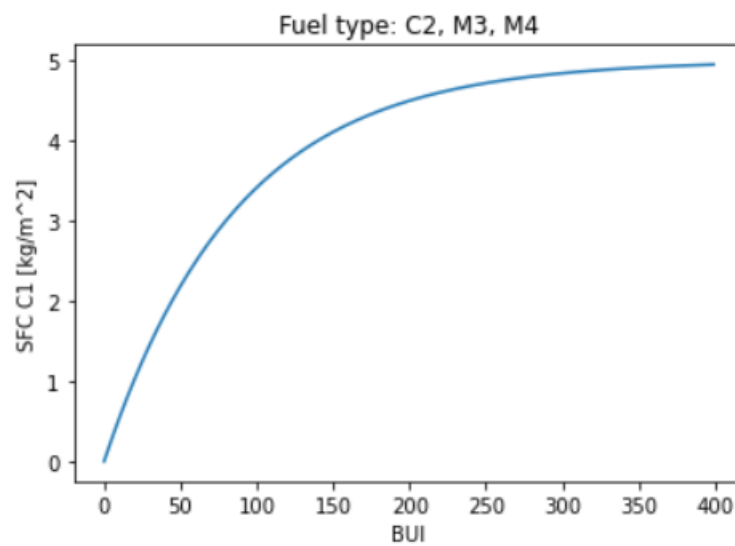


Figura A.3: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C2, M3, M4

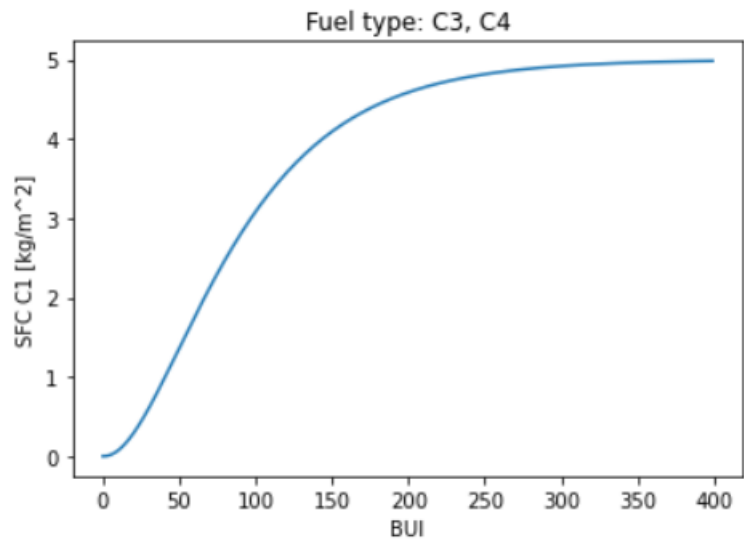


Figura A.4: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C3,C4

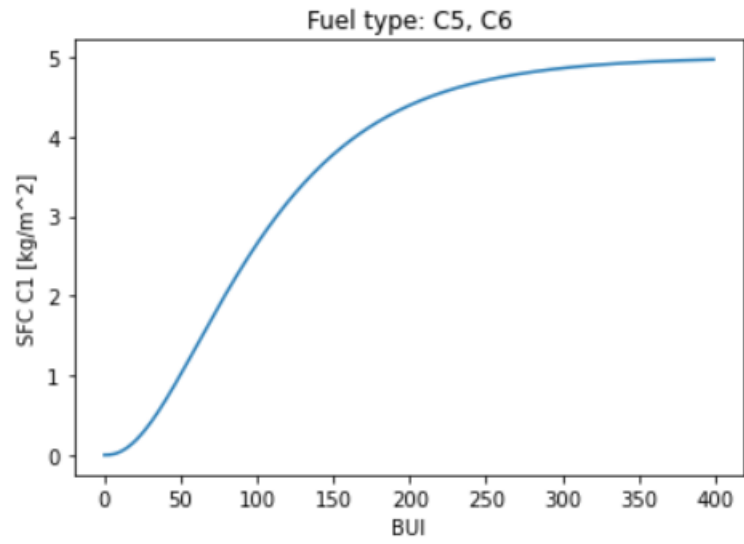


Figura A.5: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C5, C6



