



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

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**CARTOGRAFÍA DE RIESGO DE INCENDIOS  
FORESTALES APLICANDO SENSORES  
REMOTOS Y SIG**

Tesis que presenta

**MARÍA DE LOS ÁNGELES MARTÍNEZ RAMÍREZ**

Para obtener el grado de

**Maestra en Geociencias Aplicadas**

**Directores de la Tesis:**

Dr. Jaime Carrera Hernández

Dr. José Noel Carbajal Pérez

San Luis Potosí, S.L.P., Diciembre de 2012



## Constancia de aprobación de la tesis

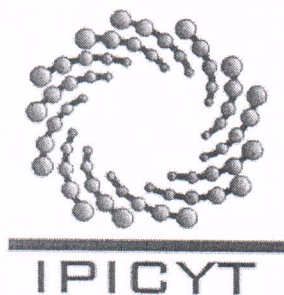
La tesis **CARTOGRAFÍA DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES APLICANDO SENSORES REMOTOS Y SIG** presentada para obtener el Grado de de Maestro(a) en Ciencias Aplicadas en la opción Geociencias Aplicadas fue elaborada por **María de los Ángeles Martínez Ramirez** y aprobada el **05 de Diciembre de 2012** 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.



## Créditos Institucionales

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

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 250297 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 003 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 5 días del mes de diciembre del año 2012, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dra. Birgit Steinich</b>	<b>Presidenta</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Jaime Jesús Carrera Hernández</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UNAM</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

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

### MAESTRA EN CIENCIAS APLICADAS EN LA OPCIÓN DE GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

**María de los Ángeles Martínez Ramírez**

sobre la Tesis intitulada:

*Cartografía de riesgo de incendios forestales aplicando sensores remotos y SIG*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**  
**Dr. Jaime Jesús Carrera Hernández (UNAM)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 13:05 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 5 días del mes de diciembre de 2012.

*Marcial Bonilla*  
**Dr. Marcial Bonilla**  
Secretario Académico

*Ivonne Lizette Cuevas Vélez*  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



# Dedicatorias

*A mis padre*

*Humberto Martínez Hernández*

*Francisca Ramírez González*

*Y a mi amiga*

*Erika Cano que ya descansa con Dios*

# Agradecimientos

A Dios por dejarme llegar a este momento de mi vida.

A mis padres Humberto y Francisca por su invaluable apoyo durante toda mi vida para lograr mis objetivos.

A mis hermanos Andrés y Daniel porque siempre son apoyo y motivo de alegría en mi vida.

A mis abuelitos Ausencio y Melita por su amor, su paciencia y su apoyo a lo largo de mi vida.

A mis amigas Yahana, Sandra y Erika porque todo éste tiempo de trabajo fueron mi soporte en todo momento.

A mis amigos y compañeros Adriana, Alan, Simón, Pablo, Oyuki, José Luis por compartir conmigo esta importante etapa de mi vida.

A mi amigo Manuel y mi prima Karla porque en todo momento han sido de gran ayuda y un apoyo incondicional.

Al Dr. Jaime Carrera por ser guía y apoyo en la realización de éste trabajo.

Al Dr. Noel Carbajal por haber sido parte fundamental para lograr la conclusión de mi tesis.

Al Dr. Alfredo Ramos por su amistad y apoyo durante mi estancia en el IPICYT.

A la Dra. Birgit Steinich por sus consejos y guía en la etapa final de mi trabajo.

Al IPICYT y al CONACYT por el apoyo económico y de estancia que recibí durante estos dos años.

A todos ustedes muchas gracias hoy y por siempre.

# Índice general

Constancia de aprobación de la tesis	I
Créditos Institucionales	II
Acta de examen	III
Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Índice general	VI
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
Abreviaturas	XI
Resumen	XII
Abstract	1
1. Introducción	4
1.1. Impacto Ambiental . . . . .	4
1.2. Incendios forestales y calidad del aire . . . . .	5

1.3. Afectación al suelo y el agua . . . . .	6
1.4. Riesgos para la salud . . . . .	6
1.5. Tipos de incendios . . . . .	7
1.6. Incendios forestales y el fenómeno El Niño . . . . .	8
1.7. Incendios forestales en México . . . . .	8
1.8. Tipos de vegetación en México . . . . .	10
<b>2. Zona de estudio</b>	<b>12</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>16</b>
3.1. El Modelo . . . . .	17
3.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada . . . . .	19
3.3. Combustible . . . . .	19
3.4. Temperatura . . . . .	20
3.5. Humedad Relativa . . . . .	20
3.6. Contenido de Humedad en Equilibrio . . . . .	21
3.7. Porcentaje de Combustible Muerto . . . . .	22
3.8. Humedad de Extinción de Combustible . . . . .	22
3.9. Fracción de Humedad del Combustible . . . . .	24
3.10. Verdor Relativo . . . . .	24
3.11. Proporción Máxima de Combustible Vivo . . . . .	24
3.12. Proporción de Combustible Vivo . . . . .	25
3.13. Puntos de Calor . . . . .	25
3.14. Herramientas para Procesar la Información . . . . .	26
3.14.1. Sistema de Información Geográfica GRASS . . . . .	26
3.14.2. Python . . . . .	26
3.14.3. R-Statistics . . . . .	26



3.14.4. PostgreSQL . . . . .	26
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>27</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>29</b>
<b>Apéndices</b>	<b>30</b>
<b>A. Python script para renombrar mapas dentro de GRASS</b>	<b>30</b>
<b>B. Python script para escalar NDVI</b>	<b>38</b>
<b>C. Python script para hacer medias de 16 días</b>	<b>40</b>
<b>D. Python script exportar mapas TIF</b>	<b>45</b>
<b>E. Python script para reproyectar mapas</b>	<b>47</b>
<b>F. Python script para importar mapas a GRASS</b>	<b>48</b>
<b>G. Python script para importar vectores .shp a GRASS</b>	<b>50</b>
<b>H. Python script cálculos del FPI</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

# Índice de tablas

1.1. Superficie en $km^2$ de los diferentes tipos de USV. Datos: CONABIO, 1999	11
2.1. USV en la zona de estudio. Fuente: CONABIO, 1999. . . . .	13
3.1. Humedad de Extinción de Combustible. Fuente: land, 2000 . . . . .	23

# Índice de figuras

1.1. Triángulo de fuego . . . . .	8
1.2. Incendios año 2000. Fuente: SEMARNAT, 2011 . . . . .	9
1.3. Incendios año 2001. Fuente: SEMARNAT,2011 . . . . .	9
2.1. Zona de estudio. Datos: CONABIO, 1999 . . . . .	14
2.2. Tipos de climas. Fuente: CONABIO, 1998. . . . .	15
3.1. Diagrama para el cálculo del FPI . . . . .	18
3.2. Mapa de Índice Normalizado de Vegetación. 18/02/2000-05/03/2000. . . . .	19
3.3. Distribución de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. . . . .	20
3.4. Temperatura media para 16 días. 18/02/2000-05/03/2000. . . . .	20
3.5. Mapa de Humedad relativa. 18/02/2000-05/03/2000. . . . .	21
3.6. Mapa de Contenido de Humedad en equilibrio. 18/02/2000-05/03/2000. . . . .	22
3.7. Porcentaje de Humedad de Combustible . . . . .	23
3.8. Puntos de Calor abril de 2000. Fuente:CONABIO, 2012. . . . .	25
4.1. Índice Potencial de Incendio. 18/02/2000-05/03/2000. . . . .	28
4.2. Puntos de Calor FPI de marzo a mayo de 2000. . . . .	28
4.3. Puntos de Calor contra FPI de marzo a mayo de 2001 . . . . .	28

# Abreviaturas

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
DEM	Modelo Digital de Elevación
EMC	Contenido de Humedad en Equilibrio
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
FPI	Índice Potencial de Fuego
HR	Humedad Relativa
$ND_{mn}$	Índice Normalizado de Vegetación Mínimo
$ND_o$	Índice Normalizado de Vegetación Inicial
$ND_{mx}$	Índice Normalizado de Vegetación Máximo
NDVI	Índice Normalizado de Vegetación
msnm	Metros sobre el nivel del mar
$MX_d$	Humedad de Extinción de Combustible
SIG	Sistemas de Información Geográfica
RG	Verdor Relativo
ppm	Partes por millón
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
T	Temperatura
$T_{max}$	Temperatura máxima
$T_{min}$	Temperatura mínima
$T_{med}$	Temperatura media
$TN_f$	Fracción de combustible vivo

# Resumen

La Determinación de las zonas con mayor o menor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales naturales utilizando sistemas de información geográfica, es una herramienta de suma importancia para implementar posibles estrategias de manejo, prevención y mitigación de los siniestros.

