



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A. C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Modelo matemático-numérico para simular la
propagación de incendios forestales**

Tesis que presenta

Luz Patricia Fernández Medina

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:

Dr. José Noel Carbajal Pérez

San Luis Potosí, S.L.P., 16 de Octubre del 2015.



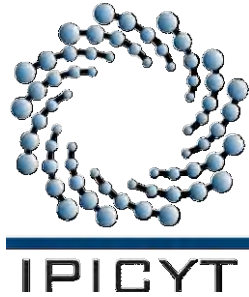
Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Modelo matemático-numérico para simular la propagación de incendios forestales**" presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Luz Patricia Fernández Medina** y aprobada el **dieciséis de octubre del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Director de la tesis

Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez
Miembro del Comité Tutorial

Dr. José Tuxpan Vargas
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (559368) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 011 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de octubre del año 2015, se reunió a las 17:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Noel Carbajal Pérez	Presidente	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Secretario	IPICYT
Dr. Juan Heberto Gaviño Rodríguez	Sinodal externo	CEUNIVO

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

Luz Patricia Fernández Medina

sobre la Tesis intitulada:

Modelo matemático-numérico para simular la propagación de incendios forestales

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Noel Carbajal Pérez


El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 18:23 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de octubre de 2015.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



A mi madre Ma. Luisa.

*Por su amor,
su total apoyo incondicional
y por siempre impulsarme a seguir.*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Ma. Luisa por ser mi gran apoyo en todo momento, motivándome y dándome la oportunidad de siempre intentar más. Por haberme enseñado que con esfuerzo y dedicación, las cosas se pueden lograr.

A mis hermanos Vero, Adriana, Juan y Luis porque siempre están presentes formando parte de cualquier aventura a pesar de la distancia.

A mis sobrinos Mayra, Carlos, Karla, Omar, Arianna, Natalia, Lilian y Jimena porque forman parte fundamental de mi motivación, agregando esa increíble chispa de alegría.

A Aleida porque aún y en la distancia siempre me ha estado acompañando, brindándome su valiosa amistad, cariño y apoyo incondicional.

Al mi director de tesis el Dr. Noel Carbajal, por darme la confianza para desarrollar esta tesis. Por el gran apoyo, la paciencia, las enseñanzas e ideas durante la realización de este trabajo. Por la motivación, teniendo siempre las palabras adecuadas para continuar.

A mis asesores de tesis, el Dr. José Tuxpan y el Dr. Juan Gaviño por sus aportaciones durante el desarrollo de este trabajo.

Al CONACYT y el IPICYT por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

A mi familia potosina, esos compañeros que se volvieron mis buenos amigos, la Lic (Regina), Nachito, Jafets, Efrén, Fermin, Luis porque formaron parte importantísima durante mi estancia en San Luis, apoyándome en momentos buenos y malos, haciendo más fácil el estar lejos de casa.

A esos compañeros que me brindaron su apoyo y amistad, Ángeles, Luz Neri, Robert, Edgar, Yan , Sonia.

A mis compañeros de generación Regina, Jafet, Nachito, Gil, Jesús, Oscar, Panchito, Alex por las experiencias y enseñanzas compartidas durante la maestría.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo y formaron parte de esta historia.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	X
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO 1. INCENDIOS FORESTALES: PROBLEMÁTICA GLOBAL	1
1.1 Tipos de incendios.	2
1.2 Efectos ambientales.	3
1.3 Incendios forestales en México.	4
1.3.1 Registro de incendios: número y superficie afectada	5
1.3.2 Detección de puntos de calor	7
1.3.3 Algunos casos particulares de incendios	9
1.4 Propagación de incendios.	11
CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS.	14
2.1 Factores ambientales	14
2.1.1 Factores meteorológicos	14
2.1.2 Factores topográficos	15
2.1.3 Factores de combustible forestal	15
CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO.	19
3.1 Discretización numérica.	25
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.	28
4.1 Ecuación de Stefan-Boltzmann	28
4.2 Malla de distribución aleatoria	29

4.3 Emisión y captación de energía	32
4.4 Parámetro alfa	34
4.5 Subdominios	38
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Distribución geográfica de zonas afectadas por incendios (Imagen disponible en: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/firemaps.cgi>)* 4
- Figura 1.2. Tipos de vegetación predominante en México (Datos: CONAFOR, 2013).* 5
- Figura 1.3. Números de incendios forestales ocurridos en México 1998-2012. Datos: CONAFOR.* 6
- Figura 1.4. Superficie afectada (Ha) por incendios forestales en México, período 1998-2012. Datos: CONAFOR.* 7
- Figura 1.5. Puntos de calor diurnos y nocturnos detectados por sensores MODIS y VIIRS en el período 5/Mayo/2015-10/Mayo2015. (Imagen obtenida de CONABIO. <http://incendios1.conabio.gob.mx/>).* 8
- Figura 1.6. Imagen satelital de incendios ocurridos al sur del país el 2/Mayo/2013. Fuente: NASA. (Imagen disponible en <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/single.cgi?image=Mexico.A2013122.1945.1km.jpg>)* 9
- Figura 1.7 Incendios El Bonito y La Sabina al norte de México en el estado de Coahuila. a) muestra densas plumas de humo hacia el noreste, b) incluye infrarojo y luz visible, muestra una vista a través del humo el terreno recientemente quemado. Imagen tomada por el satélite Landsat 5, el 9 de Abril del 2011. Fuente: Nasa. <http://landsat.visibleearth.nasa.gov/view.php?id=50087>* 10
- Figura 2.1. Esquema de clasificación de los factores ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los incendios forestales. Información obtenida de (Julio y Giroz, 1975).* 16
- Figura 2.2. Representación esquemática de la circulación atmosférica generada por el fuego. Imagen obtenida de (Potter E., 2002).* 18
- Figura 3.1. Representación de un elemento de volumen V que está recibiendo calor por flujos a través de los elementos de su superficie ds, desde una fuente que irradia calor.* 19
- Figura 4.1. Imagen de un bosque visto desde arriba. Foto aérea Bosque Patagonia, parque nacional Lanín, Argentina. Fuente: Eric R Schroeder.* 29
- Figura 4.2. Esquema representativo de un bosque dentro de un dominio de malla. Foto aérea Bosque Patagonia, parque nacional Lanín, Argentina. Fuente: Eric R Schroeder. Imagen modificada.* 30
- Figura 4.3. Esquema de una matriz de dimensión 10x10 con entradas 1's (árbol) y 0's (no árbol) distribuidas aleatoriamente.* 31

<i>Figura 4.4. Representación de un dominio de 100 celdas con resolución de 10m x 10m. En él se muestra una distribución aleatoria de árboles.</i>	31
<i>Figura 4.5. Representación esquemática de un árbol en ignición (A) emitiendo energía y un árbol (B) recibiendo energía, la que capta en un círculo del radio de su copa.</i>	33
<i>Figura 4.6. Curva de temperatura del árbol A con respecto al tiempo.</i>	33
<i>Figura 4.7. Esquema de la energía emitida por A y captada por B con el método de las esferas.</i>	36
<i>Figura 4.8. Esquema de una vecindad definida de árboles B afectados por la radiación del árbol A en el dominio de distribución.</i>	39
<i>Figura 4.9. Ilustración del problema de combinatoria con los subdominios que se van creando de acuerdo al criterio de la temperatura.</i>	40
<i>Figura 5.1. Malla binaria de distribución de árboles</i>	42
<i>Figura 5.2. Esquema representativo de la distribución aleatoria de árboles en un dominio de 1Km x 1Km, con la posición del incendio.</i>	43
<i>Figura 5.3. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 500 iteraciones.</i>	44
<i>Figura 5.4. Gráficas de temperatura de la simulación de propagación del incendio en las iteraciones: a) 1, b) 125, c) 250 y d) 375</i>	46
<i>Figura 5.5. Temperatura del incendio en la iteración 500</i>	47
<i>Figura 5.6. Posibles direcciones preferenciales por efecto del viento para la propagación del incendio.</i>	48
<i>Figura 5.7. Gráficas de temperatura con dirección preferencial 1, bajo condiciones de viento. a) Iteración 1, b) iteración 150, c) iteración 200 y d) iteración 350.</i>	49
<i>Figura 5.8. Temperatura en la iteración 500 con dirección preferencial 1.</i>	50
<i>Figura 5.9. Gráficas de temperatura con dirección preferencial 6, bajo condiciones de viento. a) Iteración 50, b) iteración 220, c) iteración 400 y d) iteración 500.</i>	51
<i>Figura 5.10. Temperaturas de la propagación con dirección preferencial 3. a) Iteración 100, b) iteración 200, c) iteración 350 y d) iteración 500.</i>	52
<i>Figura 5.11. Gráficas de temperatura de la propagación con dirección 1 en las iteraciones: a) 100, b) 200, c) 350 y d) 500</i>	54
<i>Figura 5.12. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 500 iteraciones.</i>	55
<i>Figura 5.13. Gráficas de temperatura de la simulación de propagación del incendio con temperatura mayor. a) iteración 1, b) iteración 125, c) iteración 250 y d) iteración 375</i>	56
<i>Figura 5.14. Temperatura del incendio en la iteración 500</i>	57

- Figura 5.15. Esquema representativo de la distribución aleatoria de árboles en un dominio de 5Km x 5Km, que muestra la posición del incendio.* 58
- Figura 5.16. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 1000 iteraciones.* 58
- Figura 5.17. Gráficas de temperaturas de la propagación con $dt=1$, en las iteraciones: a) 250, b) 500, c) 750 y d) 1000* 60
- Figura 5.18. Gráficas de temperatura de la propagación con $dt=2$, en las iteraciones: a) 200, b) 450, c) 700 y d) 1000* 61
- Figura 5.19. Gráficas de temperatura de la propagación con $dt=3$, en las iteraciones: a) 100, b) 400, c) 700 y d) 1000* 63
- Figura 5.20. Gráficas de temperatura de la propagación con dirección preferencial 5 y $dt=2$, en las iteraciones: a) 100, b) 400, c) 700 y d) 950.* 64

RESUMEN

Las emisiones de aerosoles por incendios forestales representan un problema ambiental global. Se han efectuado muchos estudios sobre las cantidades de contaminantes emitidos a la atmósfera. El problema de la propagación de los incendios mismos en los diferentes ecosistemas en que ocurren no se ha investigado lo suficiente como para tener predicciones apropiadas que permitan tomar medidas preventivas. En este trabajo de investigación se presenta un modelo matemático para simular la propagación de incendios forestales en bosques. Para este fin se desarrolló una base teórica sobre la conservación de calor. Las ecuaciones derivadas contienen términos de advección, divergencia y difusión de calor. En esta primera etapa, se consideró explícitamente el término de difusión de calor. Se aplicó conceptualmente lo que se llama un modelo de Montecarlo para simular la propagación de incendios forestales. Básicamente, las ecuaciones diferenciales parciales fueron sustituidas por la propagación de incendios mediante la aplicación de la fórmula de Stefan-Boltzmann para la emisión de radiación de cuerpo negro. En los experimentos numéricos realizados se generó una distribución aleatoria de árboles simulando un bosque. Posteriormente se inició un incendio forestal en un punto al azar, simplemente suponiendo que un árbol está incendiado. Por combinatoria y con la radiación emitida hacia otros árboles el incendio se propaga. Se consideran temperaturas de ignición, valores de capacidad calorífica, densidad de la madera, masa, constante de Stefan-Boltzmann. Se parametrizan otras variables esenciales para la propagación del incendio (coeficientes de la decadencia exponencial de la radiación, efectos de velocidad y dirección del viento). La velocidad de propagación de incendios y dirección preferencial de propagación por efecto del viento fueron simulados aceptablemente.

ABSTRACT

The aerosol emissions by wildfires are a global environmental problem. There have been many studies about the quantities of pollutants emitted into the atmosphere. The problem of the spread of the fires in different ecosystems in which they occur has not been investigated enough to have appropriate predictions that allow to take preventive measures. In this research we present a mathematical model to simulate the spread of wildfires in forests. For this purpose we developed a theoretical basis for the heat conservation. The derived equations contain advection terms, divergence terms and heat diffusion terms. In this first phase, only heat diffusion term was considered. Conceptually it applied what is called a Monte Carlo model to simulate the spread of wildfires. Basically, partial differential equations were replaced by the fire spread through the application of the Stefan-Boltzmann formula for the emission of black body radiation. In the numerical experiments performed a random distribution of trees were generated simulating a forest. Then a wildfire starts in a random point, simply assuming that a tree is burned. By combinatorial and with the radiation emitted towards other trees the fire spreads. They are considered ignition temperatures, heat capacity values, wood density, mass, Stefan-Boltzmann constant. And other important variables for the fire spread (coefficients of the exponential decay of the radiation, effects of wind speed and direction) are parameterized. The speed of fire spread and preferential direction of propagation by wind were acceptably simulated.

CAPÍTULO 1. INCENDIOS FORESTALES: PROBLEMÁTICA GLOBAL

Un incendio forestal se concibe como la propagación libre y no dispuesta del fuego sobre las superficies forestales, tales como: bosques, selvas, pastizal, matorral, entre otras, según la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Desde el punto de vista ambiental, ecológico, social, económico y humano, los incendios forestales son un problema serio, que año con año causan daños relevantes y afectan distintos ecosistemas en todo el mundo (Bianchini, 2006).

Estos fenómenos representan, entre otras cosas, perturbaciones en diversos ecosistemas que se pueden dar de forma paulatina o súbitamente y se ven alteradas las propiedades estructurales así como funcionales. Consecuente a ello, también pueden desencadenar profundas y rápidas transformaciones en el paisaje y en la vegetación de los ecosistemas naturales. Durante el proceso de combustión producen pérdida de nutrientes ya sea por volatilización o después de la combustión por erosión o lixiviación. Los incendios causan una destrucción de flora y fauna a nivel local, viéndose poblaciones directa o indirectamente perjudicadas por la inestabilidad que genera la falta de recursos disponibles (Lloret, 2004).

Desde el punto de vista positivo, aunque con menor aprecio, se sabe que producen un efecto fertilizador debido a la deposición de nutrientes después de la combustión (Lloret, 2004). En algunos ecosistemas el fuego sostiene un papel como regulador natural, es por esto que en muchas partes del mundo los incendios forestales ocurren en respuesta a comportamientos climáticos o a la propia adaptación natural de la vegetación a la combustión, principalmente en épocas de sequía (Castillo et al., 2003). Sin embargo, a través de los años, el fuego se ha utilizado por tradición como una herramienta para favorecer las prácticas agrícolas y ganaderas (Lloret, 2004). La quema de biomasa juega un papel directamente importante en la agricultura y la economía. Se usa para el cumplimiento de varios propósitos, como despejar bosques y matorrales para uso de tierras agrícolas, control de maleza y hierba en las tierras de cultivo, regeneración de nutrientes en pasto y tierras de cultivo, control de acumulación

de combustible en bosques, entre otros (Andreae, 1991). Por esto, es importante señalar que la gran mayoría de los incendios de una u otra forma son causados por acciones humanas (más del 90%). Más aún, cuando los bosques se encuentran devastados la ocurrencia de nuevos incendios arroja resultados peores debido a la vulnerabilidad, que aquellos que ocurren en bosques intactos (citado en Bianchini, 2006).

Cuando las condiciones meteorológicas son extremas como en temporadas de sequía, calor o viento fuerte, la ocurrencia de incendios se considera particularmente peligrosa. Por ejemplo, el verano del año 2003, el clima fue bastante caliente y en regiones como Portugal tan solo 420,000 hectáreas fueron quemadas y 20 personas murieron. También, en octubre del mismo año, los fuertes vientos ocasionaron un incendio prolongado en California arrojando daños de 300,000 hectáreas quemadas, 3361 casas destruidas y 26 personas murieron (Bianchini, 2006). De esto se desprende la importancia de predecir la propagación de incendios.

1.1 Tipos de incendios.

En el momento que la propagación del fuego se da sobre la superficie del terreno, de manera horizontal y alcanza una altura aproximada de metro y medio, se denomina incendio superficial (CONAFOR, 2010). El fuego consume todo tipo de combustibles (vivos y muertos) que con el tiempo se han acumulado sobre la superficie del suelo, como son, hierbas, zacates, leña, hojarasca, arbustos, entre otros. Pero sin quemar todo el cuerpo de los árboles (Villers y López, 2004).

Generalmente, cuando un incendio superficial se propaga bajo el suelo, se convierte en un incendio subterráneo. En éste tipo de incendios la materia acumulada puede ser quemada por períodos largos. Comúnmente, no producen llamas y emiten poco humo (CONAFOR, 2010). El fuego quema el mantillo y las raíces que se encuentran bajo la superficie del suelo o la materia almacenada en las fracturas de grandes afloramientos rocosos (Villers y López, 2004). Finalmente, cuando el incendio comienza en forma superficial, pero ahora las llamas avanzan sobre el nivel del suelo para después propagarse por la vertical de manera continua, se denominan incendio de copas. Aquí, el fuego usa la

vegetación propensa hacia arriba como combustible para subir hacia las copas o coronas de los árboles. Aunque también pueden darse de manera externa, es decir, independiente del entorno y de la vulnerabilidad del área forestal, por ejemplo, al caer un rayo sobre un árbol. Estos incendios suelen ser los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar, debido a que acaba con la mayoría de la vegetación (CONAFOR, 2010).

Es importante destacar que la velocidad de propagación es variable conforme al tipo de incendio en proceso. Es decir, mientras que un incendio subterráneo se puede desplazar a un ritmo de algunos metros al día, un incendio superficial puede alcanzar un ritmo de 50-200 metros por hora, esto sin influencia del viento y en superficies planas. En cambio, con los incendios de copa o aéreos, el ritmo de propagación es más incierto, ya que en algunas ocasiones se pueden propagar a velocidades de 5, 10 o tal vez más kilómetros por hora (Julio y Giroz, 1975).

1.2 Efectos ambientales.

El efecto inmediato que se observa cuando suceden este tipo de fenómenos, es la producción y emisión de gases y partículas a la atmósfera. La combustión de grandes cantidades de biomasa que proviene de recursos forestales como son bosques, praderas y tierras agrícolas, provoca la dispersión de gases químicamente activos como son: dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, entre otras partículas más pequeñas. Estos gases se consideran de efecto invernadero y contribuyen al calentamiento global, entre otras cosas, causando efectos negativos (Castillo et al., 2003). En los últimos años se han considerado como fuentes potenciales de emisión de contaminantes, por su gran implicación de manera directa en el incremento de bióxido de carbono en la atmósfera (Villers y López, 2004). Es conveniente resaltar que con la gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono que producen, representan aproximadamente el 25% de emisiones totales de este gas en el mundo (Castillo et al., 2003).

La pérdida de superficies forestales causada por incendios también tiene un gran impacto en la calidad del aire. Trae consecuencias inmediatas, a

mediano o largo plazo en los ecosistemas (Castillo et al., 2003). La erosión del suelo, así como el cambio en la estructura y composición en los bosques son efectos que se presentan activamente en la deforestación de las áreas naturales (Villers y López, 2004). Se estima que se pierden alrededor de 10 a 15 millones de hectáreas de bosques por año en regiones boreales y templadas, en regiones de bosques tropicales de 20 a 40 millones de hectáreas aproximadamente (Castillo et al., 2003).

En el siguiente mapa (*Figura 1.1*) se muestran los países y las regiones que son mayormente afectados por la ocurrencia de incendios forestales.

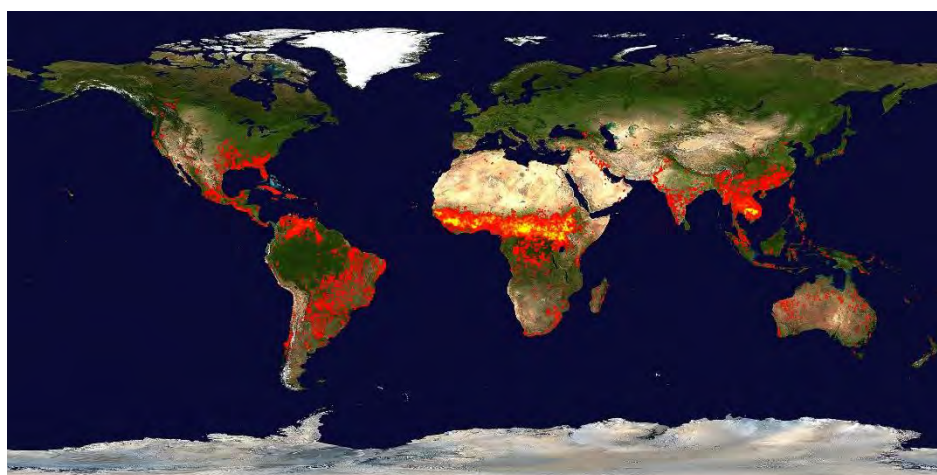


Figura 1.1. Distribución geográfica de zonas afectadas por incendios (Imagen disponible en: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/firemaps.cgi>)

El mapa muestra los puntos de incendios, acumulados en un período de 10 días (21/Enero/2015-30/Enero/2015) detectados por el sensor MODIS. El rango de color va de rojo donde el conteo de incendios es bajo, a amarillo donde el número de incendios es mayor.

1.3 Incendios forestales en México.

Las diferentes condiciones ambientales que se presentan en México originan una diversidad de ecosistemas. Y cada uno de estos ecosistemas produce combustible forestal, diferentes tanto en cantidad como en calidad. Lo que

resulta significativo eventualmente en el comportamiento del fuego al momento de presentarse un incendio (Carmona et al., 2011).

La cobertura vegetal en la República Mexicana representa el 71% (138 millones de hectáreas) de toda la superficie continental del territorio mexicano, el cual es 194.3 millones de hectáreas. Ésta cubierta, está compuesta de diversos tipos de vegetación, siendo los más predominantes y de mayor extensión: matorrales xerófilos, bosques templados y selva (CONAFOR, 2013). (Figura 1.2).