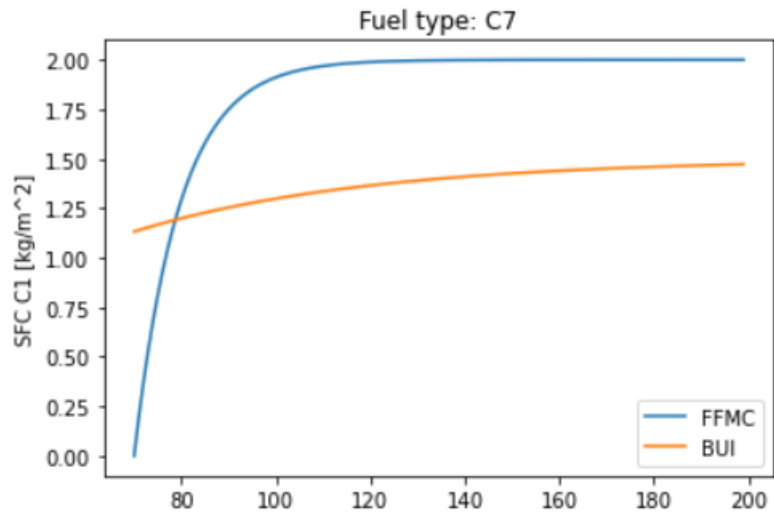


Figura A.6: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo C7

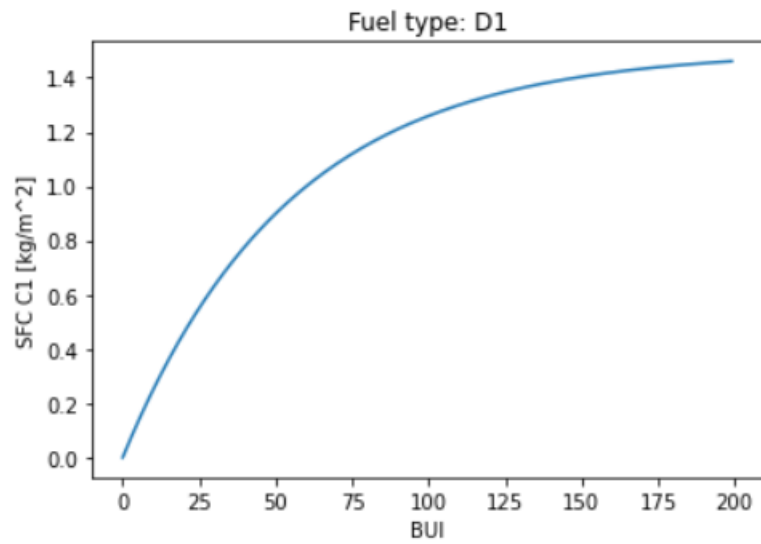


Figura A.7: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo D1

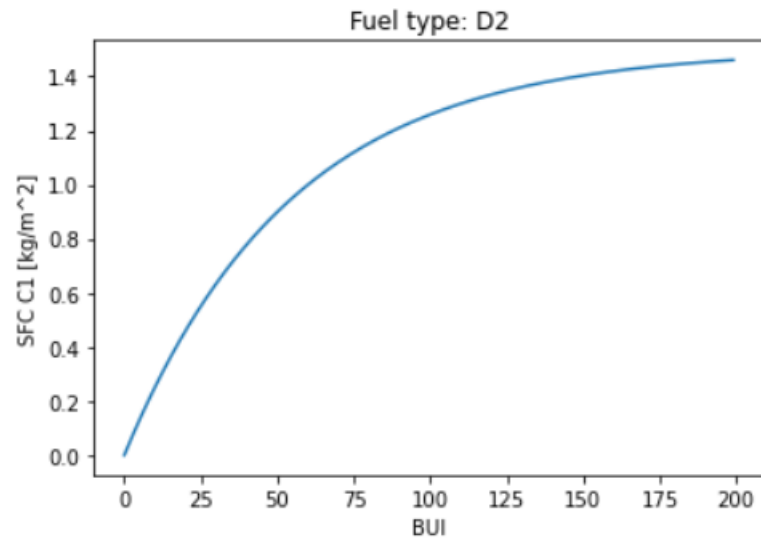


Figura A.8: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo D2