Cada año los incendios forestales son causa de destrucción de miles de hectáreas de vegetación en México, llevando consigo una serie de afectaciones tanto a la salud de los seres vivos como pérdidas económicas muchas veces incuantificables.

La aplicación del modelo Índice Potencial de Incendio (FPI) en los estados de Michoacán, Estado de México, Distrito Federal y Morelos permitió identificar zonas susceptibles de incendiarse para los años 2000-2001.

Este trabajo se desarrolló mediante la aplicación de los software: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) que es un Sistema de Información Geográfica (SIG), el manejo de datos utilizando el servidor de base de datos objeto-relacional PostgreSQL, el lenguaje de programación Python y el software R-Statistics, todos de código abierto, de uso y distribución libre. El método desarrollado puede ser extendido a todos los estados de México.

Palabras clave: Incendios, FPI, Susceptibilidad, SIG, GRASS, Python, R, PostgreSQL.

# Abstract

The identification of areas with varying likelihood of wildfires using geographic information systems, is an important tool to implement possible management strategies, prevention and mitigation of disasters.

Every year, forest fires are the cause of destruction of thousands of hectares of vegetation in Mexico, bringing themselves several affectations such as health of living beings and economic losses are often unquantifiable.

The application of the Fire Potential Index (FPI) in the states of Michoacán, State of Mexico, Mexico City and Morelos allowed to identified the ideal areas to get burned for the years 2000-2001.

This work was developed through the application of different software like: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) that is a Geographic Information System (GIS), data management using the database server PostgreSQL, the programming language Python and R-Statistics software, all of open code to use and free distribution. This method can be extended to all states of Mexico

Keywords: Fire, FPI, Susceptibility, GIS, GRASS, Python, R, PostgreSQL.

# Objetivos

Obtener información de temperatura, humedad del medio ambiente, y variaciones en la vegetación que funja como base en la aplicación del modelo Índice Potencial de Incendios en los estados de Michoacán, Morelos, Estado de México y Distrito federal, pues son los estados que SEMARNAT reporta con mayor incidencia de incendios forestales cada año. Todo esto con el fin de generar una cartografía de susceptibilidad de incendios forestales, además de descartar zonas donde es mínima la probabilidad de ocurrencia de éste tipo de fenómenos.

La finalidad del proyecto es presentar una cartografía que sirva de referencia para generar métodos preventivos como puede ser la remoción de materia orgánica del suelo forestal, la cual funge como combustible, o en caso necesario realizar la evacuación de zonas con alta susceptibilidad de incendio.

El trabajo se realizó a partir del modelo Índice Potencial de Fuego, elaborado y aplicado en los Estados Unidos de América para detectar las zonas con probabilidad de incendio, cuyos resultados varían desde 0 hasta 100 %.

# Justificación

Debido a que los incendios forestales se han convertido en un problema de escala mundial por los millones de hectáreas forestales devastadas cada año y las miles de toneladas de contaminantes enviados a la atmósfera, los contaminantes depositados en el suelo y el daño irreversible a todo ser vivo, es necesario implementar métodos que sirvan para prevenir la ocurrencia o en su defecto minimizar los efectos de éste tipo de fenómenos.

Los miles de incendios ocurridos año con año en México y en algunos años su incremento, además de la devastación que implica un fenómeno de ésta naturaleza, es motivo suficiente para implementar programas de detección de zonas susceptibles a incendiarse en nuestro país.

La cartografía de riesgo de incendios forestales es una herramienta utilizada en países como Estados Unidos y Canadá para, primeramente zonificar áreas susceptibles a incendiarse y posteriormente dicha cartografía es utilizada como base en toma de decisiones preventivas.

En México es de vital importancia la aplicación de procedimientos de ésta índole, es por ello que se realizó éste trabajo, donde el principal objetivo es ajustar la metodología previamente utilizada y validada en los Estados Unidos de América, a las características de uso de suelo y vegetación, geográficas y climáticas de nuestro país, haciendo uso de la información meteorológica con la que se cuenta hasta éste momento.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Impacto Ambiental

El papel que juegan los incendios forestales en la vegetación es ambivalente, en algunos ecosistemas el fuego es vital para mantener su dinámica, biodiversidad e incluso su productividad (Hamilton, 2008). Es posible observar como los incendios actúan sobre la competencia entre las diversas especies vegetales, por ejemplo, el fuego reduce o limita el desarrollo de plantas leñosas, lo cual permite que las plantas herbáceas se desarrollen, además, el fuego reduce el desarrollo de plantas silvestres y da espacio para que se desarrollen las plantas cultivables (Vélez, 2006).

Sin embargo, los incendios forestales son también grandes fuentes de emisión de contaminantes en la atmósfera, además de destruir millones de hectáreas forestales, pastizales o de cualquier tipo de vegetación (Villers y López, 2004), solamente en el año 2002 en los Estados Unidos de América se destruyeron 1.7 millones de hectáreas forestales (Hamilton, 2008).

Las propiedades químicas, físicas, biológicas y minerales del suelo pueden también ser afectadas por incendios forestales (Certini, 2005).

Los daños ocasionados por un incendio forestal son difíciles de cuantificar, si bien es posible determinar cuántas hectáreas de terreno forestal fueron afectadas, y quizás las pérdidas económicas que dicha afectación implica, lo que no es posible medir es el daño inmediato y futuro a la salud de todo ser vivo.

Haciendo hincapié en las pérdidas económicas podemos resaltar que estos destruyen millones de hectáreas de valiosas maderas y otros productos forestales cada año. La destrucción de los bosques y el costo de la lucha contra los incendios asciende a varios miles de millones de dólares (Hamilton, 2008).

Los incendios forestales son causa de muerte casi inmediata de reptiles, anfibios y todo tipo de fauna que tenga poca movilidad (Villers y López, 2004). En el caso de los mamíferos, que pueden huir con mayor facilidad del fuego, es posible que la muerte se presente posteriormente por hambre o depredación al no encontrar refugios, e incluso por los daños ocasionados por la inhalación de los gases producidos por el incendio (Cochrane, 2003).

Un número limitado de naciones dispone de datos estadísticos confiables sobre la ocurrencia de incendios, áreas devastadas y pérdidas ocasionadas; entre los países que cuentan con datos más confiables se encuentran todos los países de Europa Occidental y oriental, los Estados Unidos y Canadá (Schwela et al., 2001)

A pesar de conocer el impacto social, económico y ambiental que produce un incendio forestal, la información que se tiene es insuficiente. Por tanto, es de gran importancia desarrollar políticas y planeaciones para prevenir y detener de manera eficiente los incendios (Benndorf et al., 2007).

## 1.2. Incendios forestales y calidad del aire

Los incendios forestales son fuente potencial de emisión de contaminantes atmosféricos (Bravo et al., 2004). Se estima que estos son la segunda fuente principal de producción de  $PM_{2.5}$  (material particulado inhalable de diámetro menor o igual a  $2.5\mu m$ ), lo cual significa un impacto en la calidad del aire, afectando incluso lugares alejados a la zona incendiada pues las emisiones pueden viajar por distancias largas gracias al viento.

El humo despedido durante un incendio forestal contribuye significativamente al aumento de los gases de efecto invernadero (Andreae, 1991). La quema de biomasa es común y extendida a lo largo de los trópicos, se calcula que cerca del 87% de ésta ocurre ahí. En los trópicos se estima que el 42% de las emisiones producidas por la quema de biomasa ocurre en África, el 29% en Asia, 23% en Sudamérica y solo el 6% en Oceanía (Andreae y Wilgen, 1997). En una combustión completa se produce principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua, pero también se producen sustancias como óxido de nitrógeno ( $NO_x$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y el monóxido de carbono ( $CO$ ), además las emisiones suelen contener componentes orgánicos volátiles.

Además de la contaminación, el humo producido durante un incendio puede provocar la interrupción del tránsito aéreo e incluso puede propiciar accidentes aéreos o marinos tales como el ocurrido en septiembre de 1997 en Sumatra donde se perdió una aeronave y 234 vidas humanas, el suceso fue atribuido a problemas con el tránsito aéreo

por un episodio grave de smog creado por incendios producidos en Indonesia y y países vecinos (Sastry, 2002).

### 1.3. Afectación al suelo y el agua

El suelo es una composición heterogénea de partículas minerales y materia orgánica, y ésta es producto de la constante interacción entre la flora y la fauna, el clima, la topografía y las características geológicas en largos periodos de tiempo (Jenny, 1941). Los cambios resultantes en el suelo después de un incendio forestal producen variaciones en el agua, la flora y la fauna de la zona afectada debido a su compleja interacción y co-dependencia; el impacto del fuego en el suelo está en función de la intensidad y la duración del incendio (Neary, 2004).