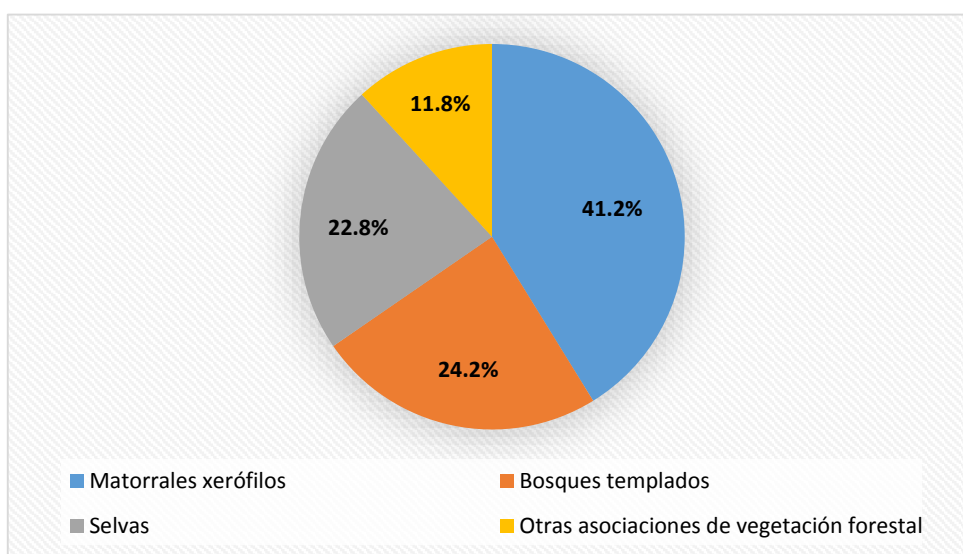


Figura 1.2. Tipos de vegetación predominante en México (Datos: CONAFOR, 2013).

1.3.1 Registro de incendios: número y superficie afectada

En materia de incendios forestales, el país se ve afectado frecuentemente por estos eventos. Cada año se registran miles, de los cuales, en promedio se documentan 8 mil al año. Se reconocen de diversas magnitudes, que varían por las condiciones climáticas y meteorológicas, entre otros factores dominantes, afectando en diferentes grados a los ecosistemas del país (CONAFOR).

El registro que se tiene se centra básicamente en dos indicadores: el *número de incendios*, como se muestra en la *Figura 1.3* el registro del período 1998 al 2012. Y la *superficie afectada* (*Figura 1.4*, período 1998-2012). A partir

de ellos, surge un tercero: la superficie promedio afectada por incendio (superficie afectada/ incendio) (CONAFOR).

Se puede ver en las dos gráficas que existe correlación con ambos indicadores, es decir, a mayor número de incendios, mayor superficie afectada. En algunos años tal vez no coincida, donde se registra menor número de incendios y mayor superficie afectada que en otros años donde se registraron un mayor número de incendios. Puede ser, por una parte a que los incendios hayan sido más devastadores o de mayor duración para haber afectado mayor superficie que los de otros años. O por otra parte a algún error en el registro de alguno de los dos indicadores.

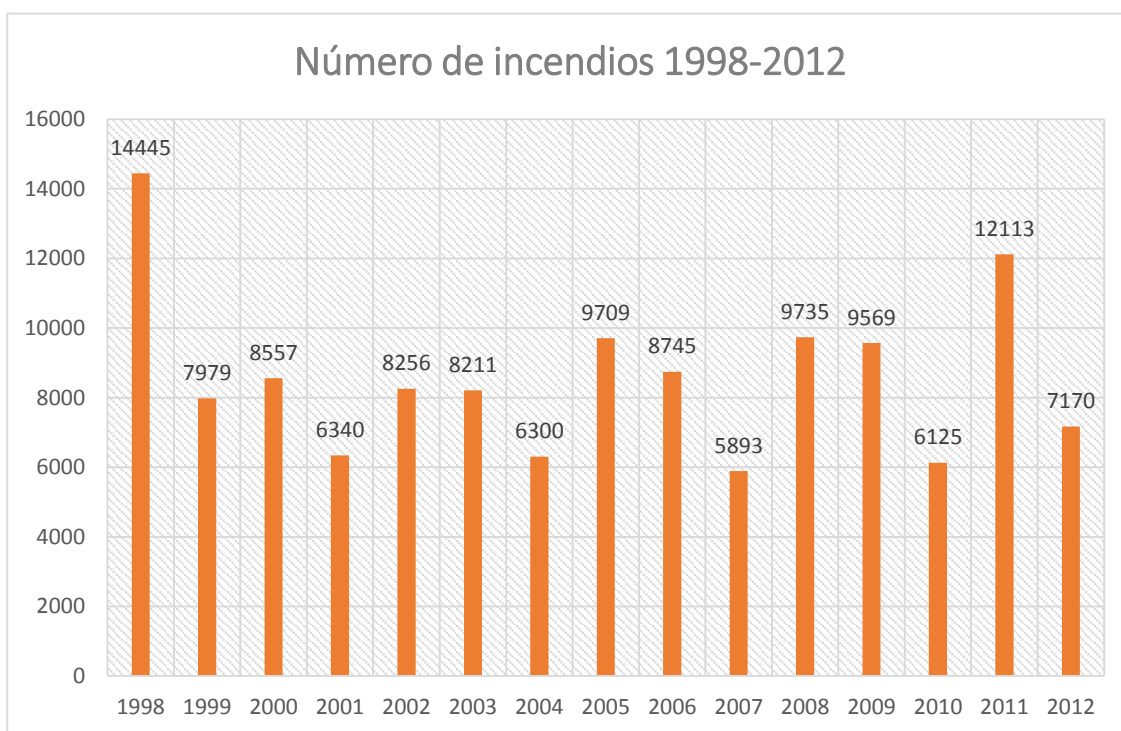


Figura 1.3. Números de incendios forestales ocurridos en México 1998-2012. Datos: CONAFOR.

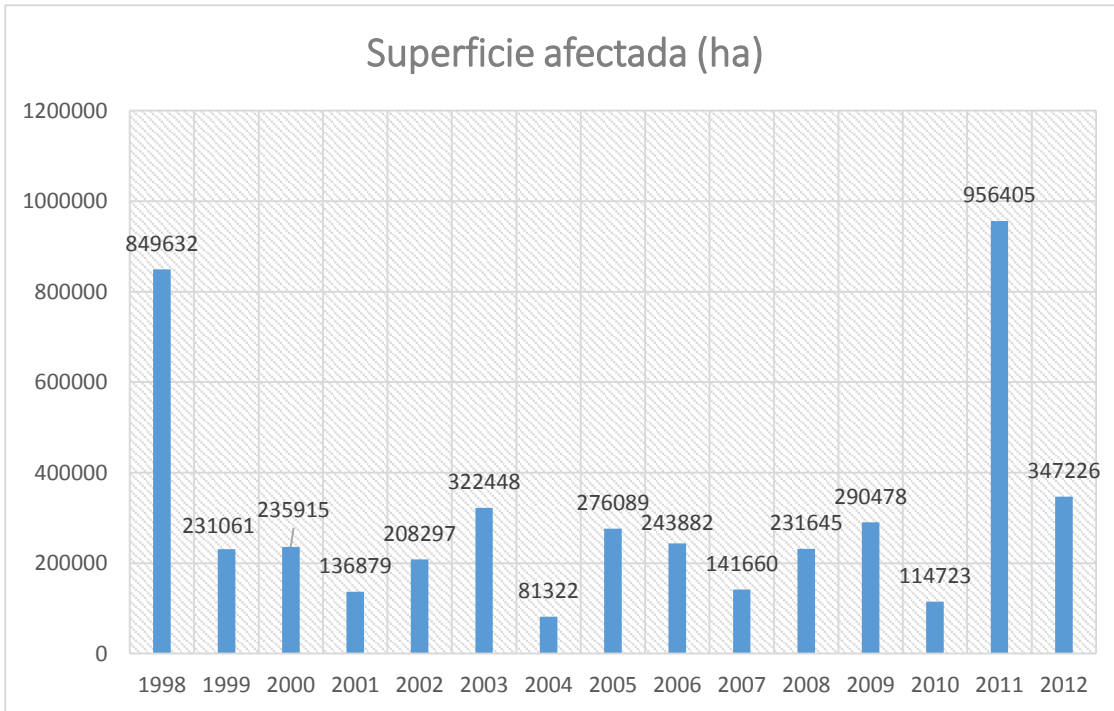


Figura 1.4. Superficie afectada (Ha) por incendios forestales en México, período 1998-2012. Datos: CONAFOR.

Alrededor del 98% de los incendios forestales en México son causados por actividad antropogénica y tan solo el 2% son por causas naturales (CONAFOR). La Comisión Nacional Forestal, registró que durante el año 2012 (información hasta el 8 de noviembre del 2012) el 36% de los incendios forestales fueron generados por actividad agropecuaria.

1.3.2 Detección de puntos de calor

Debido a este problema de la ocurrencia de incendios que se presenta continuamente en el país, la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) desarrolló un Programa que detecta puntos de calor mediante técnicas de percepción remota, detectados por los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y VIIRS (Visible and Infrared Imaging Radiometer Suite). El cual se puso en marcha partir del año 1999. Los puntos de calor que se registran son puntos que representan incendios potenciales, esto por la discriminación que se hace sobre los diferentes puntos de calor de acuerdo a la metodología y técnicas que usan. Lo cual se puede ver

en la liga:
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/metodologia.html
(CONABIO, 2015).

En la *Figura 1.5* se observan los puntos de calor que registra la CONABIO (a través del programa de detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota), en un período del 5-Mayo-2015 al 10-Mayo-2015. A pesar de que el período de registro que se muestra es relativamente corto, el número de incendios potenciales es muy alto. Por lo que se puede tener una idea más clara del gran problema que representa para diferentes sectores del país la ocurrencia de incendios forestales. Se presenta la cantidad de puntos de calor a lo largo de la República. Aquí se puede apreciar que la mayoría de los incendios ocurren en la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental, al sur del país y en la península de Yucatán (al menos en este período).

Los puntos amarillos representan puntos que se detectan durante el día y los de color rojo representan puntos nocturnos. Cabe mencionar que este sistema de alerta temprana de incendios se mantiene actualizado diariamente.



Figura 1.5. Puntos de calor diurnos y nocturnos detectados por sensores MODIS y VIIRS en el período 5/Mayo/2015-10/Mayo2015. (Imagen obtenida de CONABIO. <http://incendios1.conabio.gob.mx/>).

1.3.3 Algunos casos particulares de incendios

Para ampliar el panorama sobre esta problemática de incendios forestales. En la siguiente imagen tomada por el satélite Aqua/MODIS, se muestran los incendios y la dispersión del humo que liberan (contaminantes) ocurridos al sur del país el 2 de Mayo del 2013 (*Figura 1.6*).



Figura 1.6. Imagen satelital de incendios ocurridos al sur del país el 2/Mayo/2013. Fuente: NASA. (Imagen disponible en <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/single.cgi?image=Mexico.A2013122.1945.1km.jpg>)

Para puntualizar la situación es importante mencionar algunos casos específicos de incendios que han ocurrido en el país y que de alguna u otra forma han sido representativos en la historia de los incendios registrados a lo largo del país.

El Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) con aproximadamente 10,000 Km² de superficie, se encuentra cerca de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) en la región central del estado de Jalisco, registra en promedio 29 incendios forestales al año. La región más susceptible es al oeste del bosque. Se ha considerado una situación de mucha importancia y ha sido motivo de varios estudios debido a la cercanía con la ciudad. La ocurrencia de incendios es realmente significativa. Particularmente, en el año

2005 se produjo un incendio forestal en la región vulnerable del APFFLP el 25 de abril y se prolongó hasta el 26 de abril. El resultado fue devastador en diferentes sectores y la superficie total afectada aproximada fue de 8,478 Ha. Entre los gases y partículas liberados a la atmósfera están: el carbón, dentro del rango 6,222.4 ton a 23,081.3 ton, el dióxido de carbono entre 5,600.16 a 10,873.2 ton y el dióxido de nitrógeno entre 1,176 ton a 2,283 ton. Aunado a ello, y otra de las razones por las que se convirtió en una situación crítica es que esta cantidad de contaminantes producidos en los incendios forestales del APFFLP, son transportados hacia las zonas cercanas al bosque, zonas urbanas, entre ellas la Zona Metropolitana de Guadalajara (Bautista, 2009).

Otros casos particulares fueron los incendios de gran magnitud conocidos como El Bonito, localizado en el rancho el Bonito municipio de Acuña, Coahuila y La Sabina al norte del país en el estado de Coahuila. El Bonito se generó el día 17 de marzo del 2011 y entre el 20 y 30 de abril estaba en su auge. Por otra parte, el incendio La Sabina se originó el 16 de marzo del mismo año, de igual forma para las fechas entre el 20 y 30 de abril estaba en su máximo. Han sido de los incendios reconocidos de gran magnitud en la historia de los incendios forestales del país, son conocidos de tercera dimensión. En el rancho el Bonito resultaron afectadas 128,000 ha y en la Sabina 120,000 ha. Ocasionaron daños severos tanto en flora como fauna (CONAFOR, 2011) (Figura 1.7).

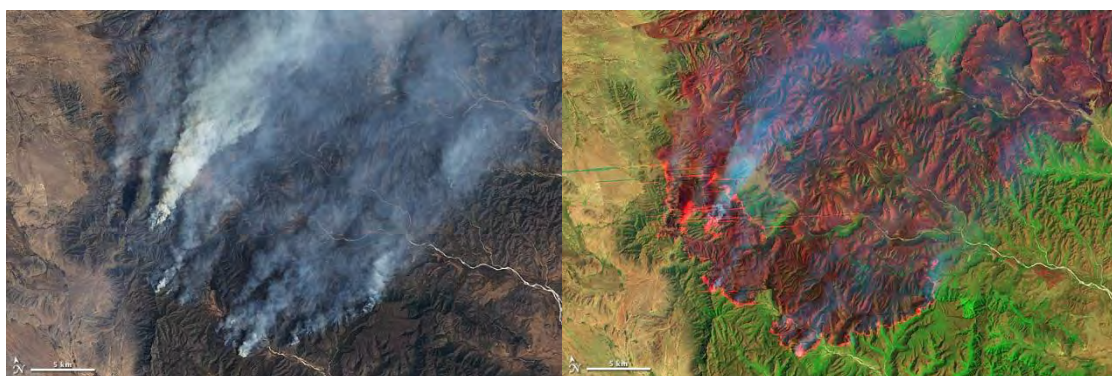


Figura 1.7 Incendios El Bonito y La Sabina al norte de México en el estado de Coahuila. a) muestra densas plumas de humo hacia el noreste, b) incluye infrarrojo y luz visible, muestra una vista a través del humo el terreno recientemente quemado. Imagen tomada por el satélite

Landsat 5, el 9 de Abril del 2011. Fuente: Nasa.

<http://landsat.visibleearth.nasa.gov/view.php?id=50087>

Los incendios más comunes en México son los de tipo superficial, representan aproximadamente el 90% de estos eventos. En ese contexto, le siguen los incendios de copa o aéreos, con una ocurrencia menor del 8 %. Finalmente los menos comunes, los incendios subterráneos con menos del total del 2% de los incendios en nuestro país (CONAFOR).

En cuanto a la vegetación que resulta mayormente afectada, la CONAFOR (2010) señala que son pastizales y arbustos lo que se quema con más frecuencia con la ocurrencia de estos fenómenos (hablando de un 70% a 90%). Y en cuestión de las zonas arboladas se queman de 10 al 30 por ciento. En materia de restauración de la vegetación, los pastizales se recuperan en los primeros días de la temporada de lluvias, mientras que a los arbustos les toma más tiempo, desde unas semanas hasta un par de años. En el caso de las zonas arboladas, el tiempo que tardan varían de 15 a 50 años, esto dependiendo de las especies, del daño, entre otros factores.

Es importante mencionar que los incendios que ocurren en el país, debido a su compleja orografía, se pueden producir en lugares donde el extinguirlos sea una tarea difícil, como puede ser en montes y montañas (CENAPRED, 2001). Por esto, es realmente importante tener en cuenta el serio problema ambiental que representan, la pérdida de superficies forestales que produce y las consecuencias que pueden traer consigo a mediano o largo plazo.

1.4 Propagación de incendios.

Se han hecho análisis en diversos aspectos sobre la forma en que sucede el proceso de propagación. Rothermel y Anderson (1966) demostraron a través de experimentos bajo condiciones controladas de viento (con viento y sin él), que a medida que éste aumenta, la velocidad de propagación también incrementa. Y que en ausencia de viento, el aumento inicial de la temperatura se debe dar esencialmente por la radiación que se produce desde lo alto de la flama, debido a que existe una gran distancia desde el fuego al combustible adyacente y porque el aire está fluyendo hacia el fuego y no lejos de él. Es decir, la radiación tiene una influencia significativa en la propagación del fuego.

Anderson (1969) desarrolló y probó una descripción matemática sobre la propagación del fuego bajo la condición de no viento. Basada en la transferencia

de calor por radiación, esto es, asumiendo la radiación como fuente principal de calor. Los resultados del análisis indicaron que la transferencia de calor por radiación aporta solamente el 40% del flujo total de calor necesario para sostener la propagación del incendio. Y que la transferencia de calor por convección, desde la interfaz de la zona de combustión, así como el combustible nuevo probablemente aporta el resto.

Por otro lado, Frandsen (1971) desarrolló una teoría en donde aplica el concepto de conservación de energía que fluye del combustible, donde muestra un diferente enfoque que conduce a un mejor conocimiento de los parámetros y mecanismos básicos involucrados en la propagación de incendios. En el análisis, aplica el concepto a un elemento de volumen en la fase previa a la ignición, localizado delante del fuego que se desarrolla sobre combustible homogéneo, mientras se acerca a la interfaz de la zona de combustión.

Albini (1984) aborda la idea del cambio de transferencia de calor desde el punto de vista de la radiación, la observación que plantea es desde una porción en ignición del combustible y de la llama activa sobre él, hacia el combustible fino que aún no está en ignición que se encuentra adyacente inmediato al fuego.

Algunos investigadores incluyen en sus observaciones del proceso la transferencia de calor por convección, sin embargo, se cree que la radiación realmente juega un papel dominante en muchos de los casos. Por ejemplo, incendios que se propagan cuando el aire está en calma o que se propagan contra el viento, ahí claramente el proceso sucede por radiación de calor del combustible adyacente al fuego (Gebhart, 1961 citado por Albini)

Así pues, desde el punto de vista de diversas investigaciones y de diferentes experimentos, simular la propagación de incendios forestales es un problema importante. Debido a la complejidad de los modelos involucrados, la cantidad de variables y parámetros, así como la necesidad de métodos numéricos y los recursos necesarios para los cálculos. Algunos modelos de propagación han sido desarrollados para intentar predecir el comportamiento del fuego. También pueden ser usados para combatir de alguna forma los incendios forestales. Estamos hablando entonces de un gran reto. En ese contexto, formular el análisis matemático que describe la propagación es el primer paso.

Se convierte en una herramienta muy importante de gran contribución. Pues proporciona información sobre el comportamiento de un incendio forestal, permite determinar cuáles son los parámetros dominantes en el sistema y entender la dinámica de este fenómeno físico. Para en base a ello formular una solución numérica como aproximación al problema (Bianchini, 2006).

CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS

Investigaciones realizadas en la física del fuego y la ciencia del combustible se han enfocado en entender y describir la forma en que se da la propagación del fuego a través de combustible forestal y, en determinar cómo la velocidad de la propagación se ve influenciada por variables atmosféricas, topográficas y de combustible (Anderson, 1969). Algunos estudios precursores se orientaron esencialmente en establecer las diferentes relaciones entre las condiciones de combustión y las variables que podrían ayudar a hacer frente a problemas sobre incendios. Variables como humedad del combustible, carga de combustible, velocidad del viento, humedad relativa, topografía, entre otras. Se consideró que estas variables producen efectos significativos sobre el fuego y se correlacionan en alguna forma con su comportamiento (Rothermel, 1972).

Si ciertas variables tales como la atmósfera, el combustible, las partículas del combustible y la topografía permanecen constantes o inalterables, se logra un ritmo constante de propagación (Fons, 1946 citado por Frandsen).

2.1 Factores ambientales

Todas esas variables que tienen correlación con el comportamiento de un incendio en pequeña o gran medida (en relación a la ignición y la propagación), es decir, factores que corresponden al medio ambiente, se pueden clasificar en tres grupos principales: factores meteorológicos, topográficos y de vegetación (*Figura 2.1*).

2.1.1 Factores meteorológicos

Los factores meteorológicos permiten delimitar en cierta forma los períodos clave de posible ocurrencia de incendios y la tendencia de propagación que pueden presentar. Mediante algunas variables como la temperatura del aire, ya que cuando se presentan altas temperaturas el contenido de humedad en la vegetación disminuye debido a que se evapora con mayor rapidez el agua

contenida y la demanda de energía para iniciar la ignición se reduce. Otra variable considerada dentro de los factores meteorológicos es la humedad relativa, el impacto que tiene cuando se encuentra por debajo del 40% es parecido al de las altas temperaturas, la posibilidad de que se origine la combustión con menor cantidad de energía aumenta. El viento es otra variable considerada dentro de este grupo, este factor en particular interviene de diversas formas, facilita el secado de los recursos forestal aumentando la posibilidad de la ignición en el combustible, así como también aporta mayor cantidad de oxígeno para la combustión, entre otras (Julio y Giroz, 1975).

2.1.2 Factores topográficos

Los factores topográficos tienen una relación directa con el comportamiento del fuego en cuanto a la propagación, tanto en la velocidad como en extensión. Esto se debe a que el incendio al encontrarse con una pendiente, incrementa el calor que se transfiere por radiación y convección cuando el fuego asciende. Las variables consideradas con mayor implicación son la configuración del área, debido a que tiene una gran influencia en variables climatológicas como la temperatura, humedad relativa que como ya se mencionó anteriormente tiene efecto sobre el comportamiento del incendio. Otra de las variables consideradas dentro de la topografía es la altitud, esta tiene influencia sobre algunas variables climatológicas y por lo tanto en el combustible, como el caso de la temperatura que puede disminuir la humedad en la vegetación por la radiación, también tiene influencia con la disponibilidad de oxígeno dentro del sistema. La pendiente es otra de las variables y se considera la más importante dentro de este grupo, el ángulo de la pendiente expone más directamente el combustible a los procesos convectivos y disminuye la demanda de tiempo de calentamiento previo a la ignición, por lo que la velocidad de propagación aumenta (Julio y Giroz, 1975).