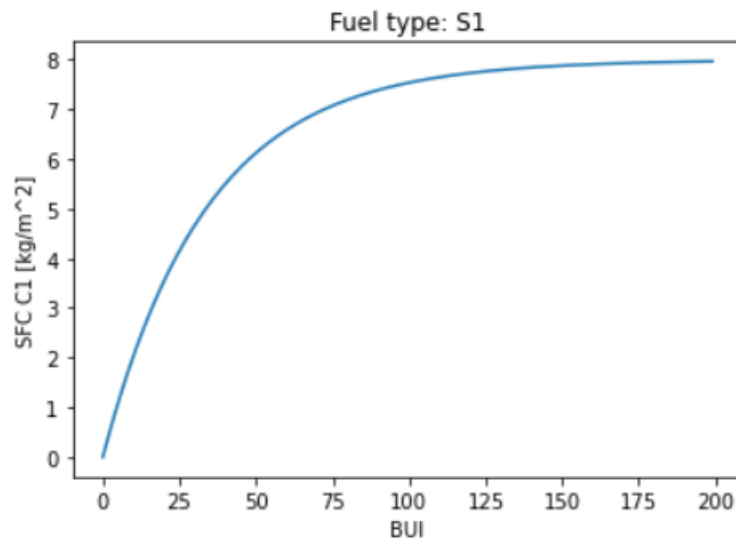


Figura A.9: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S1

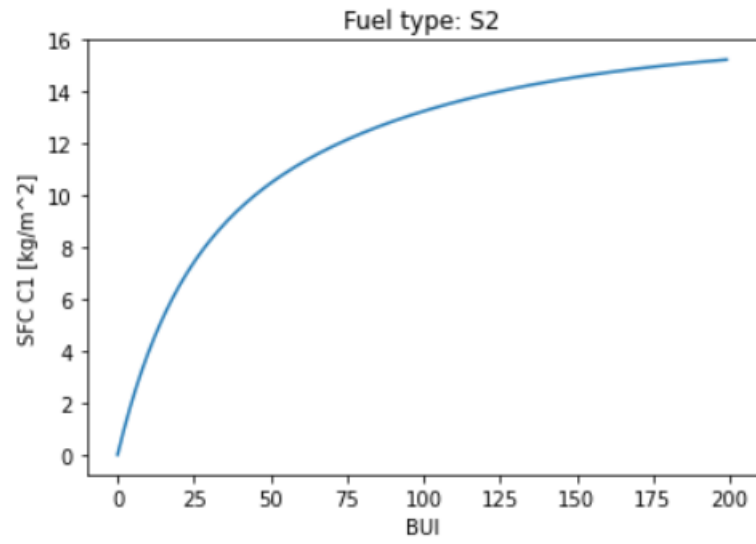


Figura A.10: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S2

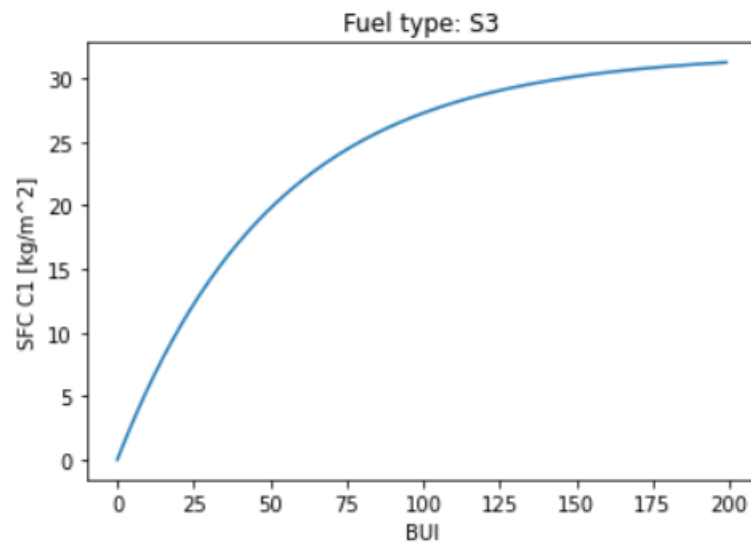


Figura A.11: Biomasa disponible para combustible en celdas tipo S3