Un efecto del fuego moderado en el suelo es la creación de una pequeña capa impermeable que evita que el agua penetre, lo cual significa reducción en la conductividad hidráulica de la zona (Certini, 2005). Además las propiedades químicas del suelo son afectadas durante un incendio forestal y por lo tanto, los procesos químicos que se llevan a cabo en el suelo también sufren modificaciones (DeBano, 1969). Entre las propiedades afectadas por el fuego se encuentran la modificación en el contenido de carbono ( $C$ ), nitrógeno ( $N$ ), fósforo ( $P$ ), azufre ( $S$ ) y el cambio de  $pH$  (Knoepp et al., 2005).

Para el caso particular del agua el análisis se vuelve más complejo pues dependiendo de la intensidad del incendio forestal se llega a afectar o modificar el ciclo hidrológico. Los procesos de infiltración y evapotranspiración, la capacidad de almacenar humedad del suelo y los flujos superficiales pueden ser afectados por el fuego (Neary y Ffolliott, 2005).

### 1.4. Riesgos para la salud

Existe poca información respecto a las emisiones tóxicas emitidas durante un incendio forestal (Smith et al., 2004). Entre los gases emitidos durante un incendio se encuentran el dióxido de carbono, el metano, carbono orgánico y el monóxido de carbono (Andreae, 1991). Estos gases, son tóxicos y además contribuyen al efecto invernadero. Algunos efectos inmediatos ocasionados por la exposición a estos gases son aumento de problemas respiratorios preexistentes (como el asma), reducción del funcionamiento pulmonar, dolor torácico, irritación en los ojos, fatiga, dolor de cabeza, mareos y estrés, todo relacionado con la exposición al  $PM_{2.5}$  (California-Environmental-Protection-Agency, 2009).

Un estudio realizado en Darwin, Australia, después de la quema de arbustos para los años 2000, 2004 y 2005, mostraron que las personas que habitan en zonas cercanas al área incendiada eran más vulnerables a padecer enfermedades respiratorias y cardíacas (Weinhold, 2011).

Un incendio causa pérdida o debilitación de árboles y cubierta vegetal, dejando a su paso grandes cantidades de residuos muertos, los cuales llegan a provocar enfermedades que terminarán afectando la flora y fauna sobreviviente en la zona afectada (si la hubiera).

Es importante resaltar que los incendios forestales perjudican el equilibrio de los ecosistemas, pues provocan escasez de alimentos y cobijo para la fauna de las zonas devastadas, inciden también sobre la fotosíntesis disminuyendo el proceso de absorción de dióxido de carbono y de emisión de oxígeno.

## 1.5. Tipos de incendios

Cuando el suelo se encuentra cubierto por materia orgánica acumulada ésta puede llegar a encenderse y propagar el fuego incluso si la materia orgánica se encuentra húmeda. Éste proceso sucede debido a que la parte del combustible que se encuentra en contacto con el calor se oxida y la oxidación avanza lentamente, lo que produce que el material adyacente se seque a un ritmo igual y se vaya incendiando.

- Un incendio se puede llevar a cabo con o sin llamas visibles, el fuego se va propagando bajo el suelo mineral (esto es favorecido por la acumulación y compactación del combustible). A éste tipo de combustión se le conoce como incendio subterráneo, los cuales matan casi toda vegetación arraigada al material que se está consumiendo, sin embargo, vegetación con raíces profundas y cortezas gruesas pueden llegar a sobrevivir (Bautista, 2009).
- Cuando el proceso de ignición se produce en la superficie del suelo y se propaga por la misma de manera horizontal, se conoce como incendio superficial, éste consume el combustible depositado sobre el suelo y árboles pequeños o arbustos, pero también pueden llegar a afectar las bases de los árboles más altos.
- El tipo de incendio que se considera como de mayor impacto y desastre es aquel que inicia de manera superficial, pero se va propagando por los troncos de los árboles hasta llegar a las copas e inicia su avance de copa en copa, a estos se les conoce como incendios aéreos o de copa, y suelen destruir toda materia orgánica a su paso.

Para que se genere un incendio es necesario que se conjunten tres elementos: combustible, oxígeno y calor. Estos se representan con el llamado triángulo del fuego

(Figura 1.1).



Figura 1.1: Triángulo de fuego

## 1.6. Incendios forestales y el fenómeno El Niño

El fenómeno del niño es una variación en el comportamiento climático debido a diversas interacciones entre la atmósfera y el océano el cual se relaciona con la temperatura, el viento y anomalías de la precipitación (Gamarra, 2007)

Los patrones regionales de fuego varían respecto a los microclimas mientras que el patrón local varía con el terreno de acuerdo a su geomorfología y vegetación (Rowe, 1983). La variación de las lluvias alrededor del mundo provocadas por el fenómeno del Niño tienen como consecuencia un impacto en el clima del planeta; Austria, Indonesia, Brasil e incluso México han vivido periodos de sequía severos después de la aparición de éste fenómeno (Conde et al., 2004). Durante 1997 y 1998 ocurrieron grandes incendios forestales en algunos países incluido México debido a condiciones extremas de baja humedad relativa del aire, mínimo contenido de humedad en la vegetación, altas temperaturas y vientos cálidos, todas esas condiciones fueron ocasionadas por El Niño (Castillo, 2010).

La generación de incendios más intensos fue en los años 1997 y 1998, estos están asociados al más fuerte de los eventos de El Niño (NASA, 2003).

## 1.7. Incendios forestales en México

La extensión territorial de México es de 1,967,138  $km^2$  con una área forestal de 141.7 millones de hectáreas de los cuales 56.8 millones de hectáreas son zonas templadas y tropicales, y 58.4 millones de hectáreas son zonas con vegetación árida y semiárida (Cedeño, 2001). Además nuestro país se ubica en el doceavo lugar respecto a superficie forestal mundial (Hamilton, 2008). Estudios muestran que el país cuenta con 33.5 millones de hectáreas de bosques, 32.11 millones de hectáreas de selvas, 58.08 millones de hectáreas de zonas áridas y semiáridas, 2.58 millones de hectáreas de vegetación hidrófila, 6.95 millones de hectáreas de vegetación inducida y 12,38 millones de hectáreas de pastizales (SEMARNAT, 2011).

Los incendios forestales en México ocurren normalmente entre los meses de enero y julio, siendo marzo y abril los de mayor recurrencia, coincidiendo con los meses más secos del año. Se estima que aproximadamente el 97 % de los siniestros son de tipo antropogénico (producidos por el hombre), de estos se estima que el 54 % se producen por actividades agropecuarias (Capulín et al., 2010), lo que implica mayor dificultad para lograr predecir eventos de manera individual.

México es un país megadiverso, poseedor de gran variedad de animales y plantas, se estima que posee el 70 % de la biodiversidad mundial.

Su gran variedad forestal se ve afectada año con año a causa de incendios forestales. En el año 2009 se generaron 9,269 incendios forestales a nivel nacional, afectando 296,344 hectáreas de superficie (SEMARNAT, 2011).

La gran variedad de daños ocasionados por los incendios forestales, además de su recurrencia y, en algunos años su incremento en nuestro país, hacen de los incendios forestales un fenómeno de gran importancia analizar.

Una herramienta de gran utilidad para el manejo de los incendios forestales es el poder determinar la probabilidad de iniciación de uno de estos, lo cual es la finalidad al realizar éste trabajo de investigación.

Las Figuras 1.2 y 1.3 muestran el número de incendios forestales registrados por la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) para los años 2000 y 2001 respectivamente donde se resaltan con asterisco los estados utilizados para éste estudio.