2.1.3 Factores de combustible forestal

El combustible forestal tiene influencia en el comportamiento de los incendios en diversas formas. Dependiendo de variables como cantidad, es una de las más importantes porque se trata del combustible disponible para el incendio, es decir,

representa gran parte de la energía potencial calorífica que puede ser liberada al desarrollarse un incendio. Otra de las variables es la calidad del combustible, esta variable afecta al comportamiento del fuego debido a la capacidad calorífica del combustible, que depende de las características propias de la especie, influyendo en la demanda de energía para la combustión. Considerando también las variables meteorológicas mencionadas antes. La distribución es otra de las variables consideradas dentro de los factores de vegetación, esta tiene influencia directa en la propagación del incendio, debido a la forma en que el combustible forestal está distribuido de manera puntual, respecto a la distancia o continuidad. De ellas depende la cantidad de energía calorífica que se puede generar en el área (Julio y Giroz, 1975).

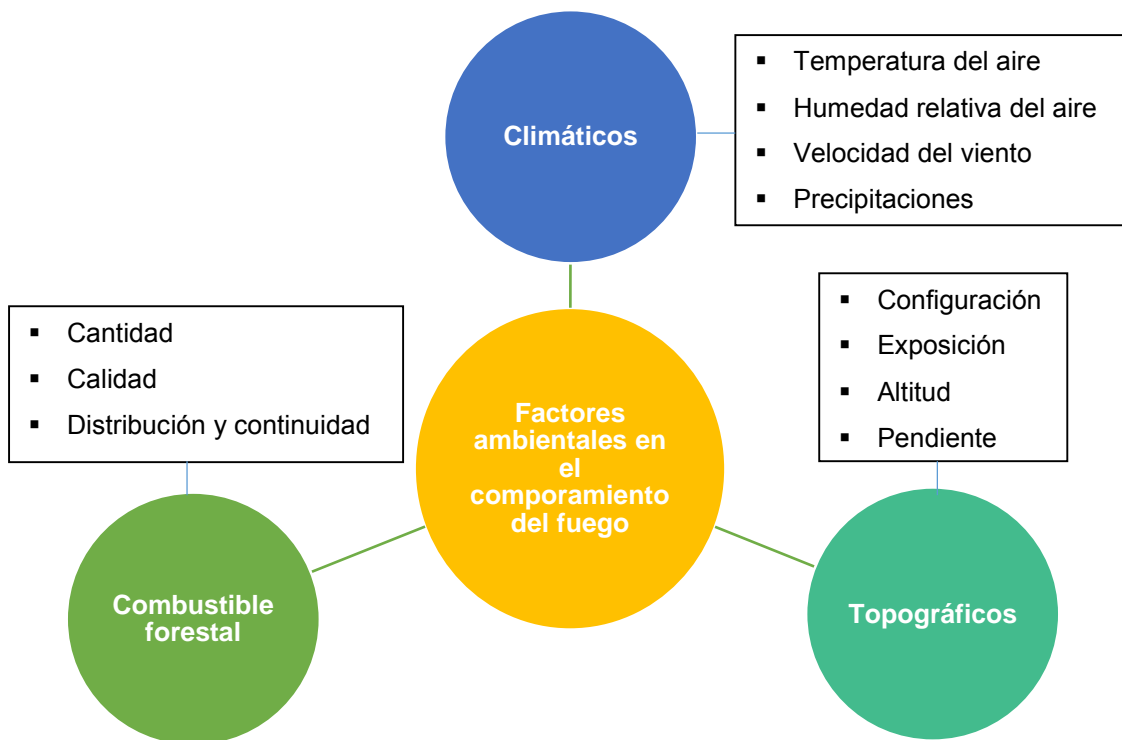
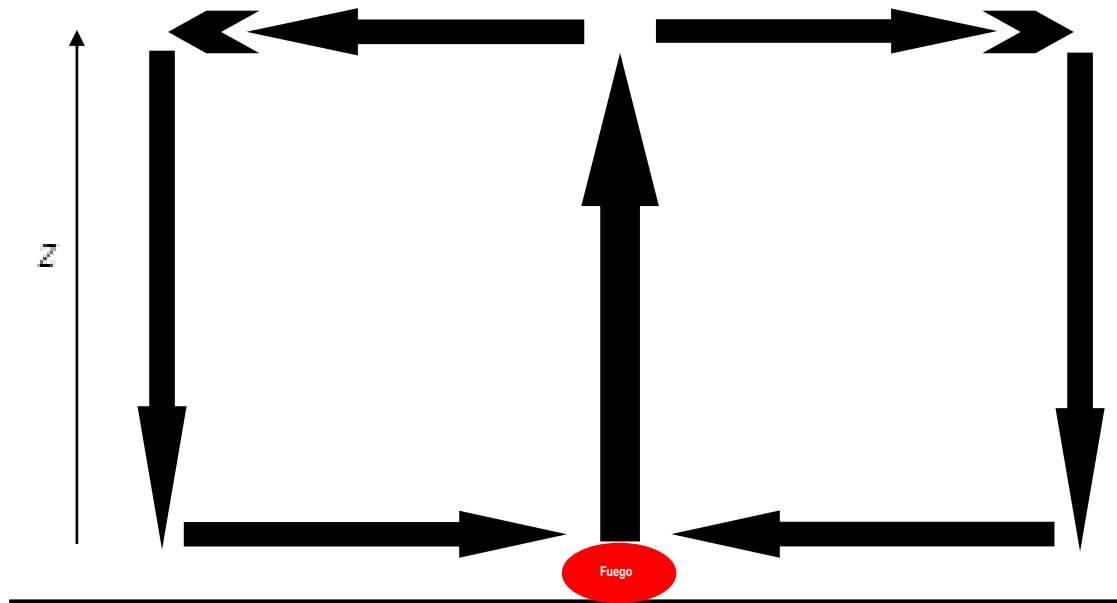


Figura 2.1. Esquema de clasificación de los factores ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los incendios forestales. Información obtenida de (Julio y Giroz, 1975).

La radiación solar también juega un papel muy importante, tiene una clara influencia en el secado del combustible, así como también genera movimientos de aire a mesoescala (Potter, 2002). Por ello, es importante hacer mención que la mayoría de los incendios forestales ocurren en épocas de sequía. Por lo que

la falta de precipitaciones es realmente significativa para determinar posibles ocurrencias de incendios (Julio y Giroz, 1975).

Potter E. (2002) realizó un trabajo en el que describe la relación entre las condiciones atmosféricas y el comportamiento del fuego. Discrimina en su mayoría al combustible, es decir, considera un conjunto dado de propiedades del combustible que permanecen constantes. Desarrolla un análisis sobre cómo el estado inicial de la atmósfera afecta la circulación atmosférica posterior originada por el fuego. Explica que durante el período donde inicia el incendio (en su primera etapa de superficie), el único factor meteorológico que es capaz de tener influencia sobre el fuego son los vientos superficiales y la humedad relativa. Teniendo en cuenta un aspecto importante del aire, debe ser lo suficientemente seco para terminar de secar la superficie del combustible y que no produzca lluvia que pueda apagar el fuego, pero al mismo tiempo, lo suficientemente húmedo para impulsar la convección con el calor latente que libera cuando se calienta. Posteriormente, en la etapa siguiente (que llama de profundización) comienza la convección, aquí, el fuego crea una corriente ascendente (por el fenómeno físico de que el aire caliente tiende a subir) que se eleva a cierta altura para después propagarse de manera horizontal, causando un flujo de aire hacia abajo y con ello una afluencia de regreso a la superficie. De esta manera, el aire debe descender desde una altura z hacia la superficie para reemplazar el aire que sube (*Figura 2.2*). Así, el efecto dinámico que produce el fuego de manera directa sobre la atmósfera es la corriente ascendente que éste crea. La circulación posterior es un efecto secundario de ello. La energía atmosférica que se libera durante el proceso del sistema convectivo (salida y hundimiento del aire) va incrementando hasta que la pluma alcanza la altura z , y ese será el momento en el que la atmósfera alcance su punto máximo de contribución a la fuerza de la circulación. A partir de ahí, cualquier aumento en la fuerza será debido a la energía que libera el fuego.



*Figura 2.2. Representación esquemática de la circulación atmosférica generada por el fuego.
Imagen obtenida de (Potter E., 2002).*

CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO

Es necesario hacer un análisis previo para desarrollar el modelo. El conjunto de ecuaciones que lo componen describen desde un punto de vista la dinámica física del sistema, el cómo sucede. Es importante tener en cuenta que se trata de un proceso que es continuo en espacio y tiempo.

En ese contexto, se tiene el siguiente escenario a analizar: se considera un incendio en el espacio (x, y, z) , es decir, una zona en ignición que está radiando calor en todas direcciones y un elemento de volumen cercano a la zona que es radiado con calor pero que aún no alcanza el punto de ignición (*Figura 3.1*). Partiendo de ahí, se cuantifica el cambio de energía calorífica en el elemento de volumen, el cual, basado en el principio de conservación de energía debe de ser igual al cambio de energía calorífica que fluye a través de su superficie. Asimismo, se considera la fuente puntual de calor que causa un efecto de flujo de calor en forma difusiva. El análisis matemático supone entonces estas tres cantidades (energía calorífica en el elemento de volumen, energía calorífica a través de la superficie del elemento de volumen y la energía calorífica por flujos difusivos).

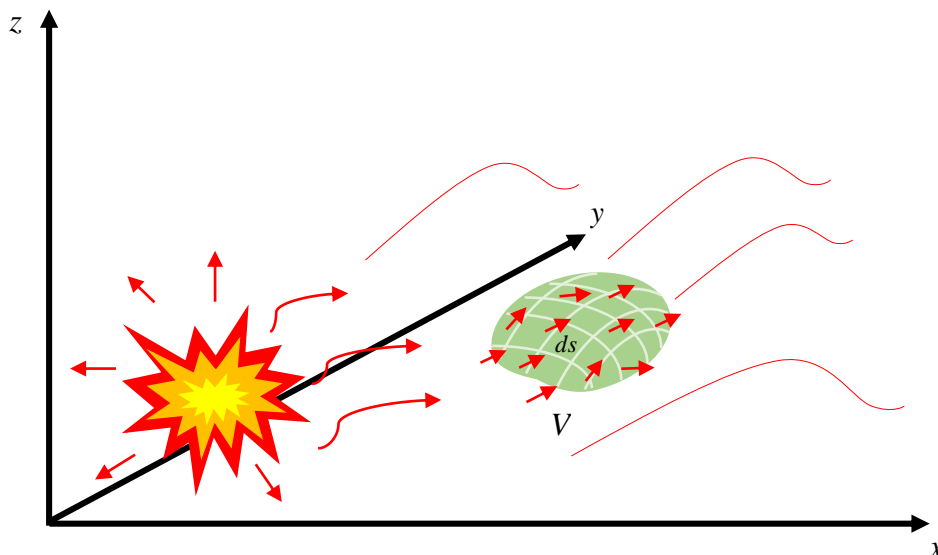


Figura 3.1. Representación de un elemento de volumen V que está recibiendo calor por flujos a través de los elementos de su superficie ds , desde una fuente que irradia calor.

Siguiendo entonces el análisis del escenario, se hace un enfoque ordenado en cada uno de los datos de interés para construir la teoría matemática, definiendo primero las variables del sistema.

Las variables que intervienen en la descripción matemática se enlistan a continuación:

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Q	Calor por unidad de masa (Joules/Kg)
ρ	Densidad de la biomasa (Kg/m ³)
$Q_v = Q\rho$	Calor por unidad de volumen (Joules/m ³)
V	Volumen (m ³)
q	Vector flujo de calor por radiación [Joules/(m ² -s)]
v	Vector velocidad (m/s)

Sea Q el calor por unidad de masa, entonces, el producto $Q\rho$ se define como el calor por unidad de volumen. Esto se puede verificar con las unidades al momento de hacer el producto $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{kg}}\right)\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = \left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^3}\right)$. De ahí que, el producto $Q\rho dV$ es la cantidad de calor en el elemento de volumen dV , es decir, un diferencial de calor. Por lo tanto, el calor total en el volumen v estará dado por la suma de cada uno de los diferenciales de calor en todo el volumen, esto es, la integra triple sobre todo el volumen:

$$Q_T = \iiint Q\rho dV \quad (1)$$

Partiendo de ésta ecuación, nos interesa conocer el cambio de calor total en el volumen v con respecto al tiempo, éste estará dado por:

$$Q_t = \frac{dQ_T}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint Q\rho dV = \iiint \frac{\partial Q\rho}{\partial t} dV \quad (2)$$

Éste cambio de calor, ya sea ganancia o pérdida, se da por flujos de calor a través de la superficie del elemento de volumen. Este flujo de calor está dado

por $Q\rho\mathbf{v}$ ($\left(\frac{\text{Joules}}{m^3}\right)\left(\frac{m}{s}\right) = \left(\frac{\text{Joules}}{m^2s}\right)$ calor por unidad de superficie por unidad de tiempo), entonces el producto $Q\rho\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$ es el flujo de calor a través del elemento de superficie $d\mathbf{S}$. Por lo tanto, el flujo de calor total sobre la superficie cerrada que envuelve al elemento de volumen estará dado por:

$$Q_s = \oiint Q\rho\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

Aplicando el Teorema de Gauss, se tiene:

$$Q_s = \oiint Q\rho\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \iiint \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} dV \quad (4)$$

Ahora, por el principio de conservación de energía, el calor que gana o pierde el elemento de volumen (por unidad de tiempo) debe de ser igual al que ganan o pierden los alrededores y que fluye a través de la superficie (por unidad de tiempo). Es decir, si el calor fluye de la superficie hacia el volumen, la superficie lo pierde y el volumen lo gana. De lo contrario si fluye desde el volumen, este lo pierde y la superficie lo gana. Por lo tanto, la energía se conserva y se cumple la suma algebraica $Q_i + Q_s = 0$ esto es:

$$\iiint \frac{\partial Q\rho}{\partial t} dV + \iiint \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} dV = 0 \quad (5)$$

En las dos integrales las unidades del integrando corresponden entre sí $\left(\frac{\text{Joules}}{s}\right)$ y se está integrando sobre un elemento de volumen en ambas, por lo que puede escribirse como:

$$\iiint \left(\frac{\partial Q\rho}{\partial t} + \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} \right) dV = 0 \quad (6)$$

Para que la ecuación anterior se cumpla, considerando que se está integrando sobre un elemento de volumen diferente de cero ($dV \neq 0$), se tiene entonces que:

$$\frac{\partial Q\rho}{\partial t} + \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

Si ahora se agrega una fuente de calor en las proximidades del elemento de volumen producirá un efecto de difusión de calor. Este proceso actúa como un flujo que se mueve de la zona de mayor cantidad de calor a la zona de menor cantidad y que tiene una tendencia a igualarse y llegar al equilibrio. Este flujo de calor difusivo se representa por q (flujo de calor por unidad de superficie por unidad de tiempo $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)$). El flujo de calor a través del elemento de superficie estaría dado por el producto $q \cdot d\mathbf{S}$, por lo tanto, el flujo de calor total (por unidad de superficie, por unidad de tiempo) en forma difusiva a través de los elementos de superficie que envuelve al elemento de volumen será:

$$Q_D = \oiint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} \quad (8)$$

Que al aplicar el Teorema de Gauss, se tiene:

$$Q_D = \oiint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \iiint \nabla \cdot \mathbf{q} dV \quad (9)$$

Y de la misma forma, por el mismo criterio descrito anteriormente, la energía se conserva y se cumple que: $Q_t + Q_s + Q_D = 0$ o lo que es igual:

$$\iiint \left(\frac{\partial Q\rho}{\partial t} + \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} \right) dV = 0 \quad (10)$$

Se factoriza en una sola integral por la misma justificación que se hizo anteriormente, las unidades de los integrando corresponden entre sí y se está integrando con respecto al volumen.

Como sabemos que $dV \neq 0$, para que se cumpla la ecuación anterior se obtiene que

$$\frac{\partial Q\rho}{\partial t} + \nabla \cdot Q\rho\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (11)$$

Ahora, partiendo de ésta última ecuación (11), si desarrollamos el producto del segundo término $(\nabla \cdot Q\rho\mathbf{v})$ se tiene:

$$\frac{\partial Q\rho}{\partial t} + Q\rho\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla Q\rho + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (12)$$

Haciendo la sustitución por la igualdad definida en un principio $Q_v = Q\rho$ se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} + Q_v\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla Q_v + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (13)$$

Entonces de la ecuación (13) se hace el despeje del primer término ($\frac{\partial Q_v}{\partial t}$). La ecuación que resulta es, entonces, la fórmula de interés. La cual permite cuantificar el cambio de calor en un elemento de volumen. Nuestro modelo matemático:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -Q_v\nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot \nabla Q_v - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (14)$$

Representa el cambio de calor (por unidad de volumen) con respecto al tiempo. En la fórmula están incluidos los términos de divergencia o convergencia de flujos de calor ($Q_v\nabla \cdot \mathbf{v}$), advección de calor por transporte ($\mathbf{v} \cdot \nabla Q_v$) y finalmente, el término de flujo de calor en forma difusiva ($\nabla \cdot \mathbf{q}$).

Si la ecuación se expande, es decir, se desarrolla al mismo tiempo que se factoriza el signo negativo del lado derecho, entonces se llega a la forma:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = - \left[Q_v \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \left(u \frac{\partial Q_v}{\partial x} + v \frac{\partial Q_v}{\partial y} + w \frac{\partial Q_v}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \right] \quad (15)$$

La ecuación en esta forma permite apreciar mejor los términos contenidos. Se puede observar que están incluidas las velocidades del viento (u, v, w) por la dinámica que se genera dentro del sistema propio del incendio.

La divergencia o convergencia de flujos de calor, debido a la velocidad del viento en cierta dirección quien está llevando o trayendo flujos de calor al elemento de volumen. O debido a que se incrementa en gran medida la temperatura del aire

y el propio sistema expulsa aire caliente y absorbe aire (sistema de convección), haciendo que converjan o diverjan flujos de calor.

Advección de calor, el calor se mueve en alguna dirección (x, y) , se origina un proceso de transporte de calor por efecto del viento.

Flujos de calor provenientes de una fuente en ignición, al añadir una fuente que irradia calor genera flujos de calor que se mueven en todas direcciones y se crea un efecto difusivo que se da con una tendencia que va de la zona de mayor cantidad de calor a la zona de menor cantidad. En conjunto cada uno de los términos y dispuestos así, permiten obtener y cuantificar el cambio de calor en una unidad de volumen en el tiempo.

Partiendo de la ecuación 15 y al hacer una reagrupación de términos, se llega a la siguiente forma:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = - \left[\left(Q_v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial x} \right)_x + \left(Q_v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right)_y + \left(Q_v \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial Q_z}{\partial z} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right)_z \right] \quad (16)$$

La cual se puede escribir:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -(R_x + R_y + R_z) \quad (17)$$

donde:

$$R_x = Q_v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial x}, \quad R_y = Q_v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad R_z = Q_v \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial Q_z}{\partial z} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$$

De este modo, a través de estas ecuaciones se pueden calcular los diferentes flujos de calor en las tres direcciones (x, y, z) . De esta forma, el cambio de calor por unidad de volumen en el tiempo estaría en función de los flujos de calor, que se dan debido a los procesos contemplados de divergencia o convergencia, advección y difusión.

Al hacer un análisis de esta última ecuación (17), se puede observar que si $(R_x + R_y + R_z) > 0$ como se ve afectado por el signo negativo, el término completo se vuelve negativo y como todo el término está igualado al cambio de calor en el volumen con respecto al tiempo, se puede interpretar como que el contenido de calor por unidad de volumen disminuye en el tiempo, esto es, existe divergencia de flujos (los flujos de calor desde el elemento de volumen hacia afuera son positivos). Por lo que disminuye la posibilidad de iniciar la ignición.

Por otro lado, si ahora se tiene $(R_x + R_y + R_z) < 0$ todo el término se vuelve positivo debido a la influencia del signo, entonces la interpretación es que existe convergencia de flujos de calor, es decir, el contenido de calor en el volumen aumenta con respecto al tiempo. De esta forma se incrementa la probabilidad de que el elemento de volumen alcance el punto de ignición.

3.1 Discretización numérica.

Para experimentar soluciones con el modelo matemático, es necesario exponerlo en su forma numérica. Puesto que el modelo describe la dinámica de un proceso que es continuo tanto en el espacio como en el tiempo, se tiene un dominio con infinitos puntos en el espacio, a su vez, infinitos estados en el tiempo conforme evoluciona el fenómeno. Es indispensable trabajar con cantidades finitas para así obtener soluciones numéricas. Siguiendo este criterio, se aproximan las ecuaciones diferenciales partiendo de su forma analítica para definir el modelo numérico.

Se aplica el Teorema de Taylor a cada uno de los términos de la ecuación (15), pero se utiliza la serie truncando a partir del segundo término como se muestra a continuación (solo que este es un ejemplo de una función en una dimensión y en él se estima el valor de la función en la posición $x_0 + \Delta x$), es decir, se estima la derivada conociendo el valor de la función en dos puntos y el incremento:

$$f(x_0 + \Delta x) = \frac{f(x_0)}{0!} + \frac{1}{1!} \frac{df(x)}{dx} \Delta x + \dots \longrightarrow \frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

Esta ecuación en particular, que es la que usaremos para la estimación de las derivadas, se conoce como “de paso adelante” debido a que están involucrados los valores de la función en el punto x_0 y en uno de sus sucesores $x_0 + \Delta x$.