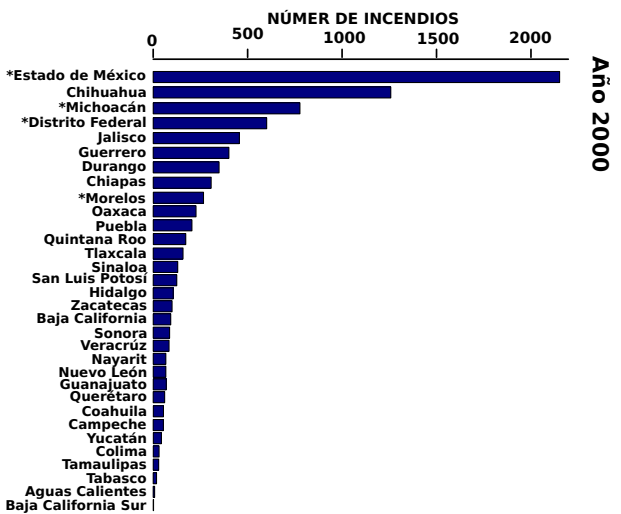


Figura 1.2: Incendios año 2000. Fuente: SEMARNAT, 2011

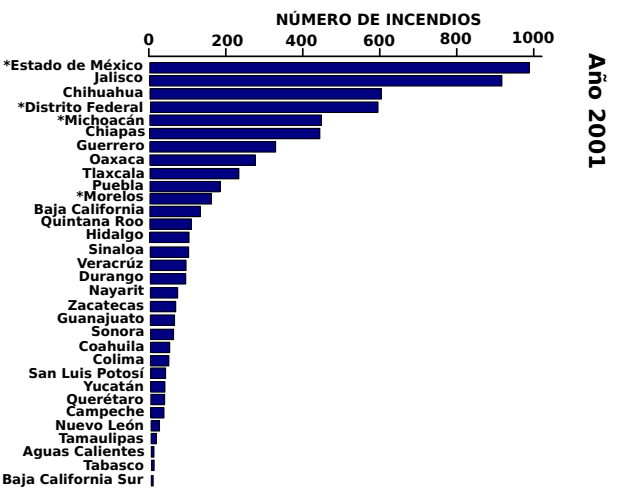


Figura 1.3: Incendios año 2001. Fuente: SEMARNAT, 2011

## 1.8. Tipos de vegetación en México

La ubicación de las áreas susceptibles de incendios es fundamental en los ordenamientos de uso de suelo dentro del país así como para el desarrollo de campañas de prevención de riesgos. Para ello es necesario identificar en primer lugar cuáles son los usos de suelo y coberturas vegetales presentes en incendios forestales ocurridos anteriormente. La tabla 1.1 muestra la superficie total que ocupan cada Uso de Suelo y Vegetación (USV) en el país.



## USO DE SUELO Y VEGETACIÓN 2009

USV	SUPERFICIE TERRITORIAL ( $km^2$ )	
1	Áreas sin vegetación aparente	7105
2	Bosque de coníferas distintas a Pinus	5247
3	Bosque de encino	164,124
4	Bosque de pino	164,293
5	Bosque mesófilo de montaña	18,441
6	Chaparral	31,456
7	Ciudades importantes	1985
8	Cuerpos de agua	8218
9	Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	406,962
10	Manglar	9847
11	Matorral desértico y micrófilo	228,520
12	Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical	105,699
13	Matorral rosetófilo	108,005
14	Matorral sarcocrasicaule	103,102
15	Mezquital - huizachal	36,718
16	Palmar	1397
17	Pastizal natural	102,755
18	Popal y tular	11,458
19	Sabana	7078
20	Selva alta perennifolia y subperennifolia	47,249
21	Selva baja caducifolia y subcaducifolia	165,365
22	Selva baja perennifolia y subperennifolia	23,683
23	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	49,217
24	Selva mediana perennifolia y subperennifolia	65,129
25	Vegetación de galería	2596
26	Vegetación de suelos arenosos	24,619
27	Vegetación halófila y gipsilófila	46,479
28	Sin datos	4,531,938
	Total	6,478,684

Tabla 1.1: Superficie en  $km^2$  de los diferentes tipos de USV. Datos: CONABIO, 1999

# Capítulo 2

## Zona de estudio

Por ser los estados con mayor incidencia de incendios forestales en el país reportados por SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (SEMARNAT, 2011), se eligieron para éste estudio los estados de Michoacán, Estado de México, Distrito Federal y Morelos, y parte de los estados de Guerrero, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Guanajuato, Jalisco y Querétaro. La zona de estudio se localiza en las coordenadas geográficas  $17.30^\circ$  y  $20.30^\circ$  Norte y 104 y 98 Este, abarcando un total de  $152.253\text{km}^2$ .

El uso de suelo y vegetación de la zona de estudio es muy variado, sin embargo, son predominantes (considerando la superficie territorial que ocupan) la selva caducifolia y subcaducifolia con un total de  $37,972.25\text{ km}^2$ , las zonas de manejo agrícola cuya superficie es de  $61,458.25\text{ km}^2$  y los cuerpos de agua que ocupan  $2302.75\text{ km}^2$  del total de la zona. La tabla 2.1 muestra la superficie que ocupa cada uso de suelo y vegetación de la zona de estudio y la Figura 2.1 su distribución en la República Mexicana de acuerdo a la clasificación de CONABIO (CONABIO:, 1999).

Uso de Suelo y Vegetación de la Zona de Estudio 2009	
USV	Superficie <i>Km<sup>2</sup></i>
Área sin Vegetación Aparente	222.25
Bosque de coníferas distintas a Pinus	1800
Bosque de Encino	17,250
Bosque de Pino	20,216
Bosque Mesófilo de Montaña	418
Chaparral	11.25
Ciudades Importantes	738.75
Cuerpos de Agua	2302.75
Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	61,458.25
Manglar	17.25
Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical	4832
Matorral rosetófilo	185.75
Matorral sarcocrasicaule	1532.25
Mezquital - huizachal	48.25
Palmar	343.25
Pastizal natural	156
Popal y tular	180
Sabana	234.75
Selva baja caducifolia y subcaducifolia	37972.25
Selva baja perennifolia y subperennifolia	85.75
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	2154
Vegetación de galería	52.75
Vegetación halófila y gipsilófila	408.5

Tabla 2.1: USV en la zona de estudio. Fuente: CONABIO, 1999.

A continuación se describen las características de relieve y climatológicas generales de los cuatro principales estados que conforman la zona de estudio. La figura 2.2 muestra la distribución geográfica de los tipos de climas en la zona de estudio.

## Distrito Federal

El Distrito Federal se encuentra a una altura mínima de 2300 msnm (metros sobre el nivel medio del mar), con un clima predominantemente templado subhúmedo 87 % del territorio y el resto del territorio se divide en clima seco, semiseco y templado húmedo. La precipitación anual varía desde los 600 mm en zonas secas hasta los 1200 mm en las zonas templadas húmedas.

## Michoacán

Michoacán forma parte de las dos regiones fisiográficas Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, por lo que su topografía es muy variada, predominan en el territorio sierras, aunque también tiene llanuras y valles, sus elevaciones llegan hasta 3840 msnm (Volcán Tancítaro). Poco más del 50 % del estado tiene un clima cálido subhúmedo, aproximadamente el 15 % es seco y semiseco y al rededor del 30 % es templado subhúmedo, su precipitación media anual es de 850 mm.

## Estado de México

El Estado de México forma también parte de las dos regiones fisiográficas Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, su topografía varía entre los 400 msnm y los 5500 msnm (Volcán Popocatepetl). El clima predominante es el templado subhúmedo con un 73 %, el 21 % es cálido subhúmedo y sólo el 0.6 % es clima frío (el cual se ubica en las partes altas de los volcanes). La precipitación anual en éste estado es de 900 mm anuales.

## Morelos

La topografía del estado de Morelos varía desde los 800 msnm hasta los 5452 msnm (Volcán Popocatepetl). El 87 % de la superficie estatal tiene clima subhúmedo, el 11 % es templado húmedo y solo un 2 % es clima templado subhúmedo. La precipitación media anual es de 900mm.

La Figura 2.1 Muestra la distribución del USV en México de acuerdo a la clasificación hecha por CONABIO numerando los estados incluidos en la zona de estudio: 1) Distrito federal, 2) Estado de México, 3) Morelos, 4) Michoacán, 5) Guerrero, 6) Puebla, 7) Tlaxcala, 8) Hidalgo, 9) Querétaro, 10) Guanajuato, 11) Jalisco y 12) Colima. (CONABIO., 1999) y la Figura 2.2 muestra la clasificación de los climas en la zona de estudio de acuerdo con la clasificación hecha por CONABIO (CONABIO., 1998)

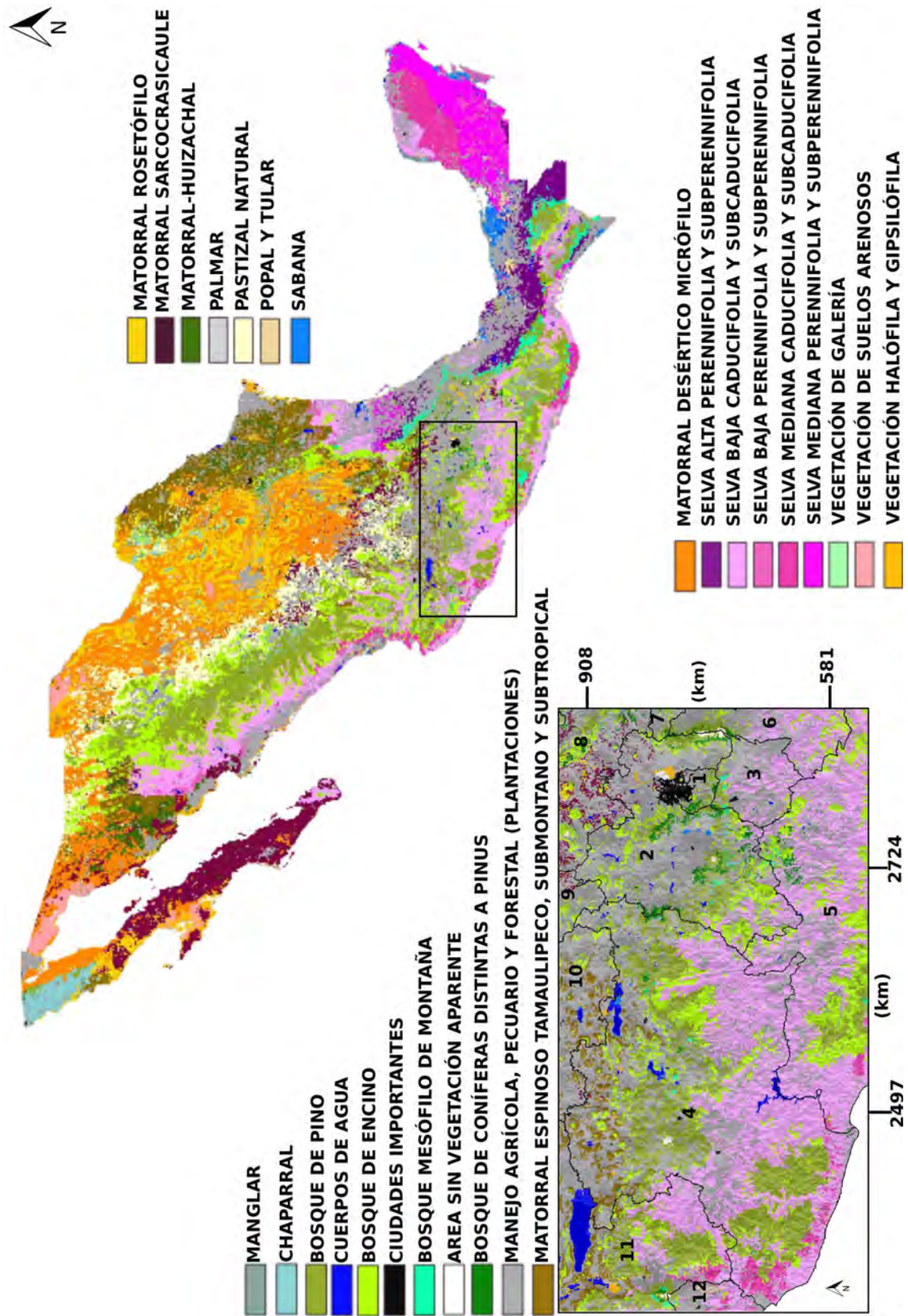


Figura 2.1: Zona de estudio. Datos: CONABIO, 1999

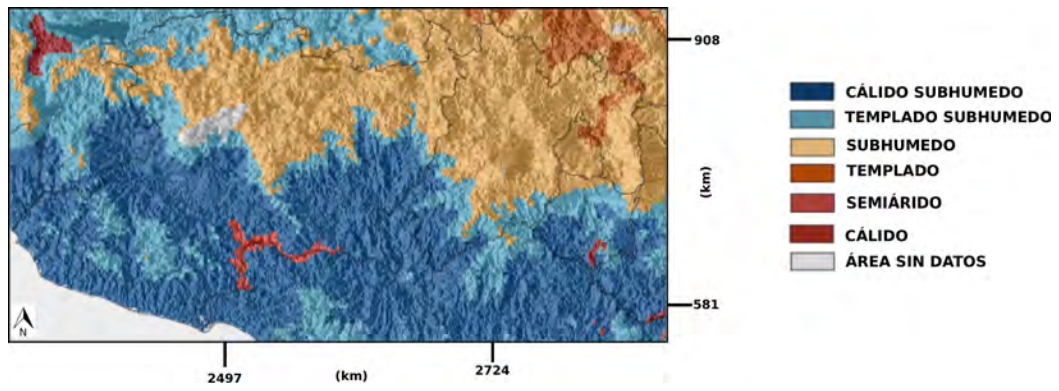


Figura 2.2: Tipos de climas. Fuente: CONABIO, 1998.



# Capítulo 3

## Metodología

Para éste análisis se aplicó el modelo Fire Potential Index (Índice Potencial de Incendio) que fue desarrollado para cartografiar zonas potenciales de ignición , incorporando imágenes satelitales, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e información obtenida de la superficie de las diferentes zonas de estudio. Éste modelo fue diseñado para realizar estudios tanto a escala local como a escala global con una resolución de  $1 \text{ km}^2$ . Actualmente es utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica para determinar el peligro de incendios a nivel nacional (Burgan et al., 1998).

El modelo requiere imágenes de Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), las cuales fueron obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del satélite modis-terra a través del Visor de Visualización Global (<http://glovis.usgs.gov/>, 2000-2001), las imágenes son obtenidas por cada 16 días y para éste estudio se utilizaron los años 2000-2001.

Para la aplicación del modelo se requiere tener información espacial de las temperatura máximas y mínimas diarias, con ésta información se generaron mapas de cada 16 días que los cuales concuerdan con las fechas de obtención de los mapas de NDVI. Los mapas de temperatura diarios fueron obtenidos mediante la interpolación de 2924 estaciones meteorológicas distribuidas en la zona como se muestra en la Figura 3.2, utilizando para ello el método de interpolación Kriging con Deriva Externa (también llamado Kriging Universal), utilizando como variable secundaria el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007), éste método es aplicado considerando la importante correlación que existe entre la temperatura y la elevación del terreno.

Es importante mencionar que el presente trabajo se realizó en la proyección Conforme Cónica de Lambert, y por ser un estudio más local fue posible elaborarlo con una resolución de  $500 \text{ m}^2$ , además de ser ésta la resolución que tienen las imágenes de Índice Normalizado de Vegetación obtenidas de MODIS.

### 3.1. El Modelo

El modelo Índice Potencial de Incendio (FPI, Fire Potential Index) fue desarrollado para cartografiar zonas potenciales de ignición incorporando imágenes satelitales, el uso de sistemas de información geográfica e información obtenida de la superficie de la zona. Fue diseñado para realizar estudios tanto a escala local como a escala global con una resolución de 1 *km*. El modelo supone que los incendios se pueden evaluar a partir de la proporción de vegetación viva, su humedad y verdor (Burgan et al., 1998). Actualmente es utilizado en los Estados Unidos de América para determinar el peligro de incendios a nivel nacional.

La ecuación del modelo es:

$$FPI = (1 - TN_f) * (1 - LR) * 100 \quad (3.1)$$

donde  $TN_f$  es la fracción de humedad del combustible y  $LR$  es la proporción de combustible vivo, ambos para cada pixel.

La Figura 3.1 muestra de manera ordenada la información que el modelo requiere. En gris se encuentran los datos de entrada, en azul la información generada a partir de los datos de entrada y finalmente en rojo el producto final que sería el Índice Potencial de Incendio.

Donde los parámetros  $t_{max}$ ,  $t_{min}$  y  $t_{med}$  se refiere a las temperaturas máximas, mínimas y medias para cada 16 días, NDVI es el Índice Normalizado de Vegetación, NDmx, NDmn y NDo son los Índices normalizados de vegetación máximo, mínimo e inicial histórico, el *EMC* Contenido de Humedad en Equilibrio para el combustible estimado para cada 16 días a partir de la Humedad Relativa  $HR$ , el Porcentaje de Combustible Muerto  $FM_{10}$ , la Humedad de Extinción de Combustible  $MX_d$ , Fracción de Humedad del Combustible  $TN_f$ , Verdor Relativo  $RG$ , Proporción Máxima de Combustible Vivo  $LR_{mx}$ , Proporción de Combustible Vivo  $LR$  y por último el Índice Potencial de Incendio  $FPI$ . Todos los parámetros son descritos en los siguientes apartados mostrando la forma en que se estiman y los resultados obtenidos.