Se aplica la fórmula a cada uno de los términos de la ecuación (15), entonces se obtiene en primera aproximación:

$$\begin{aligned} & \frac{Q(x, y, z, t + \Delta t) - Q(x, y, z, t)}{\Delta t} = \\ & - Q \left(\frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} + \frac{v(x, y + \Delta y, z, t) - v(x, y, z, t)}{\Delta y} + \frac{w(x, y, z + \Delta z, t) - w(x, y, z, t)}{\Delta z} \right) \\ & - u \left(\frac{Q(x + \Delta x, y, z, t) - Q(x, y, z, t)}{\Delta x} \right) - v \left(\frac{Q(x, y + \Delta y, z, t) - Q(x, y, z, t)}{\Delta y} \right) \\ & - w \left(\frac{Q(x, y, z + \Delta z, t) - Q(x, y, z, t)}{\Delta z} \right) - \frac{q(x + \Delta x, y, z, t) - q(x, y, z, t)}{\Delta x} \\ & - \frac{q(x, y + \Delta y, z, t) - q(x, y, z, t)}{\Delta y} - \frac{q(x, y, z + \Delta z, t) - q(x, y, z, t)}{\Delta z} \end{aligned}$$

La ecuación anterior se expresa con una notación diferente. Es decir, cuando sea el caso, en la posición de superíndice el tiempo t se representa por n y el tiempo futuro $t + \Delta t$ se representa por $n + 1$. En el caso de las demás variables, se colocan como subíndices donde (i, j, k) representan a (y, x, z) respectivamente y siguiendo el mismo criterio con respecto al incremento. También se despeja el término de interés que cuantifica el calor Q en el tiempo futuro $t + \Delta t$. Finalmente, la ecuación discretizada es:

$$\begin{aligned}
Q_{i,j,k}^{n+1} = & Q_{i,j,k}^n - Q\Delta t \left(\frac{u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{v_{i+1,j,k}^n - v_{i,j,k}^n}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1}^n - w_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right) \\
& - u\Delta t \left(\frac{Q_{i,j+1,k}^n - Q_{i,j,k}^n}{\Delta x} \right) - v\Delta t \left(\frac{Q_{i+1,j,k}^n - Q_{i,j,k}^n}{\Delta y} \right) - w\Delta t \left(\frac{Q_{i,j,k+1}^n - Q_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right) \\
& - \Delta t \frac{q_{i,j+1,k}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta x} - \Delta t \frac{q_{i+1,j,k}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta y} - \Delta t \frac{q_{i,j,k+1}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta z}
\end{aligned}$$

Ahora, se puede observar que el modelo se convierte en una fórmula aritmética que contiene operaciones básicas. De esta forma queda dispuesta la ecuación para explorar soluciones numéricas.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este trabajo se consideró en forma operativa únicamente el término difusivo de la teoría matemática para el desarrollo del modelo numérico, como primera aproximación. Pero es importante mencionar que el efecto neto de los otros términos es parametrizado en la metodología que aquí se presenta. El término actúa como difusión de calor por efecto de la radiación desde una fuente en ignición. La forma numérica a considerar es, entonces:

$$Q_{i,j,k}^{n+1} = -\Delta t \frac{q_{i,j+1,k}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta x} - \Delta t \frac{q_{i+1,j,k}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta y} - \Delta t \frac{q_{i,j,k+1}^n - q_{i,j,k}^n}{\Delta z}$$

De esta manera, el cambio de calor por unidad de volumen por unidad de tiempo se da mediante difusión de calor por radiación.

4.1 Ecuación de Stefan-Boltzmann

El análisis se hizo a través de la Ley de Stefan-Boltzmann, la cual establece que la cantidad de energía radiada por un cuerpo negro, por unidad de superficie y por unidad de tiempo, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, esto es:

$$E = \sigma T^4$$

donde:

$\sigma = 5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$	Constante de Stefan-Boltzmann
T	Temperatura en grados Kelvin

Se aplicó conceptualmente el método de Montecarlo. Sustituyendo las ecuaciones diferenciales parciales por la aplicación de la ecuación de Stefan-Boltzmann y parametrizando algunas variables importantes.

Una vez determinado esto, se desarrolló un código computacional usando el lenguaje de programación Fortran 95, estableciendo de manera particular los criterios de construcción para representar la propagación del incendio. Se simuló la propagación del incendio de tipo de copa o aéreo, debido a que son entre otras cosas, los más devastadores.

4.2 Malla de distribución aleatoria

Si se piensa en un bosque (de cualquier especie) con una población moderadamente densa y se visualiza desde arriba, tendríamos una imagen tal como la que se muestra a continuación (*Figura 4.1*):



Figura 4.1. Imagen de un bosque visto desde arriba. Foto aérea Bosque Patagonia, parque nacional Lanín, Argentina. Fuente: Eric R Schroeder.

Si ahora se coloca representativamente una malla encima del bosque con una resolución considerable. Se tiene una idea de que en cada cuadro cae al menos un árbol. Por lo tanto, si cae dentro se determina como “árbol”, al igual que si sólo cae un fragmento considerable de árbol. Si por el contrario, no cae ninguno en el cuadro o el fragmento es muy pequeño se determina entonces como “no árbol” (*Figura 4.2*).



Figura 4.2. Esquema representativo de un bosque dentro de un dominio de malla. Foto aérea Bosque Patagonia, parque nacional Lanín, Argentina. Fuente: Eric R Schroeder. Imagen modificada.

Así, teniendo en mente el panorama, se creó una malla (dominio) con resolución de 10 m x 10 m con árboles aleatoriamente distribuidos y con una densidad de población mayor al 50%. Es decir, una matriz donde cada “entrada” simula tener una dimensión de 10 m x 10 m.

Fortran 95 crea números aleatorios con valores entre [0,1], por lo que se estableció el siguiente criterio: si el número aleatorio que se genera por entrada es mayor a 0.40 entonces la entrada recibe el valor de 1 y si por el contrario el número es menor, entonces recibe el valor de 0. De esta manera es más fácil disociar con el método binario de ceros y unos, donde 0 es no árbol y 1 es árbol. Es decir:

Criterio	Valor	Descripción
>0.40	1	Árbol
<0.40	0	No árbol

Entonces se obtiene una matriz binaria de unos y ceros distribuidos aleatoriamente como se muestra en el siguiente ejemplo con una matriz de 10x10 (*Figura 4.3*):

			...	j-1	j	j+1	...			
	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
i-1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
i	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
i+1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Figura 4.3. Esquema de una matriz de dimensión 10x10 con entradas 1's (árbol) y 0's (no árbol) distribuidas aleatoriamente.

Finalmente se tiene un esquema representativo de la distribución en el dominio en particular (ejemplo de un dominio de 100 m x 100 m) y con la resolución anteriormente mencionada (Figura 4.4):

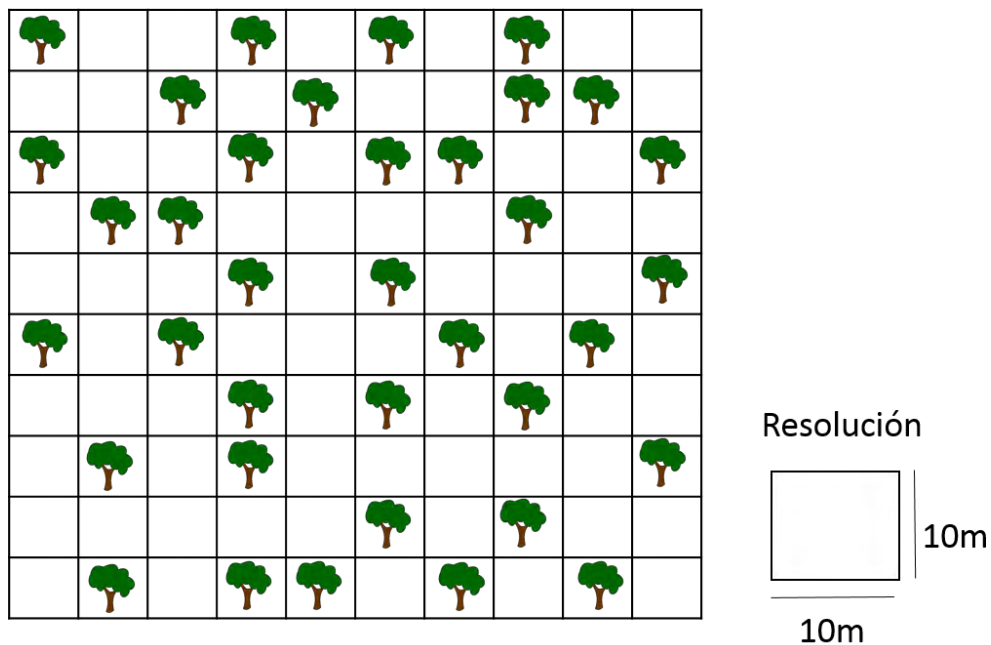


Figura 4.4. Representación de un dominio de 100 celdas con resolución de 10m x 10m. En él se muestra una distribución aleatoria de árboles.

Cabe mencionar que todos los árboles se consideraron del mismo tamaño, para que la población sea uniformemente homogénea. El objeto matemático que se adecuó particularmente para representar la copa de los árboles es una esfera. Puede ser sujeto a cambios, los cálculos se pueden repetir con otro objeto matemático que represente a criterio la copa.

4.3 Emisión y captación de energía

Se parte de la suposición de que en alguno de los árboles se inicia el fuego, sin importar la causa. Se eleva su temperatura al punto de ignición (por ejemplo que un rayo incidiera sobre el árbol), lo que provoca que se empiece a incendiar. Esto lo convierte en una fuente que está radiando calor y como se dijo anteriormente, tiene un efecto de flujos difusivos de calor en todas direcciones que se mueven de la zona de mayor cantidad de calor a la zona de menor cantidad hasta igualarse y llegar al equilibrio.

De esta forma, el árbol en ignición (que llamaremos A) está emitiendo energía (calor) por unidad de superficie por unidad de tiempo $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)$ y tiene un efecto sobre los demás árboles (llamaremos B) que se encuentran a temperatura ambiente. Se produce una relación árbol-árbol (A con B). Así, B que se encuentra a una distancia d de A, está recibiendo energía desde A. La forma en que B recibe energía de A se consideró tal como la Tierra absorbe energía del Sol. Es decir, la que capta en un círculo, en este caso de radio igual al de la copa del árbol, visto de frente (*Figura 4.5*). Después esa energía captada se distribuye en todo el volumen de la copa. Aquí no es porque la copa se encuentra girando como lo hace la Tierra, sino porque considerando que la copa del árbol tiene huecos entre la biomasa, la energía pueda pasar a través de ella, por eso es que se tomó el mismo criterio de distribución a través de toda la copa.

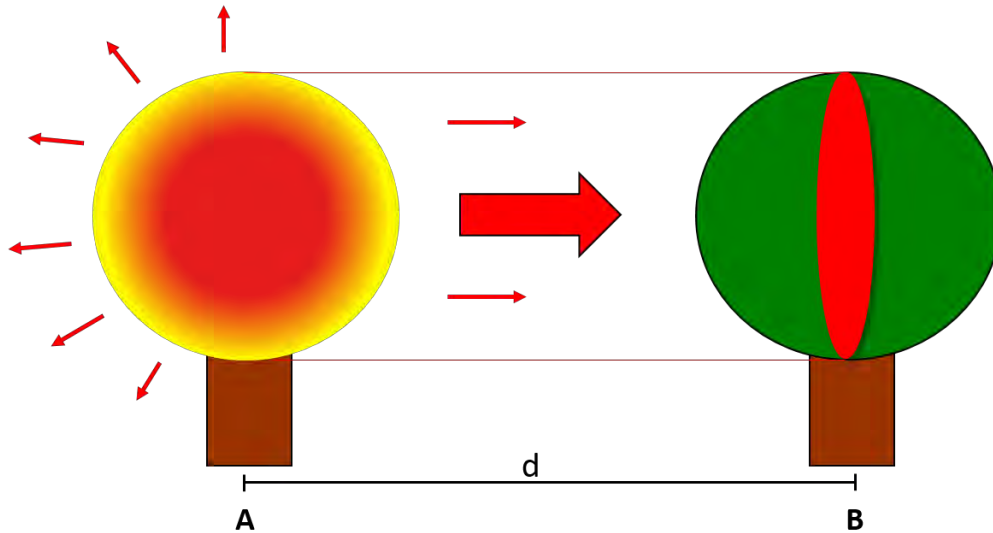


Figura 4.5. Representación esquemática de un árbol en ignición (A) emitiendo energía y un árbol (B) recibiendo energía, la que capta en un círculo del radio de su copa.

El árbol A supone un comportamiento en su temperatura como se muestra en la *Figura 4.6*. Inicia con la temperatura de ignición (como el ejemplo del rayo), después conforme avanza el tiempo alcanza un punto máximo, donde se considera que se está quemando simultáneamente la mayoría de la biomasa. El punto máximo se estableció en la mitad del tiempo, es decir en la mitad de las iteraciones.

Desde el punto de inicio hasta el punto máximo está representado por una curva sinusoidal y a partir del punto máximo hasta el final, es una curva exponencial. Esto debido a que una vez que alcanza el punto máximo la biomasa a consumir va disminuyendo y la temperatura decae exponencialmente, para llegar al punto de equilibrio o temperatura ambiente.

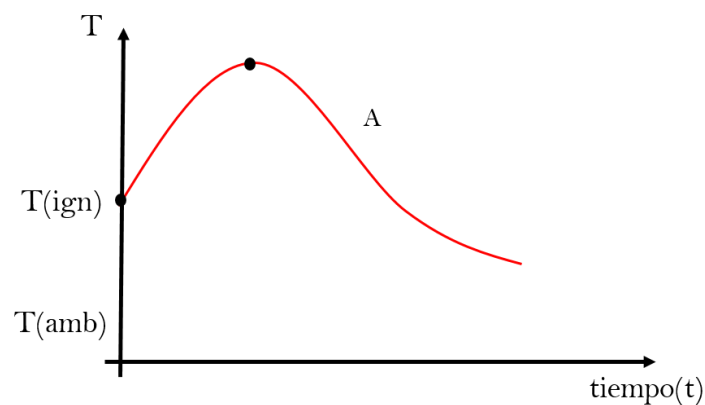


Figura 4.6. Curva de temperatura del árbol A con respecto al tiempo.

4.4 Parámetro alfa

Una vez que el árbol A empieza a emitir energía de acuerdo a la curva de temperatura descrita, el árbol B que se encuentra a una distancia d se ve afectado por esa energía, que capta en cierta medida. Pero se debe tener en cuenta que el calor que se genera inicialmente cuando el árbol A emite energía, se pierde con la distancia por efecto de convección (el aire caliente tiende a subir) como se vio en la literatura (Potter E., 2002). Por lo tanto, la energía recibida desde la fuente de radiación A se ve afectada por un coeficiente de decaimiento. El cual simula el calor perdido por procesos convectivos. De esta forma, la cantidad de energía que emite el árbol A está dada por:

$$E_0 = \sigma T^4$$

de acuerdo a la Ley de Stefan-Boltzmann, donde:

$\sigma = 5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$	Constante de Stefan-Boltzmann
T	Temperatura que toma A en cada iteración según el comportamiento descrito

Y la energía que llega desde la fuente de radiación hasta el árbol B será entonces:

$$E = E_0 e^{-\alpha d}$$

La fórmula describe la energía que es emitida $E_0 = \sigma T^4$ multiplicada por un coeficiente de decaimiento en función de la distancia d y un parámetro α . La descripción es: a mayor distancia, mayor es el decaimiento de la energía y a menor distancia, menor el decaimiento.

Para encontrar el valor del parámetro α , se necesita conocer el valor de E y E_0 esto es:

$$E = E_0 e^{-\alpha d}$$

$$\frac{E}{E_0} = e^{-\alpha d}$$

$$\ln \frac{E}{E_0} = \ln e^{-\alpha d}$$

$$\ln E - \ln E_0 = -\alpha d$$

$$\therefore \alpha = \frac{\ln E_0 - \ln E}{d}$$

Para ello, se desarrolló un análisis pensando en el criterio con el que se cuantifica la energía recibida del Sol a la Tierra.

Primero se considera la superficie de la esfera (e_1) que está radiando calor (en este caso la copa del árbol A). Se calcula la energía que emite a través de la Ley de Stefan-Boltzmann, pero esa energía es emitida por unidad de área por unidad de tiempo $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)$, entonces, para saber cuánta energía emite toda

la esfera, se multiplica por la superficie total de e_1 . Lo que resulta en energía por unidad de tiempo $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{s}}\right)$. Ahora, si se construye una esfera con un radio

desde el centro de A hasta el centro de B (la llamamos e_2) suponiendo que esa misma energía emitida por e_1 tiene que pasar por la esfera e_2 que la envuelve (la energía emitida dividida entre la superficie de la esfera e_2 devuelve las unidades $\left(\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)$ de tal forma que e_2 crea un corte en B del tamaño de un

círculo y tomando en cuenta que la energía que pasa a través de e_2 es por unidad de tiempo, se requiere multiplicarla por la superficie del círculo y de esa forma cuantificar toda la energía que recibe B, como se muestra en el siguiente esquema (*Figura 4.7*).

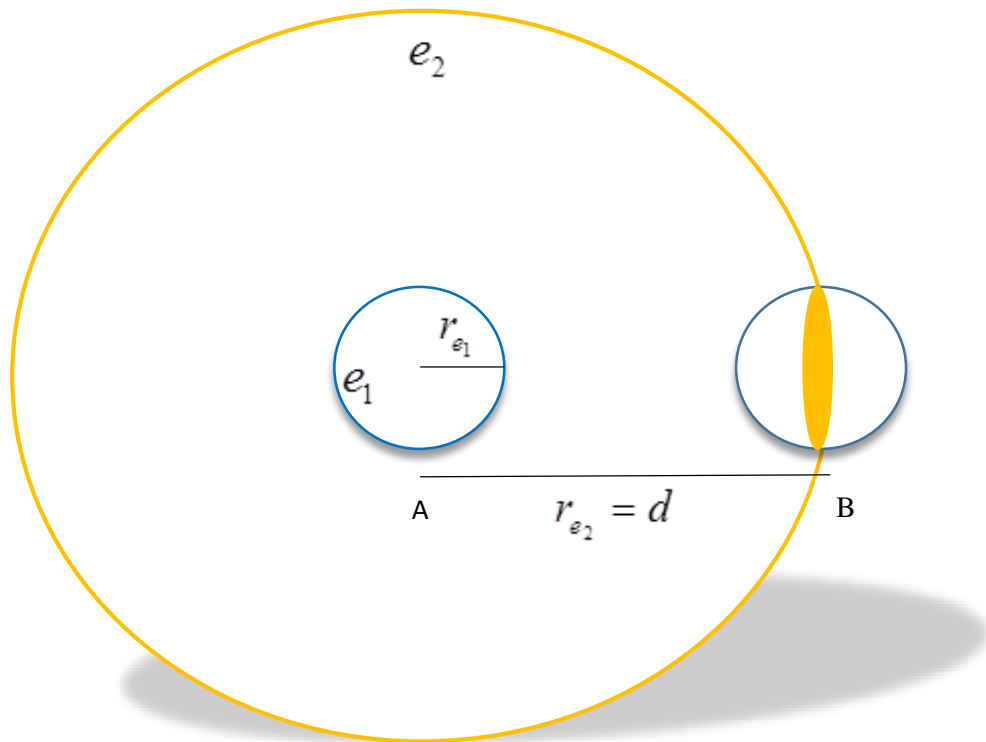


Figura 4.7. Esquema de la energía emitida por A y captada por B con el método de las esferas.

Finalmente, para calcular el valor de α , se tomaron los siguientes valores:

Variable	Descripción	Valor
T_A	Temperatura de A	560 °K (temperatura de ignición)
r_{e_1}	Radio de la copa A	2 m
r_{e_2}	Radio de la esfera grande e_2	10 m (distancia mínima entre A y B)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Se tomó la temperatura de ignición debido a que es la temperatura inicial conocida. El tamaño del radio de la copa, por promedio aproximado. Y como distancia se tomó la distancia mínima entre dos árboles dentro del dominio de distribución aleatoria de árboles. Partiendo de ello, se tiene:

$$E_0 = \sigma T^4$$

$$E_0 = \left(5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right) (560 K)^4$$

$$E_0 = 5576.5526118 \frac{J}{m^2 s}$$

$$E_{e_1} = E_0 4\pi r_{e_1}^2 = \left(5576.5526118 \frac{J}{m^2 s} \right) (50.2654 m^2)$$

$$E_{e_1} = 280308.10747 \frac{J}{s}$$

$$E = \frac{E_{e_1}}{4\pi r_{e_2}^2} \quad \text{Energía que pasa a través de } e_2 \text{ por unidad de superficie, por}$$

unidad de tiempo.

$$E = 223.06210446 \frac{J}{m^2 s}$$

Sustituyendo valores para calcular α se tiene:

$$\alpha = \frac{\ln(5576.5526118) - \ln(223.06210446)}{10}$$

$$\alpha = 0.321887$$

Este valor de α se tomó como punto de partida durante la experimentación para obtener el valor más adecuado. Si bien no fue el final, al menos es el límite inferior. Fue necesario darle un valor mayor, debido a que en el método con el cual se calculó no se consideró la pérdida de calor por el efecto de convección que genera el aire caliente cuando asciende. El valor se estuvo modificando por prueba y error, por supuesto que durante el proceso de cada experimentación se mantuvo constante.

Una vez que se tiene el valor de la energía que llega al árbol B $\left(\frac{\text{Joules}}{m^2 s} \right)$, se multiplica por la superficie del círculo de captación y así se tiene la energía

recibida por unidad de tiempo $\left(\frac{\text{Joules}}{s}\right)$. Finalmente se divide por todo el volumen de la copa para así tener la cantidad total de energía distribuida en la copa. A partir de la energía que recibe con cada iteración, se puede conocer la temperatura que el árbol B alcanza de acuerdo a su energía. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$T_B = T_1 + \frac{E_{abs}}{c \times m}$$

donde:

Variable	Descripción
T_1	Temperatura inicial de B
T_B	Temperatura final de B
E_{abs}	Energía captada por el círculo y distribuida en el volumen de la copa.
c	Capacidad calorífica de la madera
m	Masa de la copa (de la madera de la copa)

De esa forma se cuantifica el cambio de temperatura que tiene el árbol B con respecto al tiempo, es decir, en cada iteración.

4.5 Subdominios

Estableciendo entonces el comportamiento de árbol A-árbol B donde la energía decae en relación a cierta distancia d y al parámetro α y B toma una nueva temperatura según la energía que recibe. Se acotó un subdominio de 50 m x 50 m tomando el árbol A como referencia en el centro del mismo (*Figura 4.8*). Debido a que existe una influencia significativa de la energía sobre los árboles vecinos con distancia d dentro del subdominio (ese será entonces el conjunto de

árboles B). De acuerdo al valor asignado al parámetro alfa en el proceso de la experimentación. El alcance de la energía fuera del dominio ya no se considera con efecto significativo. Esto también para mantener la energía en un dominio finito, ya que la radiación continúa infinitamente aunque tienda a cero con respecto a la distancia y el tiempo.