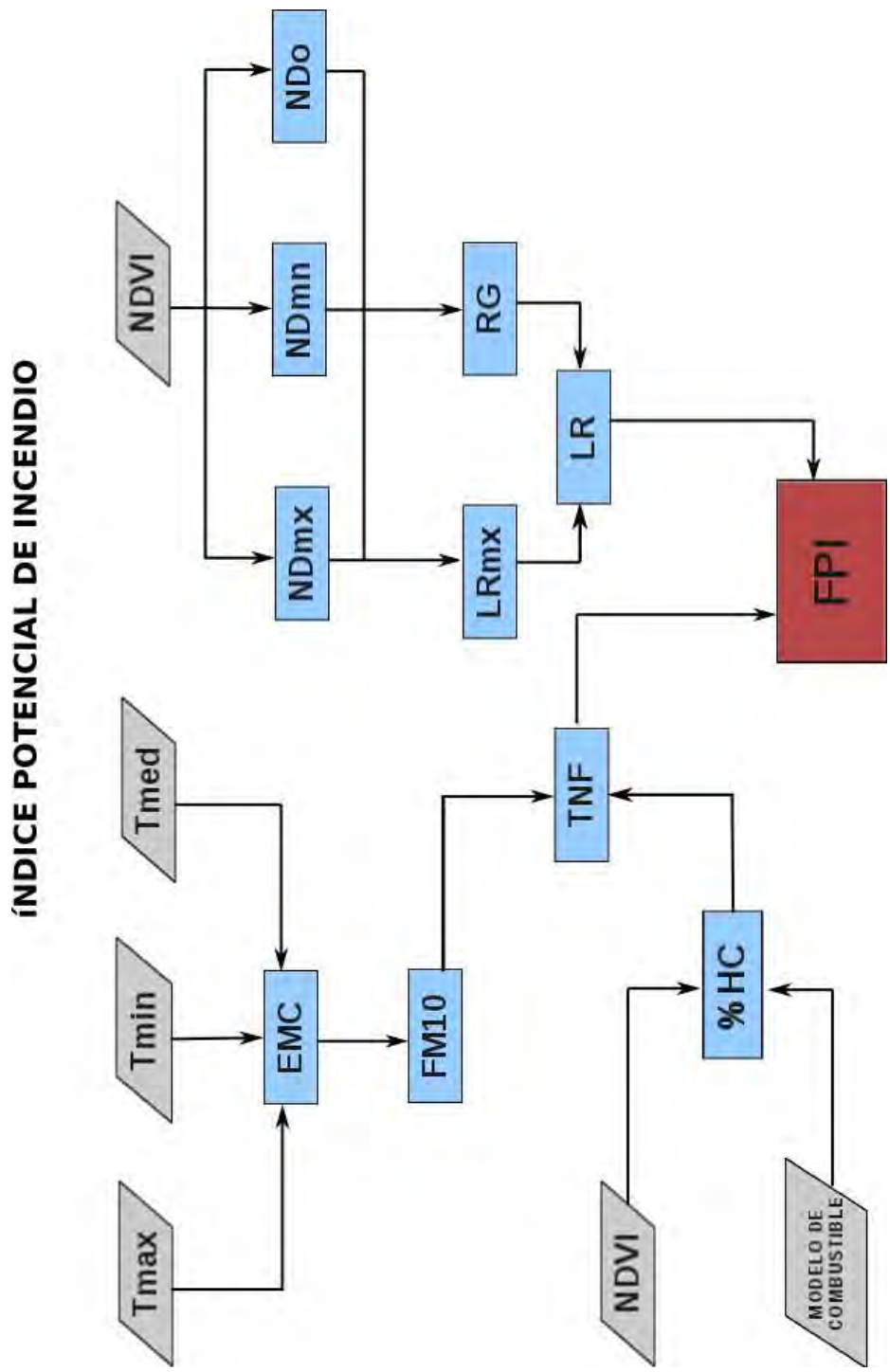


Figura 3.1: Diagrama para el cálculo del FPI

## 3.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) se define como el parámetro calculado a partir de valores de reflectancias a diferentes longitudes de onda, particularmente sensible a la cubierta vegetal. Al estar normalizado sus valores están comprendidos entre -1 y 1 (Gilbert et al., 1997). El índice se calcula con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3.2)$$

Donde NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano (Near infrared) y R la reflectividad en rojo, que para el caso de MODIS son las bandas 2 y 1 respectivamente (Gilbert et al., 1997).

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación en la superficie y caracterizar su distribución espacial, además de permitir realizar análisis temporales de la variación y estado de la misma.

Para éste análisis se obtuvieron las imágenes de NDVI producto de MODIS, generadas para cada 16 días de los años 2000 y 2001. Éstas se procesaron en Modis Reprojection Tool (MRT) para proyectar las imágenes al sistema geográfico Lambert Conformal Conic con los parámetros de datum WGS84.

La figura 3.2 muestra uno de los 40 mapas de NDVI obtenidos de MODIS para éste estudio.

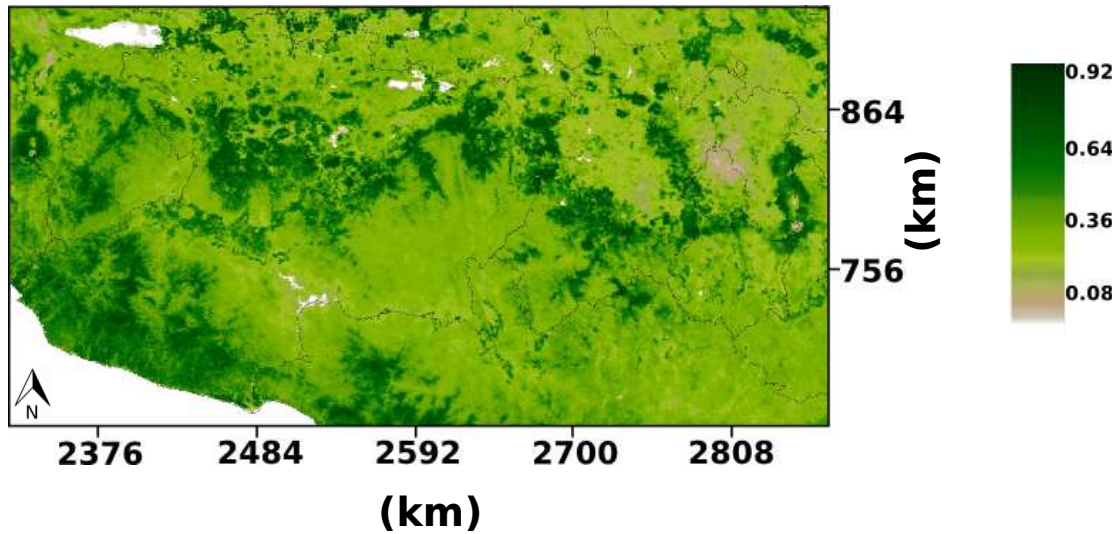


Figura 3.2: Mapa de Índice Normalizado de Vegetación. 18/02/2000-05/03/2000.

### 3.3. Combustible

El combustible forestal es definido como toda la materia orgánica que se encuentra depositada en el suelo forestal disponible para la combustión en un incendio forestal, incluye biomasa de plantas vivas como tallos, follaje y ramas, así como sus restos que pueden ser árboles de pie o caídos muertos, hojas y residuos leñosos (Chandler et al., 1983).

Para los ecosistemas el combustible es la biomasa producida en la fotosíntesis y juegan un papel importante en los flujos de energía, ciclos del carbono, nutrientes del suelo forestal y del agua (Morfin et al., 2012)

### 3.4. Temperatura

Se generaron mapas de temperatura máxima y mínima diaria para los años 2000-2001, los cuales fueron obtenidos con el método de interpolación Kriging con deriva externa (KDE) (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007). La información para realizar éstos mapas fue obtenida a partir de las 1094 estaciones meteorológicas que se localizan en la zona de estudio, la información se extrajo del Extractor Rapido de Información Climatológica ERIC III. El total de los mapas de temperaturas generados fue de 2924. Estos datos se utilizaron para generar mapas de temperaturas medias máximas, mínimas y totales para cada 16 días, coincidiendo con los días en los que se generaron los mapas de NDVI.

La figura 3.3 muestra la distribución espacial de las estaciones climatológicas en la zona de estudio y la figura 3.4 muestra uno de los mapas de temperatura media para cada 16 días generados a partir del método de interpolación Kriging en GRASS a partir de los datos de temperatura del ERIC III.

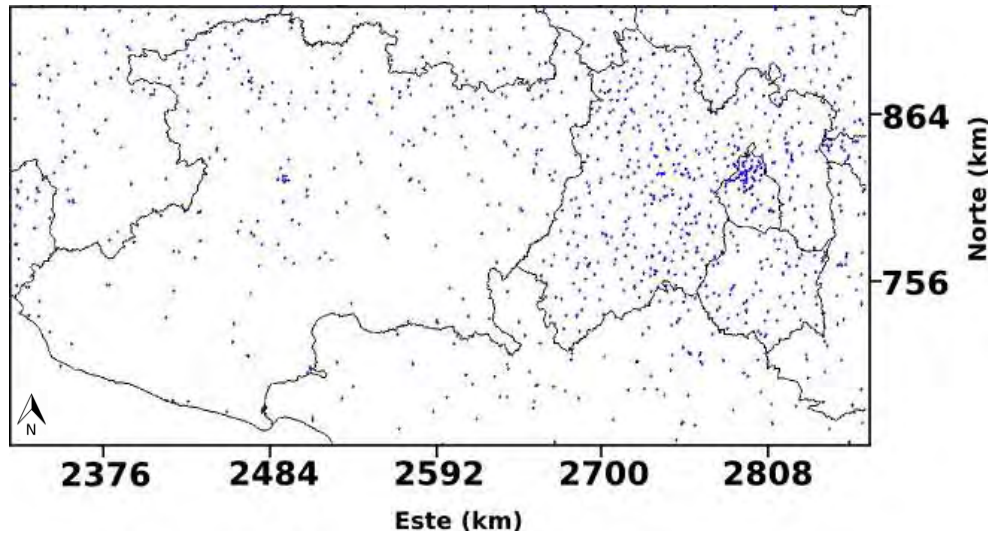


Figura 3.3: Distribución de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

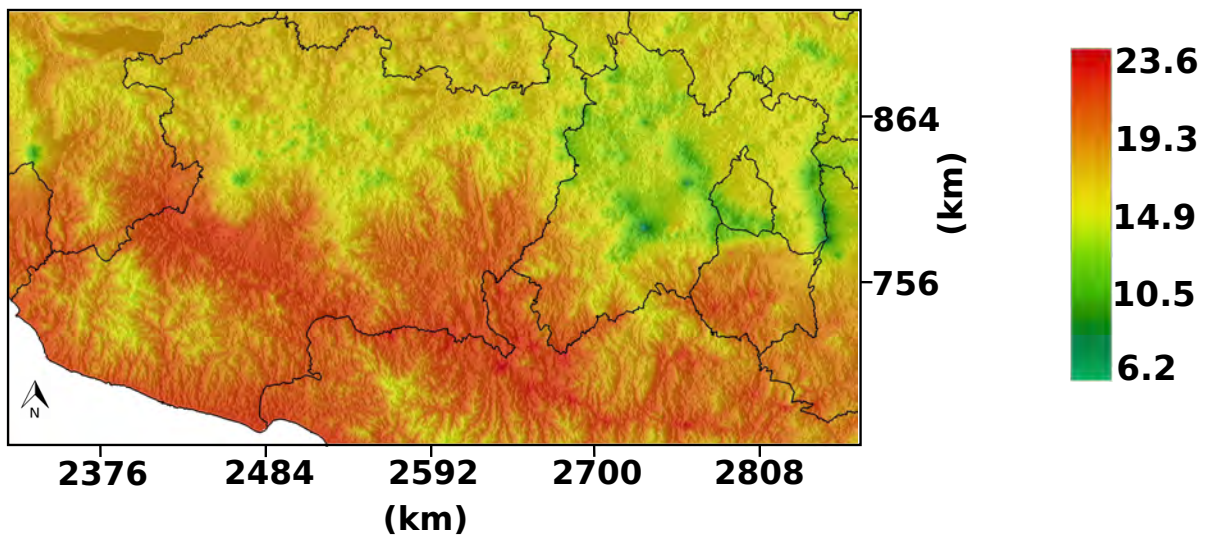


Figura 3.4: Temperatura media para 16 días. 18/02/2000-05/03/2000.

### 3.5. Humedad Relativa

La humedad relativa (HR) es definida como la cantidad de vapor de agua en un volumen específico de aire respecto a la cantidad máxima de humedad que podría contener ese mismo volumen de aire a una temperatura dada (CCA, 2003).

El aire es una mezcla de gases y estos contribuyen a la presión total en el ambiente; la presión asociada con algún gas es llamada presión parcial, por lo tanto como el vapor de agua es un gas, se considera también una presión parcial llamada presión del vapor, usualmente se denota por  $e$  y sus unidades son  $kPa$  (Stull, 1999). La presión del aire es difícil de medir con precisión, se han utilizado diversos métodos que han presentado errores de calibración o algunos producidos por el polvo, humedad, insectos, entre otros factores (Doorenbos y Pruitt, 1997).

De acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura) (Doorenbos y Pruitt, 1997) la HR se expresa como el cociente entre la presión real del vapor ( $e_a$ ) a una temperatura  $T$  dada en  $^{\circ}C$  y la presión de saturación de vapor ( $e^{\circ}(T)$ ) a la misma temperatura  $T$ :

$$HR = \frac{e_a}{e^{\circ}(T)} * 100 \quad (3.3)$$

No es posible medir directamente la presión real del vapor, sin embargo, existen aproximaciones para obtener la presión de vapor de diversas sustancias como la ecuación de Antoine (Reid et al., 1977):

$$\ln(p) = A - \frac{B}{C + T} \quad (3.4)$$

donde  $p$  = presión de vapor (mm Hg)  $T$  = Temperatura (K)  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes que para el caso del agua ( $H_2O$ ) sus valores son  $A = 18,3036$ ,  $B = 3816,44$ ,  $C = -46,13$ , para temperaturas entre  $284 - 241^{\circ}K$  (Reid et al., 1977).

La siguiente figura muestra uno de los mapas generados de HR a partir de la metodología descrita en éste apartado.



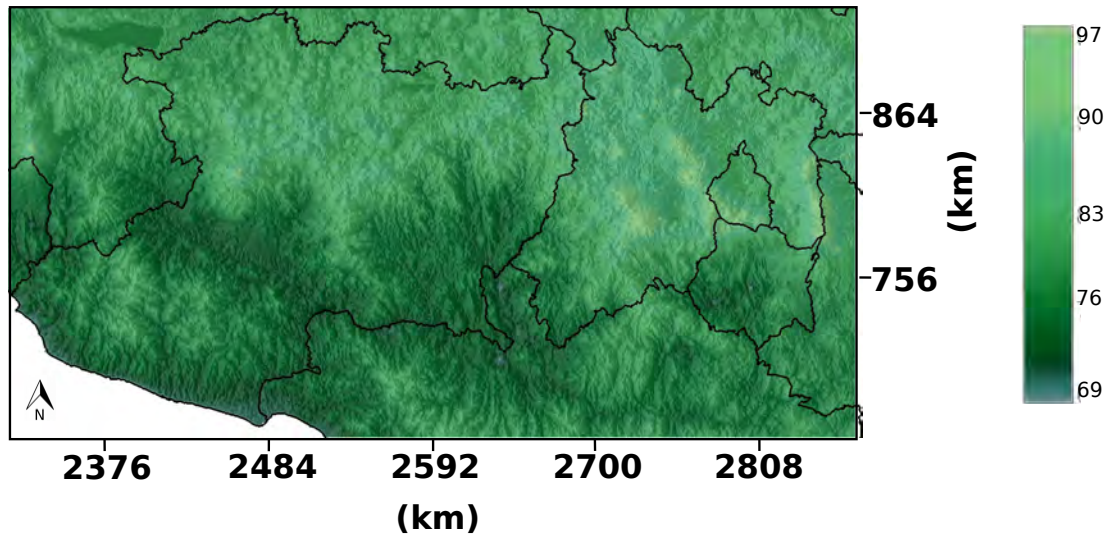


Figura 3.5: Mapa de Humedad relativa. 18/02/2000-05/03/2000.

### 3.6. Contenido de Humedad en Equilibrio

El Contenido de Equilibrio de Humedad (EMC, Equilibrium Moisture Content) es definido como el contenido de humedad que un objeto alcanza cuando es expuesto por determinado tiempo a temperatura y humedad relativa constante (Ospina, 2001), la variación del EMC está en función de la humedad relativa y la temperatura. Las ecuaciones para estimar el EMC son:

$$EMC = 0.03229 + 0.281073 * H - 0.000578 * H * T \quad \text{para } H \leq 10\%$$

$$EMC = 21.0606 + 0.00565 * H^2 - 0.00035 * H * T - 0.483199 * H \quad \text{para } H \geq 50\%$$

$$EMC = 2.27749 + 0.160107 * H - 0.014784 * T$$

$$\text{para } 10\% \leq H \leq 50\%$$

(3.5)

donde H es la humedad relativa en porcentaje y T la temperatura media en grados Fahrenheit.

La figura 3.6 muestra uno de los mapas resultantes a partir de las ecuaciones descritas anteriormente.