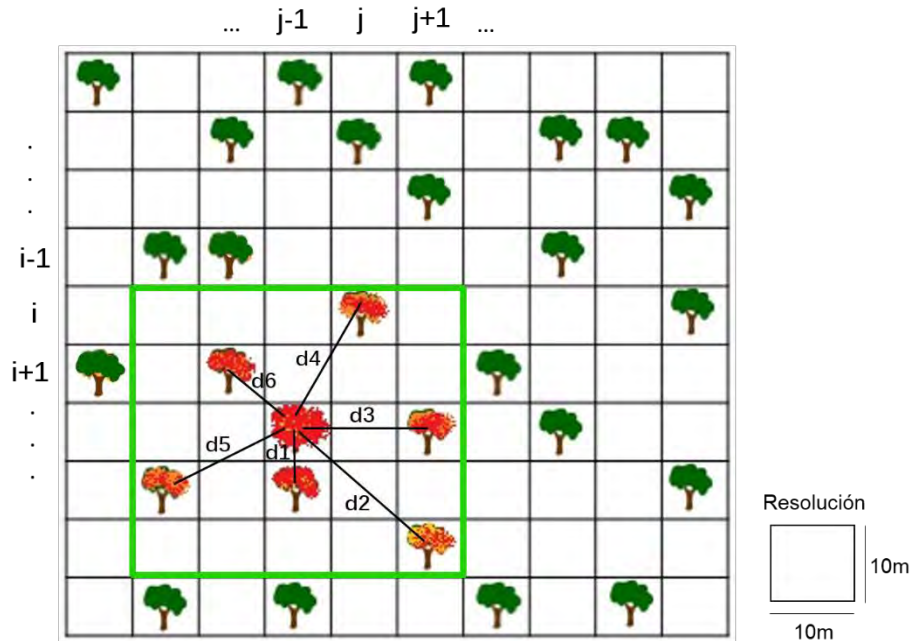


Figura 4.8. Esquema de una vecindad definida de árboles B afectados por la radiación del árbol A en el dominio de distribución.

Finalmente un criterio más a considerar es el hecho de que todos los árboles se encuentran a temperatura ambiente (25°C en promedio), es decir, están en equilibrio energético. Reciben energía en una cierta longitud de onda y emiten en otra, pero en un estado de equilibrio.

Cuando algún árbol B recibe energía su temperatura aumenta (en pequeña o gran medida) y por lo tanto empieza a emitir energía en un orden mayor para intentar llegar al equilibrio. En cada iteración, B recibe energía de acuerdo a la curva de temperatura de A, por lo que su temperatura se eleva en cada lapso de tiempo. Esta energía que empieza a emitir B así como la temperatura que toma, también se cuantifican. Ya que al igual que A, también afecta en cierta medida a los árboles vecinos (dentro del subdominio) aunque no

con el mismo comportamiento ni con la misma temperatura inicial pero sí emite de acuerdo a la Ley de Stefan-Boltzmann.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que se trata de un problema de combinatoria (*Figura 4.9*). La idea es, cuantificar cualquier cambio de temperatura en cada árbol, asignarle un subdominio una vez que su temperatura se eleve mayor a la temperatura ambiente. Hacerlo varias iteraciones mientras se recorre toda la curva de temperatura de A y analizar, guardar el comportamiento en la temperatura de B. Cuando algún árbol B alcanza el punto de ignición, se le asigna la curva de temperatura de A (*Figura 4.6*) (automáticamente se convierte en un árbol en ignición). Así, el proceso continúa por todo el dominio de distribución e iteradamente. Para finalmente simular cómo sucede la propagación de calor.

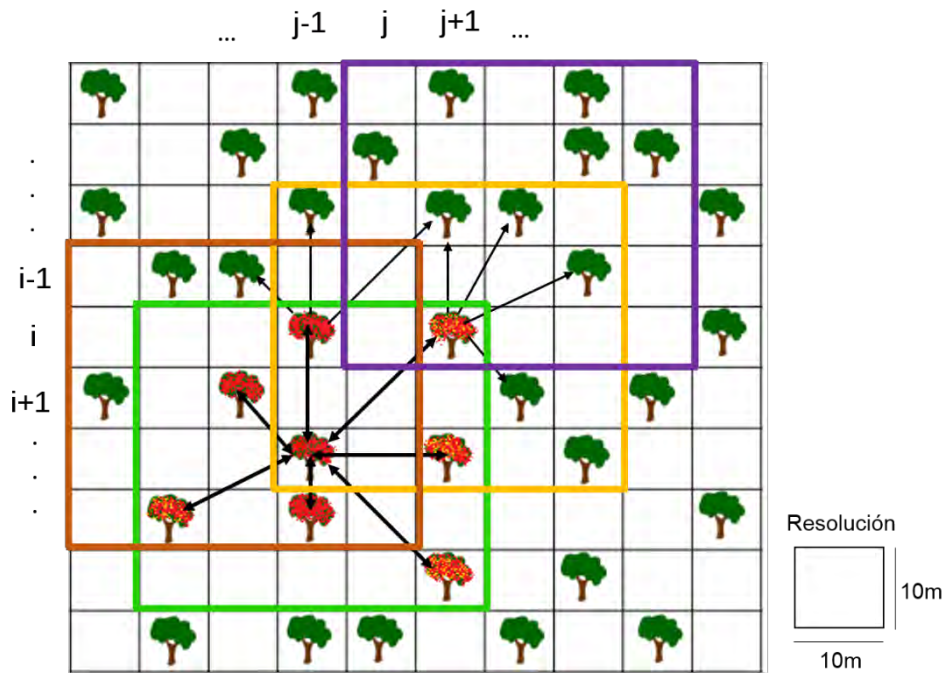


Figura 4.9. Ilustración del problema de combinatoria con los subdominios que se van creando de acuerdo al criterio de la temperatura.

A continuación se muestran los valores de los parámetros y variables utilizados para el desarrollo del programa:

Descripción	Variable o parámetro	Valor
Temperatura de ignición	T_A	560.9278 °K
Temperatura ambiente	T_{amb}	298.15 °K
Radio de la copa del árbol	r	2 m
Parámetro alfa	α	0.715116312
Parámetro beta	β	0.4
Densidad de la madera	ρ	560 Kg/m ³ (Gutiérrez et al., 2010)
Masa de la copa	m	$\rho \times \beta v = 7506.312 \text{ Kg}$
Capacidad calorífica (madera)	c	5000 Kcal/Kg
Constante Stefan-Boltzmann	σ	$5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$
Paso de tiempo	dt	1, 2 o 3
Distancia (mínima entre A-B)	d	10 m

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se desarrollaron simulaciones a diferentes iteraciones, sobre una malla de distribución aleatoria de árboles. Los diversos resultados obtenidos se graficaron en el software Scilab 5.5.1.

Los primeros resultados muestran las simulaciones que se realizaron a través de 500 iteraciones con un paso de tiempo $dt=1$ (1 iteración=1 segundo). Sobre una malla de distribución aleatoria de árboles (dominio) de 1Km x 1Km (*Figura 5.1*).

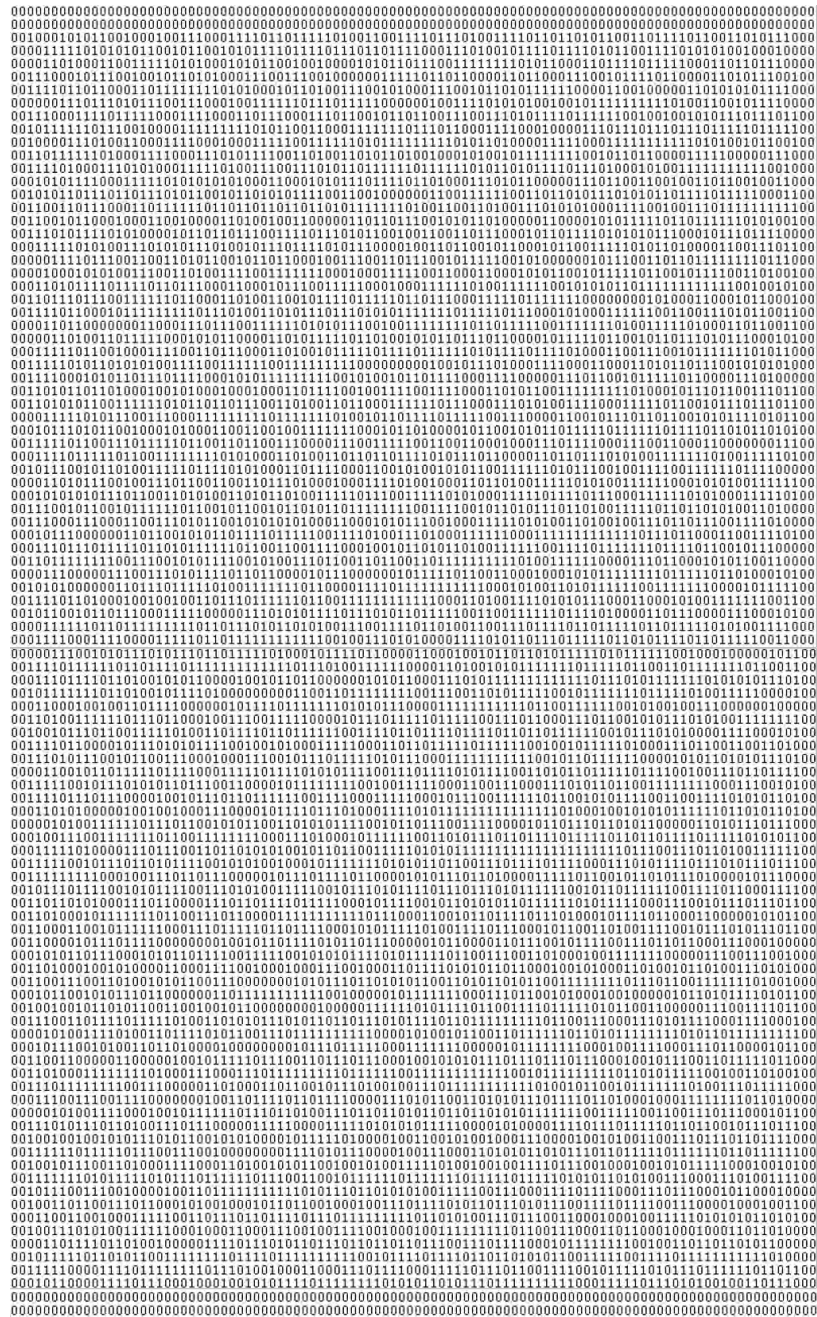


Figura 5.1. Malla binaria de distribución de árboles

En los extremos de la malla se dejaron dos líneas de ceros, para evitar problemas en el programa al llegar a los límites, debido al criterio de los subdominios. Claro que existen diversas formas de atacar ese problema, pero aquí se hizo de esa manera.

El inicio del incendio fue de manera puntual, en la posición [44,52]. Teniendo en cuenta que la malla es de 100 x 100 y la resolución de 10 m x 10 m. El esquema con la distribución aleatoria se puede ver en la *Figura 5.2*, el color verde representa el valor 1 (árbol) y el color blanco el valor 0 (no árbol), también se observa donde se localiza el inicio del incendio (color rojo). De esta manera, en el esquema de distribución se puede apreciar tanto la densidad de árboles dentro del dominio, como la posible tendencia de propagación que puede presentar el incendio.

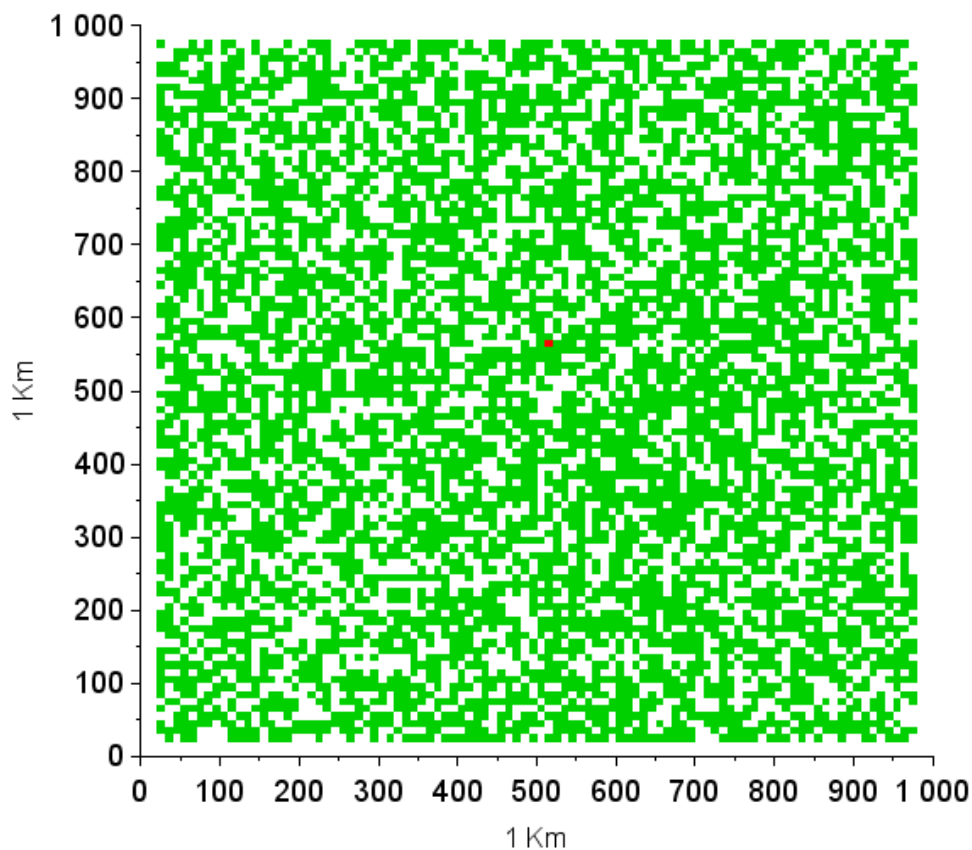


Figura 5.2. Esquema representativo de la distribución aleatoria de árboles en un dominio de 1Km x 1Km, con la posición del incendio.

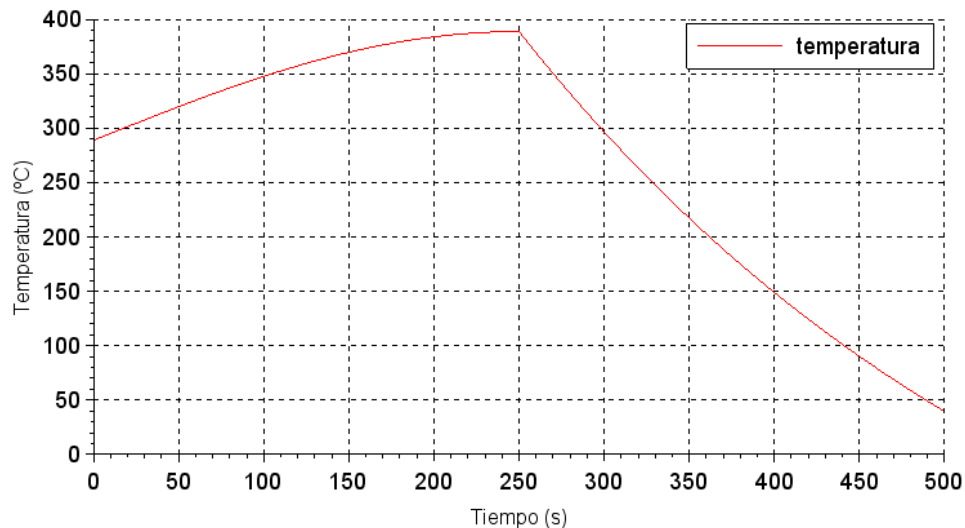


Figura 5.3. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 500 iteraciones.

El valor máximo de temperatura en la barra de color (color blanco) se refiere a la temperatura de ignición (300 °C aproximadamente), por lo que todas las celdas que muestran ese color representan árboles que tienen o están por encima de esta temperatura. Esto permite observar tanto la propagación del incendio debido al aumento de árboles que presentan la temperatura mayor o igual a la de ignición, así como la propagación del calor producido por ellos.

En el siguiente resultado se muestran en diferentes tiempos las gráficas de temperatura de la simulación de la propagación de un incendio bajo condiciones de no viento (*Figura 5.4*). Es importante recordar que en este caso cada iteración representa un segundo. En el primer segundo se observa el inicio del incendio de manera puntual en un árbol, con la temperatura de ignición (*Figura 5.4a*). Posteriormente, como se encuentra en ignición, su temperatura sigue el comportamiento descrito en la *Figura 5.3* y avanza en cada segundo de acuerdo a esta curva de temperatura. En la *Figura 5.4b* se muestra la temperatura en la iteración 125, en esta gráfica ya se puede observar que el incendio se propagó después de ese período de tiempo, porque aumentó el número de árboles en ignición. Después se presenta la temperatura en la iteración 250 (*Figura 5.4c*), a 250 segundos (4 minutos aproximadamente) del inicio, se aprecia el crecimiento del incendio dentro del dominio, la superficie con árboles en ignición es mayor y el calor que producen también tiene un alcance en una superficie mayor. Este número de iteraciones es el punto medio del

tiempo simulado, y en el que el árbol donde se originó el incendio alcanza su punto máximo de temperatura. Sin embargo, aún se aprecia que el incendio está en progreso, debido a que hay otros árboles que están por alcanzar su punto de ignición. La *Figura 5.4d*, que representa la temperatura en la iteración 375 (minuto 6.25), muestra que la propagación sigue en marcha. Aún se observan árboles que están ardiendo (con temperatura igual o mayor al punto de ignición) en el perímetro del incendio y otros que apenas se está elevando su temperatura para llegar al punto de ignición. Sin embargo, en el centro del incendio, se puede apreciar que la temperatura disminuyó. Esto debido a que son árboles que ya alcanzaron su punto máximo y ahora van en decadencia de acuerdo al comportamiento de la temperatura, es decir, se están apagando. El incendio en la fase final del experimento, es decir, en la última iteración, se muestra en la *Figura 5.5*. En esta gráfica, de igual forma, se observa en el centro del incendio que la temperatura disminuyó casi por completo. Alcanzando niveles alrededor de 40°C, que como se dijo anteriormente, se está apagando. Este hecho es realmente significativo, el que siga este comportamiento demuestra que la simulación se apega a la realidad. Se asemeja a la huella de carbón que dejan los incendios. Después de 500 iteraciones ya se consumió la mayoría de la biomasa, aunque el incendio se sigue propagando, prueba de ello son los árboles que mantienen una temperatura mayor o igual a la de ignición que se encuentran aún en el perímetro del incendio. Debido a que el dominio es relativamente pequeño y el ritmo de propagación es grande, no se aprecia bien la propagación a gran escala de este tipo de incendio. Lo cual podría mejorar con un dominio mayor e incluso dándole más segundos por iteración y/o más iteraciones. Lo que permitiría simular más tiempo (incluso horas).

Es importante hacer notar que la propagación se dio en todas direcciones, por tratarse de un experimento sin alguna dirección preferencial por efecto del viento.

Se observó una temperatura máxima de 400°C aproximadamente y fue en la iteración 250 del experimento. Describe de manera aceptable la velocidad de propagación promedio reportada en la literatura de alrededor de 5 km/h, es decir, 1 a 2 m/s aproximadamente (Julio y Giroz, 1975). Con este ritmo de propagación, después de 500 segundos (8.3 minutos) el incendio avanzó alrededor de 700 m desde el origen del mismo. Afectando una superficie

aproximada de 1Km² en un tiempo relativamente pequeño (*Figura 5.5*). Se simuló cómo se da la propagación del incendio a lo largo de 8.33 minutos aproximadamente.

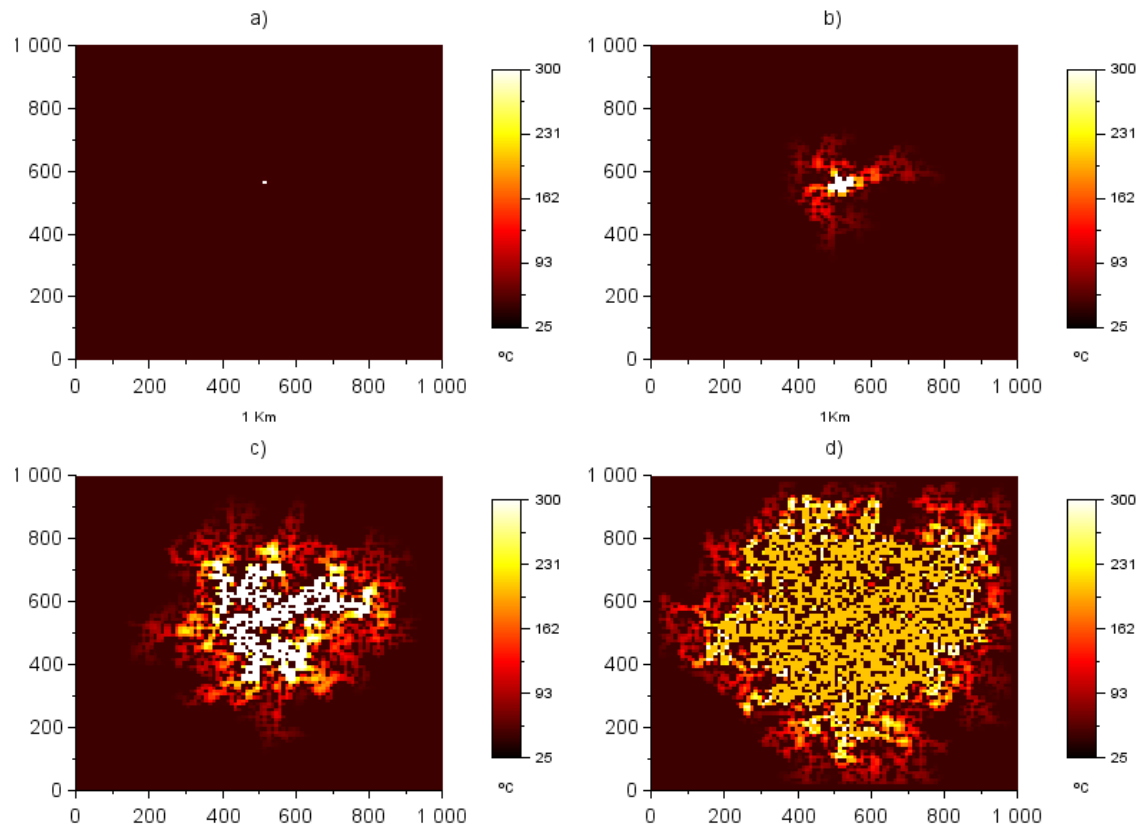


Figura 5.4. Gráficas de temperatura de la simulación de propagación del incendio en las iteraciones: a) 1, b) 125, c) 250 y d) 375

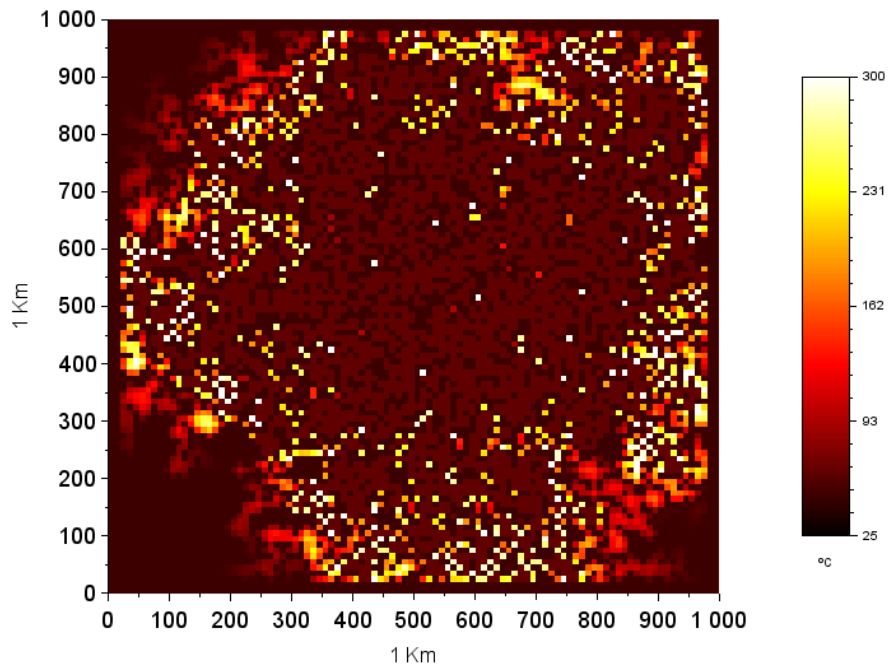


Figura 5.5. Temperatura del incendio en la iteración 500

El efecto del viento también pudo ser parametrizado para simular una dirección preferencial de la propagación. Se utilizó la misma ecuación de decadencia exponencial, pero con el parámetro α modificado. Es decir, se le dio un valor menor para una decadencia menor de la energía hacia la dirección preferencial. Los valores de alfa para simular este efecto se muestran a continuación:

Parámetro	Valor	Descripción
α_1	0.609314725	Parámetro utilizado para los árboles orientados en la dirección preferencial
α_2	2.334714224	Parámetro utilizado para el resto de los árboles fuera de la dirección preferencial

Se supone un viento con cierta dirección (hacia el norte, sur, este, oeste, etc.), que tiene un efecto sobre el incendio, transportando mayor cantidad de calor hacia la dirección que tiene y con esto el incendio toma una dirección preferencial. Se tomaron en cuenta 8 direcciones preferenciales (*Figura 5.6*), las cuales se pueden seleccionar dentro del programa. En los siguientes resultados, el efecto del viento se fijó a partir de la iteración 150 (por elección propia). Pero se puede jugar con el número de iteraciones a partir de la cual el viento tenga

efecto (como el ejemplo de la *Figura 5.11*). Por supuesto que también se pueden hacer ciertas combinaciones, es decir, que a partir de algunas iteraciones el viento tome una dirección y después tome otra, sólo se tienen que hacer algunas modificaciones en el programa.

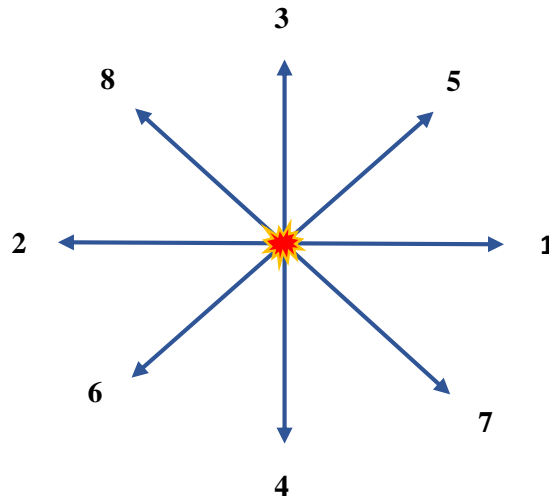


Figura 5.6. Posibles direcciones preferenciales por efecto del viento para la propagación del incendio.

Se simuló el efecto del viento sobre la propagación de un incendio en todas las posibles direcciones preferenciales. Aquí sólo presentaremos los resultados con algunas de ellas. De igual forma las simulaciones se hicieron a través de 500 iteraciones, donde cada una representa un segundo. Se conserva la posición de manera puntual para el inicio del incendio [44,52], esto para poder hacer un mejor análisis sobre el comportamiento del mismo bajo el efecto del viento.

La siguiente figura (*Figura 5.7*) muestra las gráficas de temperatura que describen la propagación de un incendio con dirección preferencial 1 (Este). Se presentan las temperatura en las iteraciones 1 (*Figura 5.7a*) donde inicia el incendio de manera puntual con la temperatura de ignición. La iteración 150, es decir, después de 2.5 minutos (*Figura 5.7b*) donde todavía no está presente el efecto del viento, por lo que aún se observa que la propagación se desarrolla en todas direcciones. La iteración 200 (*Figura 5.7c*), donde ya se puede observar el cambio de dirección que toma la propagación (en la dirección 1), el número de árboles que están en ignición sigue la dirección del viento, y el calor que producen estos también. Posteriormente se muestra la temperatura en la

iteración 350, esto es, en el minuto 5.8 (*Figura 5.7d*), aquí se aprecia que el incendio sigue avanzando, algunos árboles apenas están elevando su temperatura, aunque la temperatura del centro está disminuyendo. Finalmente, se muestra el resultado que hasta la iteración 500 arroja el incendio (*Figura 5.8*). Ya que si se hicieran más iteraciones o si cada una de ellas representara más de un segundo, la huella o el resultado serían mayor. Lo que se aprecia del incendio hasta este punto dentro del dominio permite notar que la temperatura ha bajado considerablemente, no se aprecia la parte del incendio que sigue en ignición o que aún está avanzando, pero se puede deducir que la punta aún sigue ardiendo. Se observó de igual forma una temperatura promedio máxima alrededor de 400 °C en la iteración 250. Analizando las dos últimas imágenes (c y d) se puede ver que la simulación reproduce de forma razonable la velocidad de propagación reportada en la literatura. Aproximadamente de 2 m/s a 3.5 m/s, es decir, alrededor de 10 km/h. El incendio se propagó a un ritmo mayor que el que presenta cuando se desarrolla sin algún efecto del viento (Julio y Giroz, 1975).

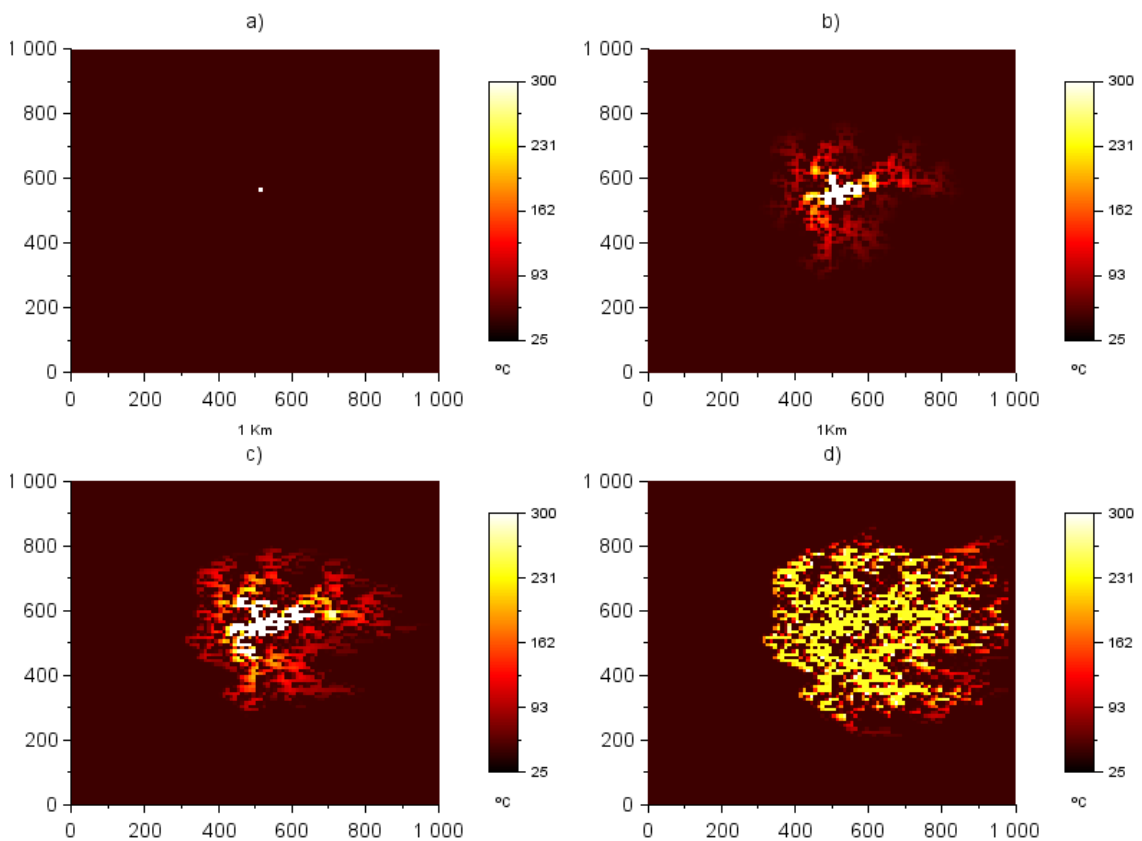


Figura 5.7. Gráficas de temperatura con dirección preferencial 1, bajo condiciones de viento. a) Iteración 1, b) iteración 150, c) iteración 200 y d) iteración 350.

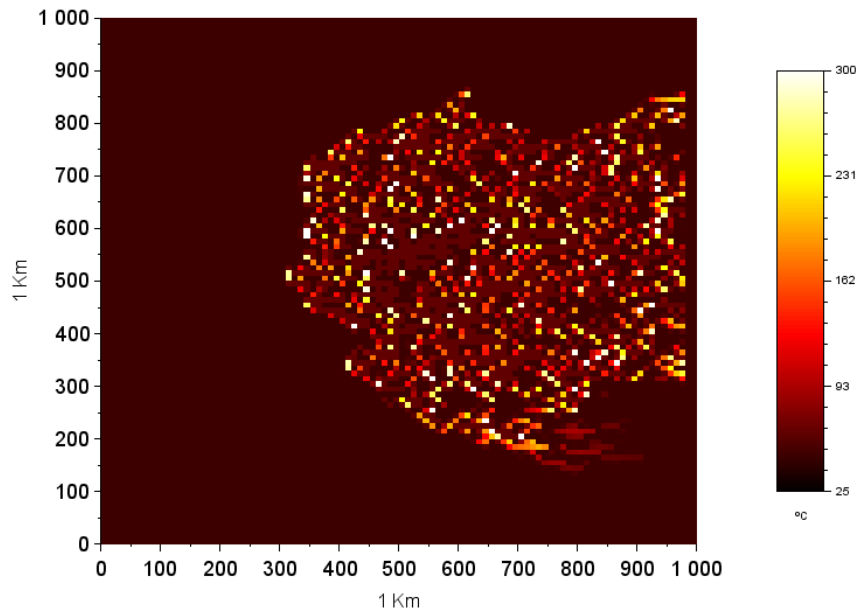


Figura 5.8. Temperatura en la iteración 500 con dirección preferencial 1.

El siguiente resultado (*Figura 5.9*) muestra la simulación de la propagación bajo el efecto del viento con dirección preferencial 6 (Suroeste). Se observan las gráficas de temperatura en las iteraciones: 50 (*Figura 5.9a*) donde todavía no está presente el efecto del viento; 220 (*Figura 5.9b*) ya se aprecia la tendencia de la dirección hacia el suroeste como consecuencia del viento; 400 (*Figura 5.9c*) conserva la tendencia de propagación aunque la temperatura va en decaimiento; y finalmente la iteración 500 (*Figura 5.9d*) donde la temperatura decayó casi por completo, aunque no se alcanza a apreciar los extremos que aún siguen encendidos. La forma tan particular en que se fue dando la propagación en esta dirección, se debe principalmente a la disposición de los árboles dentro del dominio de distribución. Se puede hacer la comparación con el esquema de distribución (*Figura 5.2*) de acuerdo a la densidad de árboles que se localizan al suroeste del dominio, alrededor de esta región. Se observó también una temperatura promedio máxima de 400°C en la iteración 250, además reproduce la velocidad de propagación aproximada de 10 km/h.

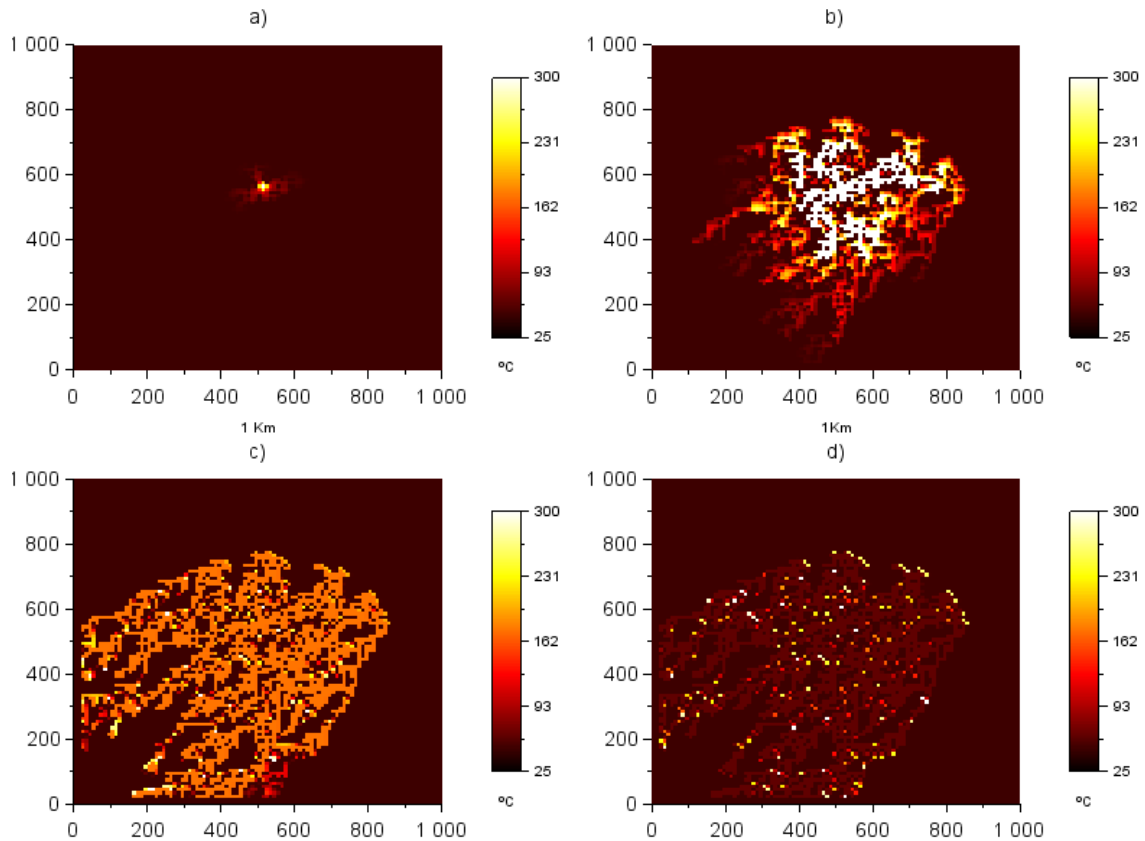


Figura 5.9. Gráficas de temperatura con dirección preferencial 6, bajo condiciones de viento. a) Iteración 50, b) iteración 220, c) iteración 400 y d) iteración 500.

Otro de los resultados es la simulación de la propagación de un incendio con dirección preferencial 3 (efecto de un viento hacia el Norte), se muestra en la Figura 5.10. Se presentan las gráficas de temperatura en las iteraciones: 100 (*Figura 5.10a*) donde aún el viento no tiene algún efecto sobre la propagación del incendio; 200 (*Figura 5.10b*) ya se observa una tendencia de propagación hacia el Norte, debido al efecto del viento con esa dirección; 350 (*Figura 5.10c*) la temperatura en la mayoría del incendio va bajando no se alcanza a apreciar la punta del incendio en la parte norte donde aún sigue avanzando por el tamaño del dominio; finalmente la iteración 500 (*Figura 5.10d*) la última de las iteraciones en esta simulación, se puede observar que la superficie del incendio aumentó si se hace una comparación con la gráfica de la iteración 350 (*Figura 5.10*) así como también se aprecia una decadencia casi uniforme de la temperatura en la mayoría de la superficie afectada dentro del dominio, aunque en el perímetro de

la parte media hacia el norte se puede ver que todavía sigue encendido y avanzando, hay una región en el centro del incendio que luce ya apagada de manera homogénea esto puede ser porque es la zona donde se originó el incendio. Reprodujo una velocidad aproximada de 10 km/h al igual que las simulaciones anteriores con dirección preferencial. Así como también una temperatura máxima promedio de 400°C en la iteración 250.

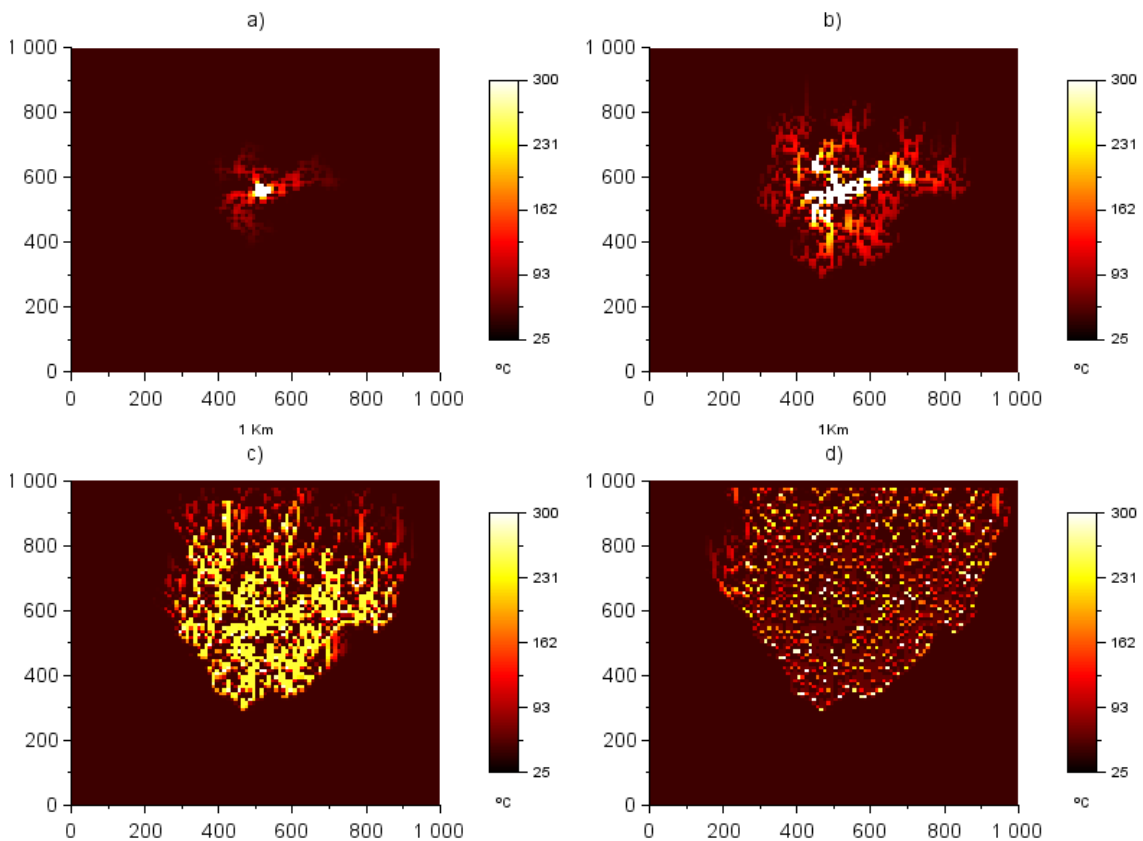


Figura 5.10. Temperaturas de la propagación con dirección preferencial 3. a) Iteración 100, b) iteración 200, c) iteración 350 y d) iteración 500.

Haciendo un análisis de las gráficas de los resultados de la *Figura 5.7*, *Figura 5.8*, *Figura 5.9* y *Figura 5.10* permite notar que la distribución y densidad de los árboles dentro del dominio juegan un papel importante en la forma en que se da la propagación del incendio en las diferentes direcciones. El incendio crece en todas direcciones y a partir de que se ve afectado por el efecto del viento, la disposición de los árboles permite que se propague y tome una forma particular. Otro punto a considerar en la forma en que se propaga el incendio con las

direcciones preferenciales es el criterio de selección de celdas. De manera vertical (norte y sur) y horizontal (este y oeste) sucede más lineal y entre ellas es la misma selección, mientras que de manera diagonal (noreste, noroeste, sureste y suroeste) es un poco diferente la selección, por lo que también afecta a la forma que toma la propagación. Aunque se estableció el mismo número de celdas para cualquier dirección. Por supuesto que se puede modificar la manera de seleccionar las celdas y eventualmente comparar resultados.

La siguiente imagen (*Figura 5.11*) muestra el resultado de la simulación del incendio con dirección preferencial 1 al igual que las *Figura 5.7* y *Figura 5.8*. Pero aquí, el efecto del viento inicia antes, en la iteración 100. Un par de las gráficas de temperatura se presentan en las mismas iteraciones igual que en la *Figura 5.7*, esto para que el análisis comparativo tenga una mejor apreciación. La *Figura 5.11a* es la gráfica de temperatura en la iteración 100 donde todavía no hay efecto del viento en la propagación. Pero en la *Figura 5.11b* que muestra la temperatura en la iteración 200 ya se observa la tendencia de propagación en la dirección del viento, además esta gráfica está en la misma iteración que la gráfica de la *Figura 5.7c*, sin embargo, se aprecia una diferencia significativa. La *Figura 5.11c* representa la iteración 350 al igual que la gráfica de la *Figura 5.7d*. Al hacer la comparación entre ellas se puede ver que la propagación tiene una forma diferente, se da de una forma más alargada. Esto se debe a que el incendio antes de verse influenciado por efecto del viento se está desarrollado en todas direcciones, pero en menor tiempo su desarrollo es menor y es entonces cuando se ve afectado por la dirección del viento, por eso la superficie del incendio es un poco más alargada. El resultado en la iteración final, muestra de igual forma una diferencia significativa (*Figura 5.8* y *Figura 5.11d*). De igual forma se observó una temperatura promedio máxima de 400°C y una velocidad de propagación aproximada de 8 a 10 km/h.

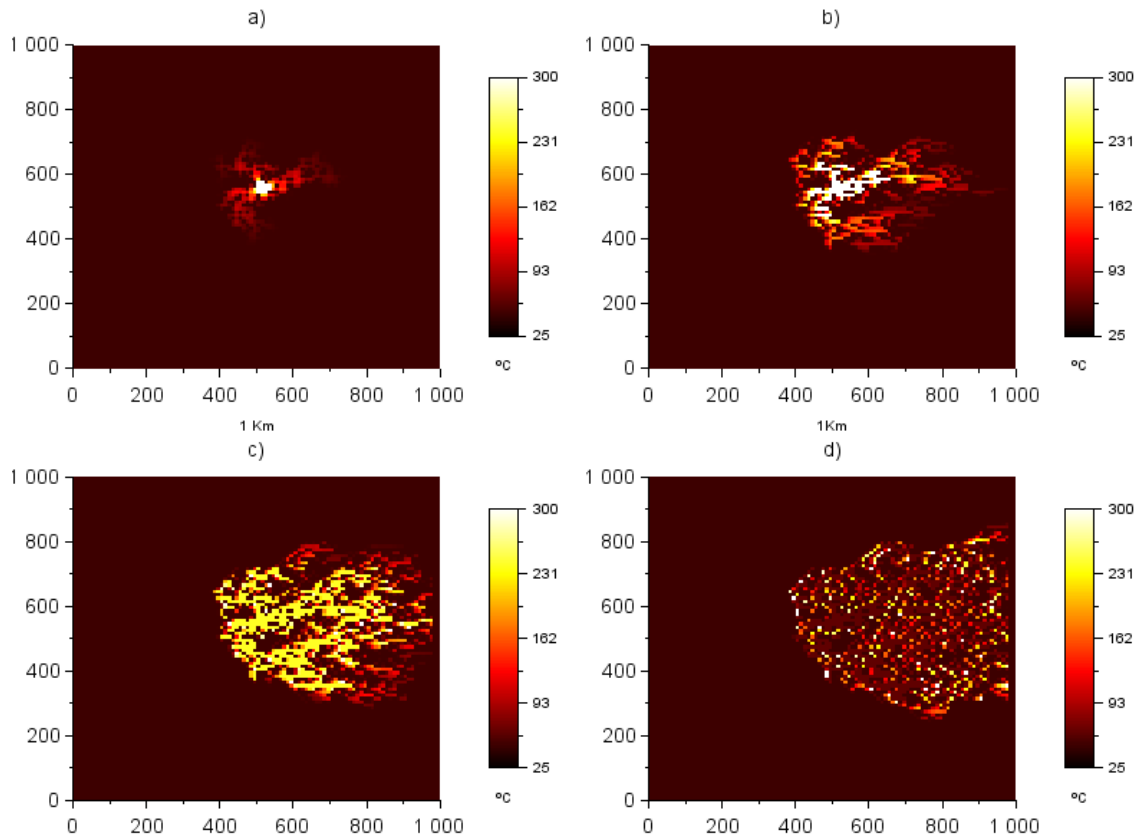


Figura 5.11. Gráficas de temperatura de la propagación con dirección 1 en las iteraciones: a) 100, b) 200, c) 350 y d) 500

Los resultados siguientes muestran una diferencia significativa en la curva de temperatura del árbol en ignición. Esto para señalar que también se pueden modificar los parámetros de temperatura con respecto al tiempo y reajustar para otros eventos reales. En estos el salto de temperatura es mayor, es decir, en la curva de temperatura que describe el comportamiento del árbol en ignición, con cada iteración la temperatura aumenta más que en los resultados anteriores. Haciendo que en un mismo lapso de tiempo la temperatura alcance un punto más alto y/o decaiga menos.

La *Figura 5.13* muestra las gráficas de temperatura de una simulación de la propagación de un incendio sin dirección preferencial por efecto viento, al igual que la *Figura 5.7* y la *Figura 5.8*. Las gráficas que se muestran son exactamente en las mismas iteraciones, en el mismo paso de tiempo $dt=1$ (1 iteración=1 segundo) y el inicio del incendio en la misma posición. Pero en este caso, el

comportamiento del árbol en ignición sigue la curva de temperatura que se muestra en la Figura 5.12.

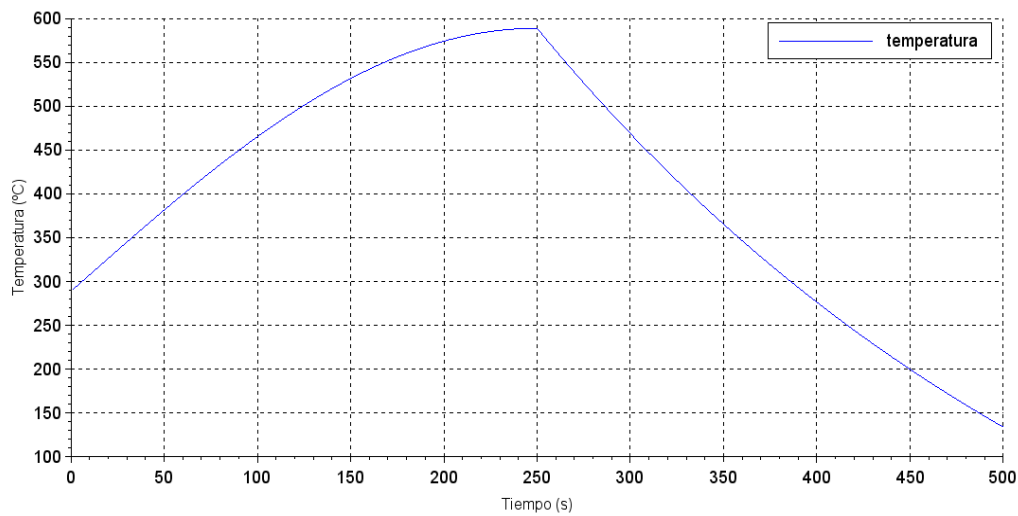


Figura 5.12. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 500 iteraciones.

En la primera iteración (*Figura 5.13a*) se observa el inicio del incendio, por lo que no hay alguna diferencia entre las dos simulaciones. En la iteración 125 (*Figura 5.13b*) a simple vista parece no haber algún contraste significativo, pero aquí hasta este punto ya alcanzó una temperatura de 500 °C a diferencia de la primera simulación (*Figura 5.7b*) que está alrededor de los 370 °C. Después en la iteración 250 (*Figura 5.13c*), a 4 minutos del inicio del incendio, la curva de temperatura alcanza su punto máximo con una temperatura promedio aproximada de 600 °C. Las gráficas de ambas simulaciones lucen muy parecidas porque muestran el incendio en su punto máximo. Sin embargo, si hay diferencia viendo a más detalle algunas celdas del perímetro, así como en la temperatura máxima que presentan. En la *Figura 5.13d* que muestra el incendio en la iteración 375, ya se observa una diferencia considerable entre las dos gráficas de ambas simulaciones en la misma iteración. A pesar de que la temperatura va en decadencia, aún está por encima de la temperatura de ignición, por lo que el incendio aún se observa en desarrollo y la propagación aumentando. Es por esto que a 6.2 minutos desde el inicio del incendio, este sigue en crecimiento, mostrando la mayoría de los árboles todavía incendiándose manteniendo la temperatura de ignición. En la última iteración de la simulación (*Figura 5.14*), se

aprecia que apenas está bajando considerablemente la temperatura del centro del incendio. Sin embargo, aún son altas temperaturas, lo que permite notar que le tomará un poco más de tiempo llegar a temperaturas bajas o apagarse. De esta forma, se pudieron modificar temperaturas con respecto al tiempo al ajustar la curva de temperatura. Se observó una temperatura promedio máxima de 600 °C en la iteración 250 y una temperatura mínima de 140 °C en la iteración 500. Se simularon aproximadamente 8.3 minutos. Ambas simulaciones conservan el mismo ritmo de propagación, alrededor de 5 km/h.

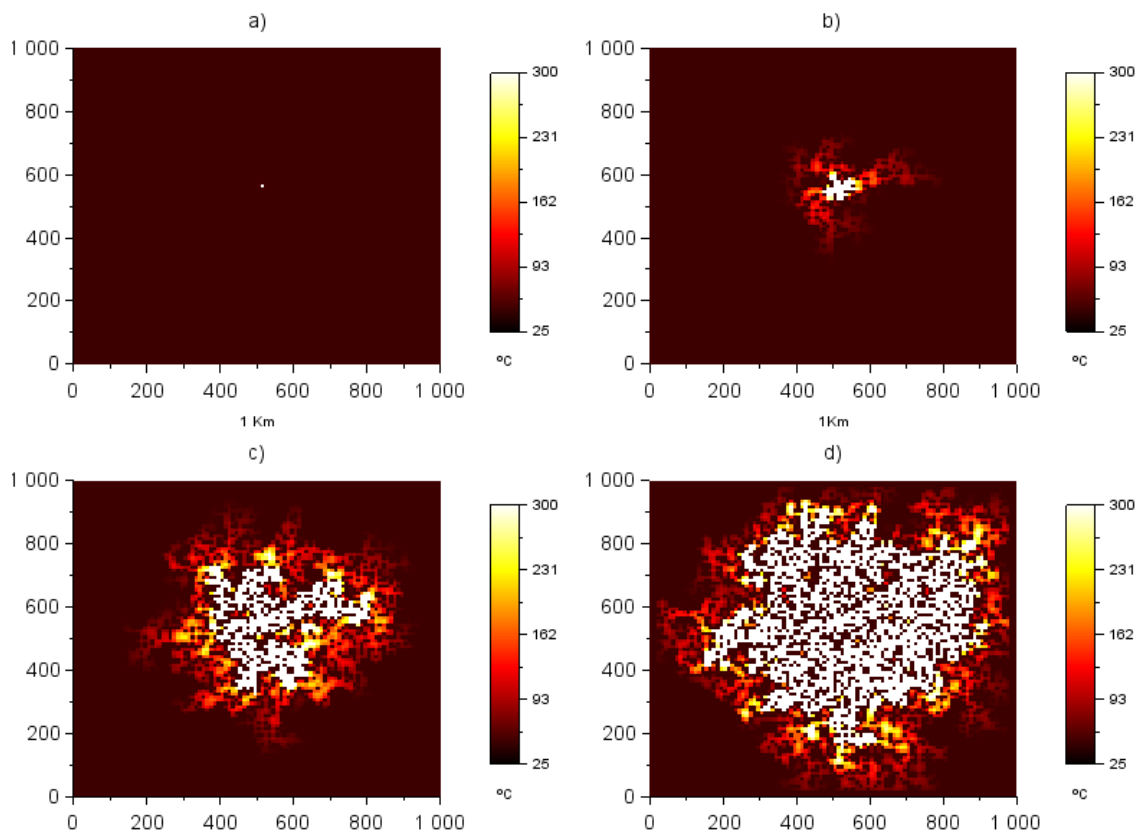


Figura 5.13. Gráficas de temperatura de la simulación de propagación del incendio con temperatura mayor. a) iteración 1, b) iteración 125, c) iteración 250 y d) iteración 375

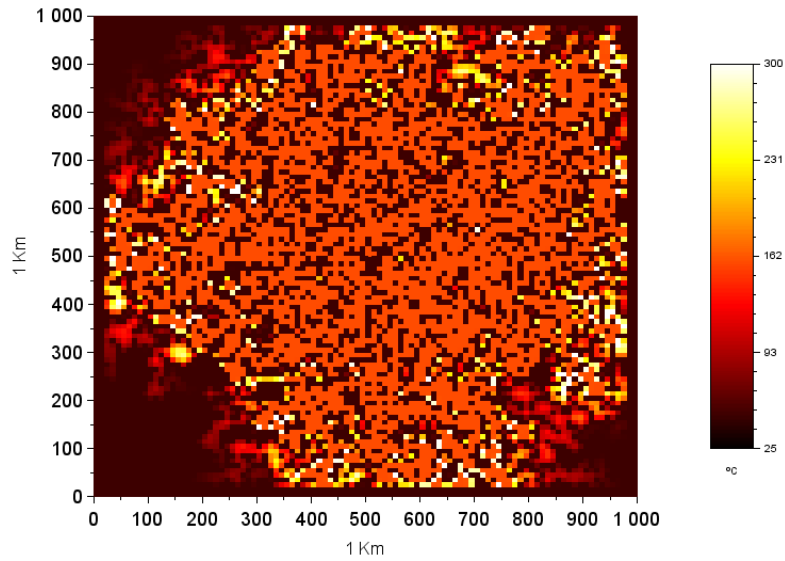


Figura 5.14. Temperatura del incendio en la iteración 500

A continuación se muestran algunos resultados obtenidos de simulaciones de propagación de incendios hechas a lo largo de 1000 iteraciones. A diferentes pasos de tiempo y sobre un dominio mayor de 5 km x 5 km. Es decir, una malla de distribución aleatoria de 500 x 500, con una resolución de 10 m². El inicio del incendio se localiza en la posición [240,250], como se observa en el esquema de distribución aleatoria de árboles del dominio (*Figura 5.15*). Los resultados siguen la curva de temperatura del árbol en ignición que se muestra en la *Figura 5.16*. Se desarrollaron sin alguna dirección preferencial por efecto del viento. Se presenta uno donde sí se simula la propagación con una dirección preferencial, por efecto del viento. Este último, utilizando los parámetros α_1 y α_2 descritos anteriormente.

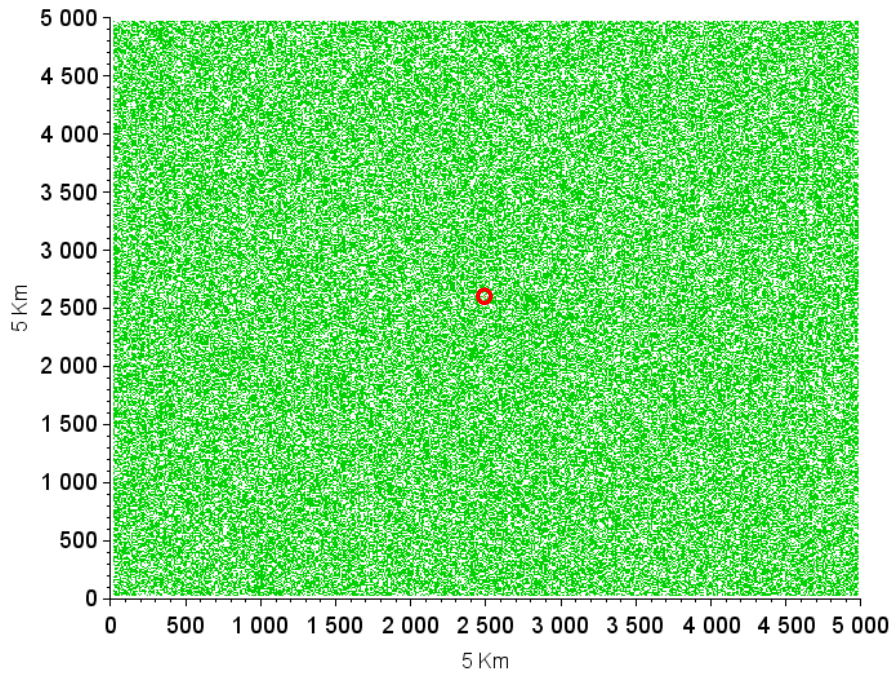


Figura 5.15. Esquema representativo de la distribución aleatoria de árboles en un dominio de 5Km x 5Km, que muestra la posición del incendio.

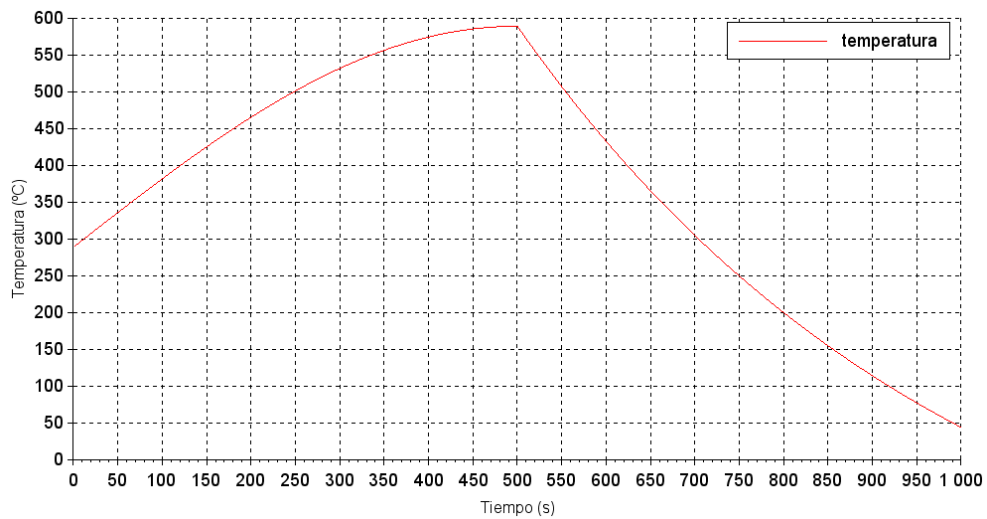


Figura 5.16. Curva de temperatura de un árbol en ignición a través de 1000 iteraciones.

La *Figura 5.17* muestra las gráficas de temperatura en diferentes iteraciones, de una simulación hecha con paso de tiempo $dt=1$, es decir, donde cada iteración representa 1 segundo. Siguiendo esto, se simuló la propagación de un evento que se desarrolla a lo largo de 1000 segundos (16.6 minutos aproximadamente). La gráfica de la *Figura 5.17a* presenta la temperatura en la iteración 250, después de aproximadamente 4 minutos desde el inicio, el incendio ha crecido, pero como el dominio es ahora mayor parece que ha sido poco. Está la propagación apenas en la cuarta parte de toda la simulación del evento. Después, en la *Figura 5.17b* se muestra la temperatura en el segundo 500 (minuto 8.3 aproximadamente), se observa que la propagación sigue en marcha, aumentó la superficie afectada dentro del dominio y el número de árboles con temperatura igual o mayor a la de ignición también aumentó. Ya en la iteración 750 (*Figura 5.17c*), es decir, en el minuto 12.5 desde el inicio, en el centro del incendio se muestra que la temperatura disminuyó significativamente. Esto es, después de 4 minutos que es la diferencia de tiempo con la gráfica anterior (*Figura 5.17b*) donde el centro se mostraba con temperatura de ignición, aquí ya va en decadencia, aunque todo el perímetro aún conserva árboles con temperatura de ignición. Como finalmente se aprecia en la *Figura 5.17d* en la iteración 1000, la superficie se extendió porque el incendio continuó propagándose. Esta última gráfica (en la iteración 1000) permite hacer notar que la propagación del incendio sigue en pie, alcanzando cerca de 1.5 km. Aumentando el perímetro de la superficie afectada alrededor de 9.4 km. Se observó una velocidad de propagación de alrededor de 5 km/h, esto es, 1.5 m/s aproximadamente.

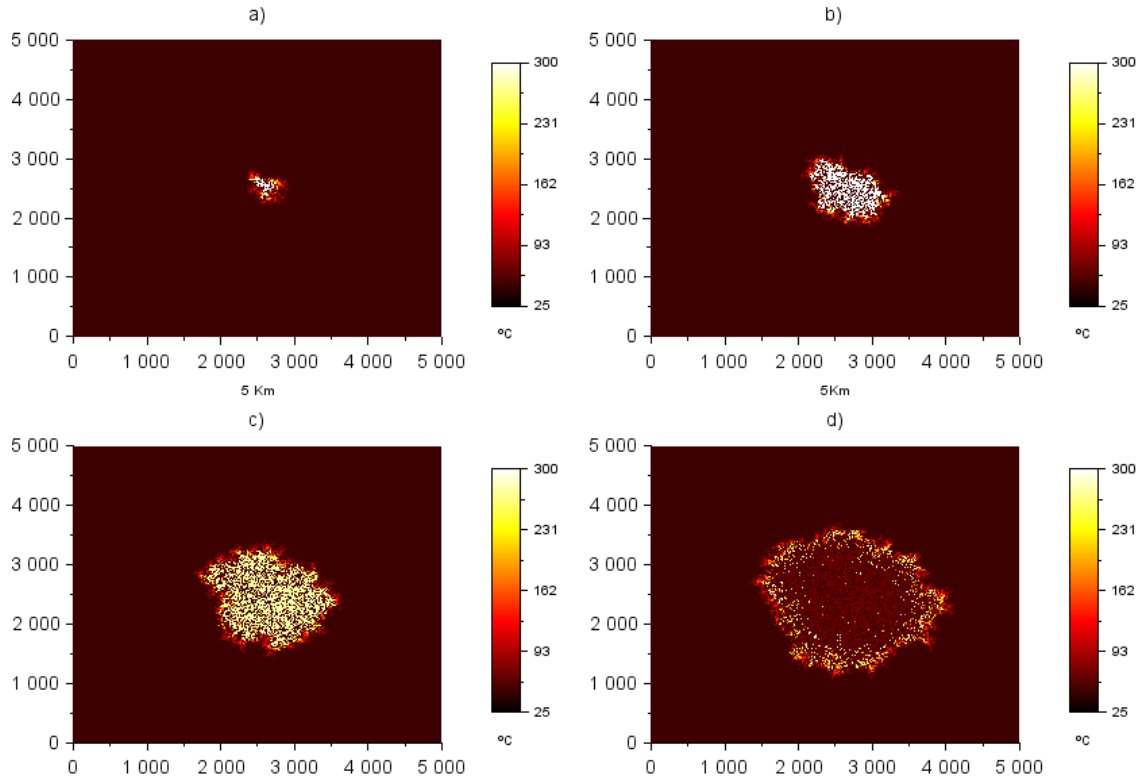


Figura 5.17. Gráficas de temperaturas de la propagación con $dt=1$, en las iteraciones: a) 250, b) 500, c) 750 y d) 1000

El siguiente resultado (*Figura 5.18*) muestra las gráficas de temperatura de la propagación de un incendio simulada con un paso de tiempo $dt=2$, por lo que ahora cada iteración representa 2 segundos (el doble de tiempo que la anterior). Entonces se simuló el desarrollo de un incendio a lo largo 33.3 minutos aproximadamente, con el doble de tiempo se obtiene un perímetro mayor del incendio y se observa el crecimiento. La *Figura 5.18a* presenta la temperatura en la iteración 200, es decir, en el segundo 400 (6.6 minutos aproximadamente) desde el inicio del incendio, como el paso de tiempo es mayor se aprecia un crecimiento mayor de la propagación. Después de 15 minutos desde el inicio del incendio (*Figura 5.18b*) ya se propagó cerca de 1.2 Km, aumentando la superficie afectada y por lo tanto el perímetro del incendio, se observa que todo sigue ardiendo. La mayoría de los árboles con la temperatura de ignición (o mayor). 8.3 minutos después de la última iteración (450), se observa en la gráfica (*Figura 5.18c*) tanto un crecimiento considerable del incendio, así como la temperatura aún por encima del punto de ignición, esto a 23.3 minutos aproximadamente

desde el inicio del incendio. La propagación continúa y el incendio sigue avanzando. Finalmente en la iteración 1000, que representa el último minuto de la simulación, confirma lo dicho anteriormente, la propagación llegó alrededor de 2.8 Km (Figura 5.18d) alcanzando un perímetro cerca de 17.5 km. Aunque el centro del incendio ya se está apagando, la superficie afectada sigue creciendo porque el incendio aún está en desarrollo. Mostrando una velocidad de propagación aproximada de 5 km/h al igual que la simulación anterior. Es importante mencionar que la densidad y la distribución de los árboles en el dominio influyen en gran medida en la forma que se da la propagación, a eso se debe la cierta tendencia que se observa en las gráficas, considerando que son simulaciones sin alguna dirección preferencial.

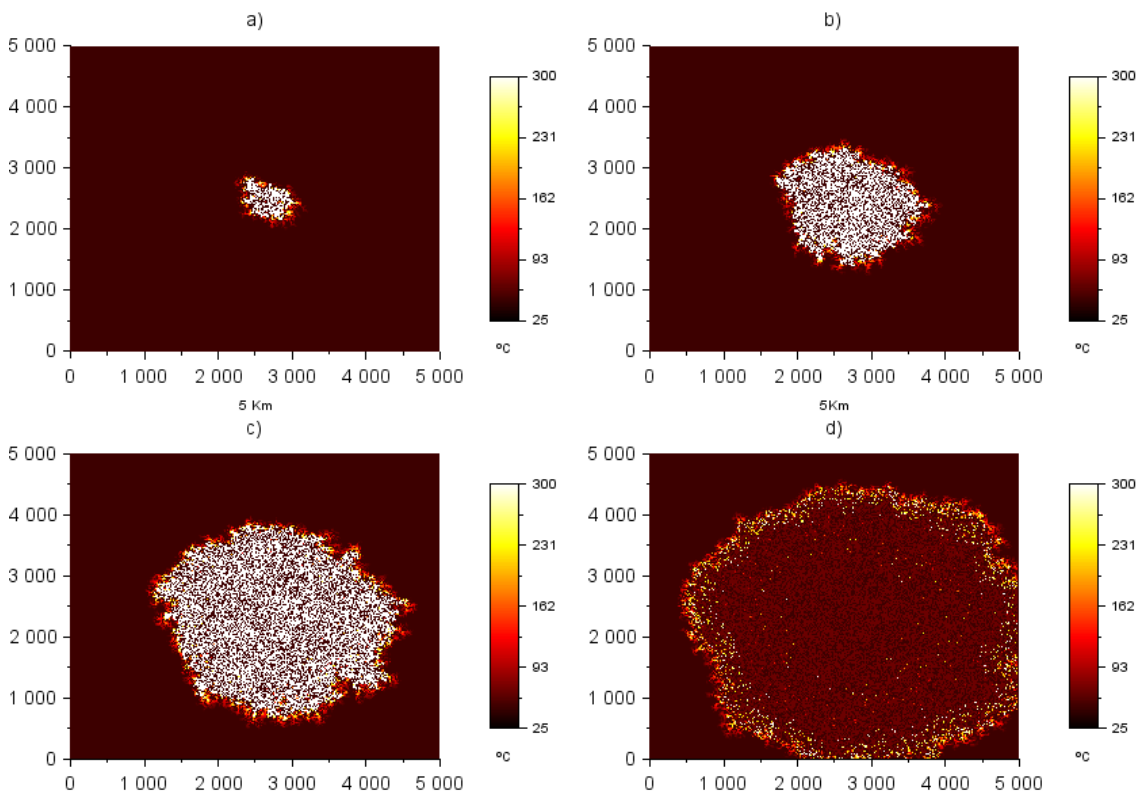


Figura 5.18. Gráficas de temperatura de la propagación con $dt=2$, en las iteraciones: a) 200, b) 450, c) 700 y d) 1000

Otro de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 5.19, se muestran las gráficas de temperatura de una simulación desarrollada con un paso de tiempo $dt=3$, es decir, ahora cada iteración equivale a 3 segundos. Se observan la

temperatura en las iteraciones: 100 (*Figura 5.19a*) después de 5 minutos del inicio del incendio, de igual forma que en los resultados anteriores la propagación ya se ve en marcha y el número de árboles con temperatura igual o por encima del punto de ignición ya es significativamente grande; después, en el minuto 20 (desde el inicio del incendio) (*Figura 5.19b*) el área afectada por el incendio incrementó considerablemente y la propagación del mismo continua, todo sigue ardiendo, avanzando hasta este punto alrededor de 2 km; en la iteración 700 (*Figura 5.19c*) que representa el minuto 35, es decir 15 minutos después de la última iteración graficada (400), se muestra un crecimiento considerable en la superficie del incendio, a pesar de que la curva de temperatura va en decadencia, el incendio sigue con altas temperaturas por encima del punto de ignición. En el perímetro la temperatura está aumentando, la propagación continúa. Como se muestra ya en la iteración 1000 (*Figura 5.19d*) los árboles del perímetro continúan encendidos, la propagación del incendio creció notablemente y el área del mismo también aumentó. Se sigue propagando como se observa, aunque la mayoría de la superficie haya alcanzado temperaturas bajas alrededor de 40 °C. Se simularon 50 minutos del desarrollo de un incendio, donde en el último minuto la propagación alcanzó cerca de 4.2 km, logrando un perímetro del área afectada de 26.3 km aproximadamente, ya no se aprecia porque rebasa el tamaño del dominio. Se observó una velocidad de propagación cerca de 6 km/h.

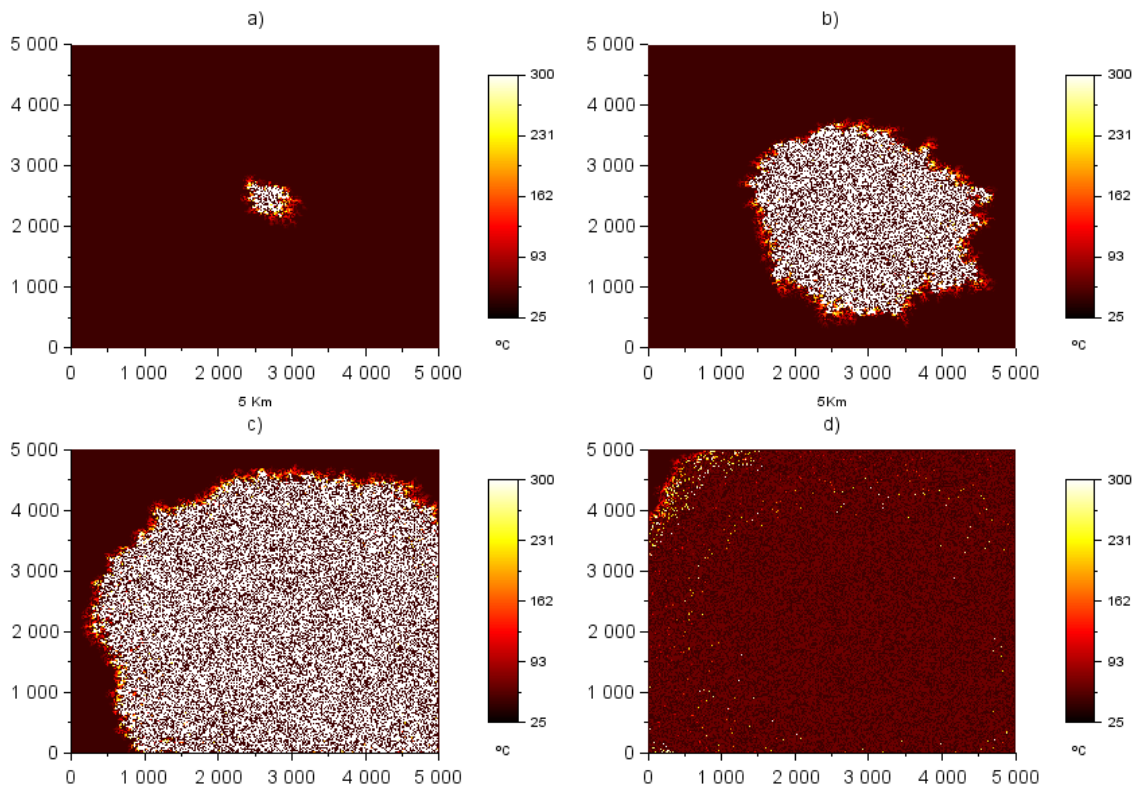


Figura 5.19. Gráficas de temperatura de la propagación con $dt=3$, en las iteraciones: a) 100, b) 400, c) 700 y d) 1000

Por último, se muestra el resultado de la simulación de la propagación de un incendio con dirección preferencial por efecto del viento hacia el Noreste (5) (Figura 5.20). Con un paso de tiempo $dt=2$. La posición del inicio del incendio es [300,200]. El viento comienza a tener un efecto sobre la propagación a partir de la iteración 400, es decir, a partir del minuto 13. En la primer gráfica (Figura 5.20a) se muestra la temperatura del incendio en la iteración 100, esto es, después de 3.3 minutos del inicio. Apenas se percibe la propagación y aún el viento no tiene algún efecto en ella. En la siguiente gráfica (Figura 5.20b) se presenta la temperatura en el minuto 13 desde el inicio (iteración 400=800 segundo), se observa que la superficie del incendio ha crecido, propagándose cerca de 1 km. Pero aún no exhibe algún efecto del viento. Ya en la iteración 700 (Figura 5.20c) se percibe claramente el efecto del viento sobre la propagación con dirección hacia el Noreste, después de 10 minutos desde que el viento tiene un efecto sobre la propagación del incendio, esta se da con mayor velocidad aumentando la superficie afectada y la región de árboles en ignición. En la última gráfica

(Figura 5.20d) que representa la temperatura en la iteración 950, se observa el incendio ya con temperaturas bajas alrededor de 40 °C, después de 33 minutos una región del incendio (donde inició) está por apagarse, no se alcanza a ver la parte que sigue encendida porque ya está fuera del dominio. Se simularon 33.3 minutos aproximadamente de un incendio. Reprodujo velocidades de propagación cerca de 10 km/h. Es interesante comparar los resultados mostrados en la Figura 5.20 con la imagen satelital mostrada en la Figura 1.7. Las formas de las áreas devastadas son muy semejantes.

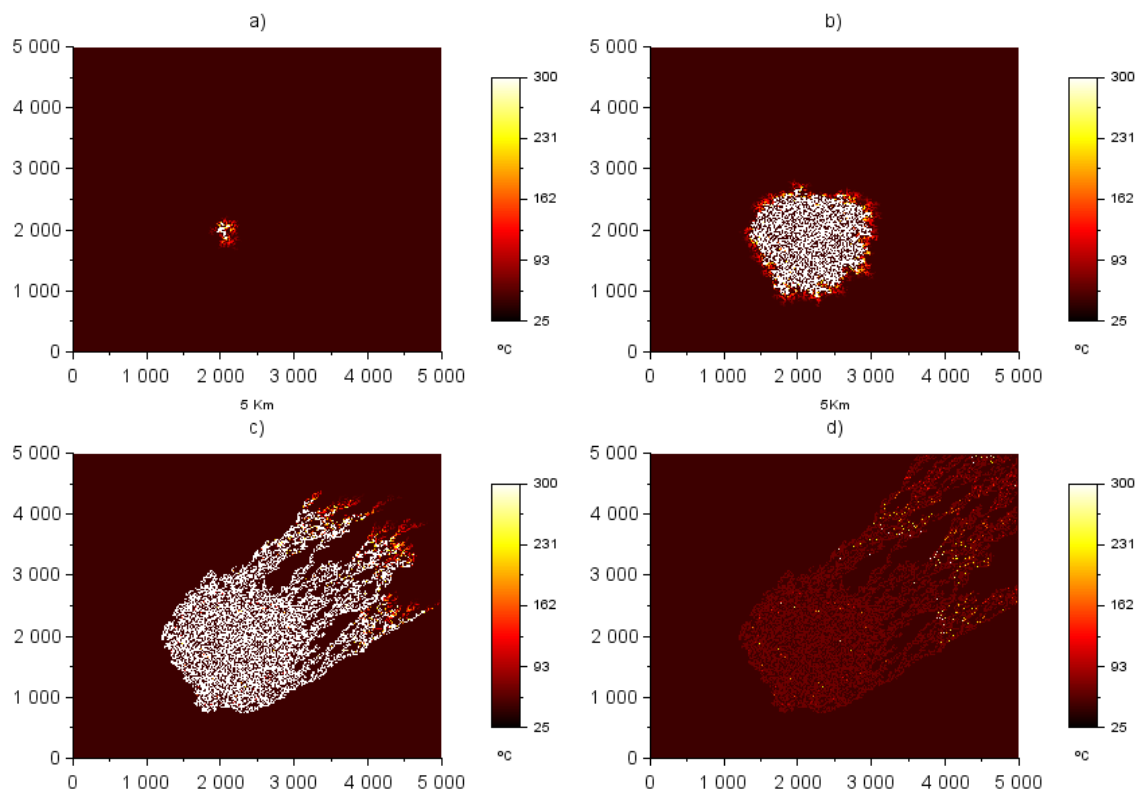


Figura 5.20. Gráficas de temperatura de la propagación con dirección preferencial 5 y $dt=2$, en las iteraciones: a) 100, b) 400, c) 700 y d) 950.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Los incendios forestales constituyen un problema ambiental mayor que requiere el conocimiento de la forma en que se propagan, además de las enormes cantidades de emisión de contaminantes.

Se desarrolló un modelo matemático para simular la propagación de incendios forestales. Esta primera solución consistió en la aplicación de un método de Montecarlo. Este método consiste en la propagación del incendio a través de la radiación de un cuerpo negro, es decir, se aplicó la ecuación de Stefan-Boltzmann para simular la propagación del calor de un árbol a otro en una región boscosa.

Se presentó el desarrollo del modelo matemático, el cual incluye en su solución aspectos de advección de calor, convergencia y divergencia de flujos de calor y difusión de calor. Este modelo matemático requiere el conocimiento de las velocidades atmosféricas. Esto implica la necesidad de un modelo de la dinámica meteorológica.

En este trabajo de tesis se decidió sustituir las ecuaciones diferenciales parciales del modelo matemático por la aplicación de la ecuación de Stefan-Boltzmann. Se demostró que con esta metodología es posible simular de manera aceptable la propagación de un incendio. En este proceso se aplicaron valores para la temperatura ambiente, temperatura de ignición, coeficientes de la decadencia exponencial de la radiación, valores de capacidad calorífica, densidad de la madera, masa, constante de Stefan-Boltzmann. Todo esto se aplicó en una malla aleatoria de distribución de árboles con una posición puntual para el inicio del incendio.

Fue posible simular aceptablemente velocidades de propagación de incendios reportados en la literatura.

Efectos de velocidad y dirección del viento también fueron parametrizados. Esto permitió simular direcciones preferenciales para la propagación de incendios bajo condiciones de viento.

El trabajo a futuro para desarrollar un modelo matemático-numérico implicaría el incluir un modelo simple de dinámica atmosférica y especialmente desarrollado para zonas de incendios con altas temperaturas, en donde al aire caliente tiende a producir procesos convectivos muy fuertes. El modelo atmosférico sería relativamente simple con una termodinámica de altas temperaturas y quizás de dos a tres capas únicamente.

El modelo como primera aproximación presenta deficiencias. Sólo se está considerando el término difusivo del modelo matemático y se parametrizaron algunos procesos (la pérdida de calor por efecto convectivo, efecto del aire en la propagación, etc). Puede ser perfeccionado una vez que se consideren los demás términos de la teoría matemática, con el desarrollo del modelo atmosférico. Además de otras variables esenciales para la propagación del incendio.

Es posible modelar la propagación de manera puntual, con un incendio bien documentado. Si se conoce la posición del origen, el polígono de la superficie afectada, la dirección y velocidad del viento. Ajustando los parámetros para la simulación. En este trabajo no fue posible porque en el país sólo se documentan incendios en base al número y la superficie afectada.

Eventualmente puede ser validado, con incendios bien documentados. Utilizando imágenes satelitales de algunos eventos que han ocurrido en el país. Es un arduo trabajo que se vio limitado por falta de documentación en materia de incendios y de tiempo. En este trabajo de tesis no se realizó.

Este es el primer modelo sobre propagación de incendios forestales desarrollado en México. Debido a la alta incidencia de incendios forestales en el país este trabajo abre un campo de investigación de mucha importancia para el país. Las decenas de miles de incendios que anualmente ocurren y el deterioro del medio

ambiente por los millones de toneladas emitidas a la atmósfera justifican esta línea de investigación.

En un futuro será posible asociar el ritmo de emisión de aerosoles con la propagación del incendio. Esta es una tarea a realizar en el futuro.

REFERENCIAS.

- [1] Albini, F. A. (1984). A Model for Fire Spread in Wildlands Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology*. Vol 42. 1985.
- [2] Anderson, H. E. (1969). HEAT TRANSFER AND FIRE SPREAD. Forest Service Research. USDA. 1969.
- [3] Andreae, M. O. (1991). Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climate and Biospheric Implications*, edited by J. S. Levine. pp. 3-21. MIT Press. Cambridge, Mass.
- [4] Bautista, F. S. (2009). Simulación Numérica de la Dispersión de Aerosoles Producidos por Incendios Forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco. Tesis de maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- [5] Bianchini, G. (2006). Wildland Fire Prediction based on Statistical Analysis of Multiple Solutions. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona.
- [6] Carmona, J. X., Flores, J. G., Chávez, A. A. (2011). ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGAS DE COMBUSTIBLES EN ECOSISTEMAS FORESTALES AFECTADOS POR INCENDIOS. *Rev. Mex. Cien. For.* Vol. 2 Núm. 3.
- [7] Castillo, M., Pedernera, P., Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *REVISTA AMBIENTE Y DESARROLLO de CIPMA*. Vol. XIX, num. 3 y 4, 2003.

- [8] CENAPRED. (2001). DIAGNÓSTICO DE PELIGROS E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES EN MÉXICO. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. México. ISBN: 970-628-593-8.
- [9] CONABIO. (2015). PROGRAMA PARA DETECCIÓN DE PUNTOS DE CALOR MEDIANTE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA. (http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html).
- [10] CONAFOR. (2011). ACTA DE LA XXIII REUNIÓN ORDINARIA DEL CONAF. México, D.F.
- [11] CONAFOR. (2013). Campaña 2013 de la Comisión Nacional Forestal.
- [12] CONAFOR. (2010). Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. Comisión Nacional Forestal. Tercera edición.
- [13] Frandsen, W. (1971). Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy. Combustion and Flame. Vol. 16. Copyright (1971) by The Combustion Institute Published by American Elsevier Publishing Company. Inc.
- [14] Gutierrez, B. N., Gómez, M., Valencia, S., Cornejo, E. H., Prieto, J. A., Gutiérrez, M. H. (2010). Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. del estado de Chiapas, México. Revista fitotecnia mexicana. Vol. 33. Chapingo. Versión impresa ISSN 0187-7380. Septiembre, 2010.
- [15] Julio, G., Giroz, G. (1975). NOTAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO Y SU APLICACIÓN EN EL CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES. BOSQUE Vol. 1 N° 1, 1975.

- [16]Lloret, F. (2004). Cap. 4 Régimen de incendios y regeneración. En Valladares (Ed.). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (pp. 101-126). Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.
- [17]Potter, E. B. (2002). A dynamics based view of atmosphere-fire interactions. International Journal of Wildland Fire. 2002.
- [18]Rothermel, R. C. (1972). A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING FIRE SPREAD IN WILDLAND FUELS. Forest Service Research. USDA.
- [19]Rothermel, R. C. y Anderson, H. E. (1966). FIRE SPREAD CHARACTERISTICS DETERMINED IN THE LABORATORY. Forest Service Research. U.S. 1966.
- [20]Villers Ruíz Lourdes y López Blanco Jorge (Editores) (2004). Incendios forestales en México. Métodos de evaluación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 164 p. ISBN 970-32-1843-1.