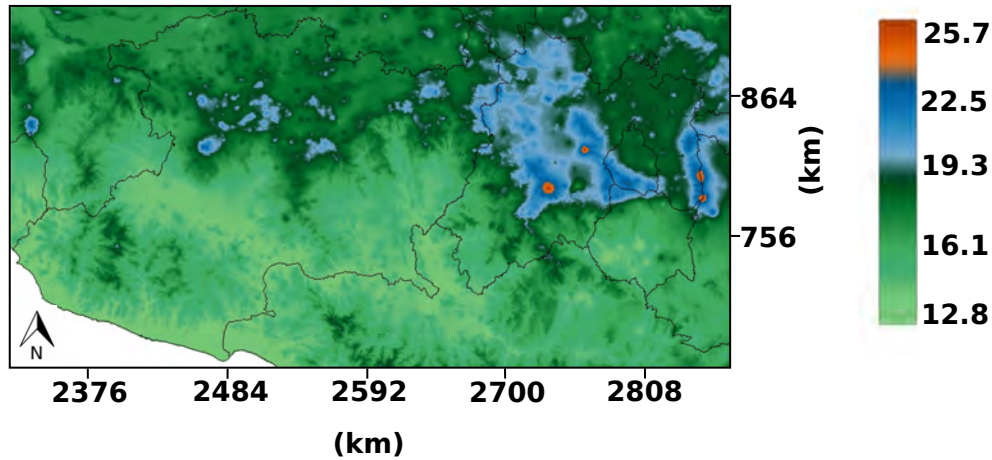


Figura 3.6: Mapa de Contenido de Humedad en equilibrio. 18/02/2000-05/03/2000.

### 3.7. Porcentaje de Combustible Muerto

Cuando el combustible cae en el suelo forestal éste dependiendo de sus condiciones naturales tiende a absorber humedad del medio ambiente o en su defecto a soltarla, el Porcentaje de Combustible Muerto para 10 horas ( $FM_{10}$ ) está basado en la estimación de cuánto tiempo le tomará al combustible muerto para estar en equilibrio de humedad con la atmósfera (Burgan et al., 1998). Éste se estima de la siguiente manera:

$$FM_{10} = 1.28 * EMC \quad (3.6)$$

donde EMC es el Contenido de Humedad en Equilibrio, el cual depende de la temperatura y la humedad relativa.

### 3.8. Humedad de Extinción de Combustible

Los combustibles vivos absorben agua del suelo para mantener sus células vivas y mantienen un elevado contenido de humedad, que es la cantidad de agua que se expresa en función del peso del combustible y su peso cuando está seco. Sin embargo, el combustible muerto tiene determinada su humedad por la humedad del medio ambiente (Villers, 2006). La Humedad de Extinción del Combustible ( $MX_d$ , Dead fuel moisture of extinction) varía desde 15 % y 30 %, y está clasificada como muestran la Tabla 3.1 y la Figura 3.6.

## Clasificación del Combustible y porcentaje de extinción de combustible muerto

Tipo de USV	MXd (%)
Bosque de Coníferas	30
Pinos	30
Vegetación Saludable	30
Vegetación Scleropyllous	30
Vegetación latifoliada	25
Áreas Agro-Forestales	25
Vegetación Perennifolia	25
Transición Pastizal-Arbustiva-Agricultura	25
Agricultura	15
Pastizal Natural	15

Tabla 3.1: Humedad de Extinción de Combustible. Fuente: land, 2000

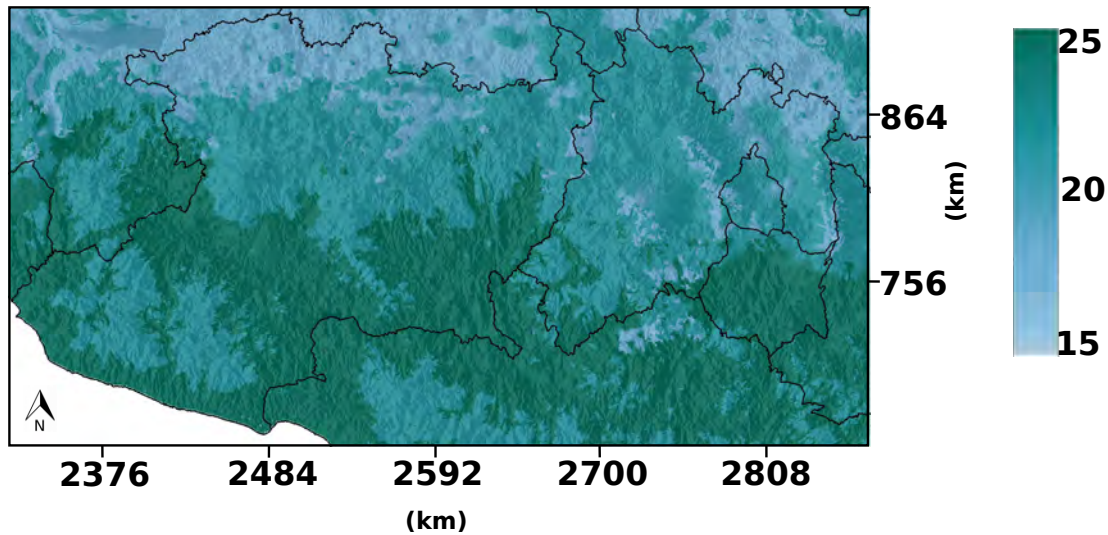


Figura 3.7: Porcentaje de Humedad de Combustible

La variabilidad en el caso particular del combustible en las selvas es debido a su altitud, pues a mayor altitud se presentan menores temperaturas y mayor humedad, al soltar las hojas al suelo forestal éstas suelen absorber la humedad del mismo, en cambio, a menor altitud las hojas presentan ceras que evitan la pérdida de agua por la radiación y las altas temperaturas, sin embargo al caer al suelo forestal el mismo mecanismo de defensa (las ceras) evitan que absorban la humedad del suelo (mecanismo hidrófilo).



### 3.9. Fracción de Humedad del Combustible

La Fracción de Humedad de Combustible  $TN_f$  para 10 horas se estima a partir del porcentaje de combustible muerto y la humedad de extinción de combustible. La formula para realizar ésta estimación es la siguiente:

$$TN_f = \frac{FM_{10} - 2}{MX_d - 2} \quad (3.7)$$

donde  $FM_{10}$  es el porcentaje de combustible muerto para 10 horas y  $MX_d$  es la humedad de extinción del combustible.

### 3.10. Verdor Relativo

El Verdor Relativo (RG, Relative Greenness) consiste en evaluar cada pixel de una imagen de NDVI para determinar las posibilidades que éste tiene de arder en una escala de 0-100 (Domínguez, 2008). La ecuación para estimarlo es:

$$RG = \frac{ND_0 - ND_{mn}}{ND_{mx} - ND_{mn}} * 100 \quad (3.8)$$

donde  $ND_0$ ,  $ND_{mx}$  y  $ND_{mn}$  son NDVI inicial, máximo y mínimo histórico para cada pixel. El modelo requiere el verdor relativo fraccionario, lo que significa tener el valor de verdor relativo de 0-1, por lo que se aplica la siguiente ecuación:

$$RG_f = \frac{RG}{100} \quad (3.9)$$

### 3.11. Proporción Máxima de Combustible Vivo

La Proporción Máxima de Combustible Vivo ( $LR_{mx}$ ) como su nombre indica estima cuánto es lo máximo de combustible vivo que existe por cada pixel partiendo del NDVI. Esto se estima con la siguiente ecuación:

$$LR_{mx} = 35 + 40 * \frac{ND_{mx} - 100}{80} \quad (3.10)$$

donde  $ND_{mx}$  es el NDVI máximo histórico para cada pixel.

### 3.12. Proporción de Combustible Vivo

La Proporción de Combustible Vivo ( $LR$ ) estima la cantidad total de combustible vivo por cada pixel. La ecuación para estimar éste parámetro es:

$$LR = \frac{RG_f * LR_{mx}}{100} \quad (3.11)$$

donde  $RG_f$  es el verdor relativo fraccionario para cada pixel y  $LR_{mx}$  es la proporción máxima de combustible vivo para cada pixel.

### 3.13. Puntos de Calor

Se llama punto de calor a cualquier punto en la superficie de la tierra que emita suficiente temperatura para registrarse por los satélites, esto no implica que necesariamente se trate de un incendio, sin embargo, la información es útil para identificar oportunamente la ocurrencia de uno de ellos (Cruz-López, 2007).

CONABIO considera como punto de calor el píxel de una imagen satelital que presente para la noche un valor mínimo de 25 °C y para el día 42°C, además ésta dependencia elimina mediante cartografía temática y evaluación estadística puntos de calor que tengan baja probabilidad de ser incendios forestales (CONABIO, 2012).

Ésta información se utilizó para comparar los resultados obtenidos mediante el modelo y determinar la validez de los resultados.

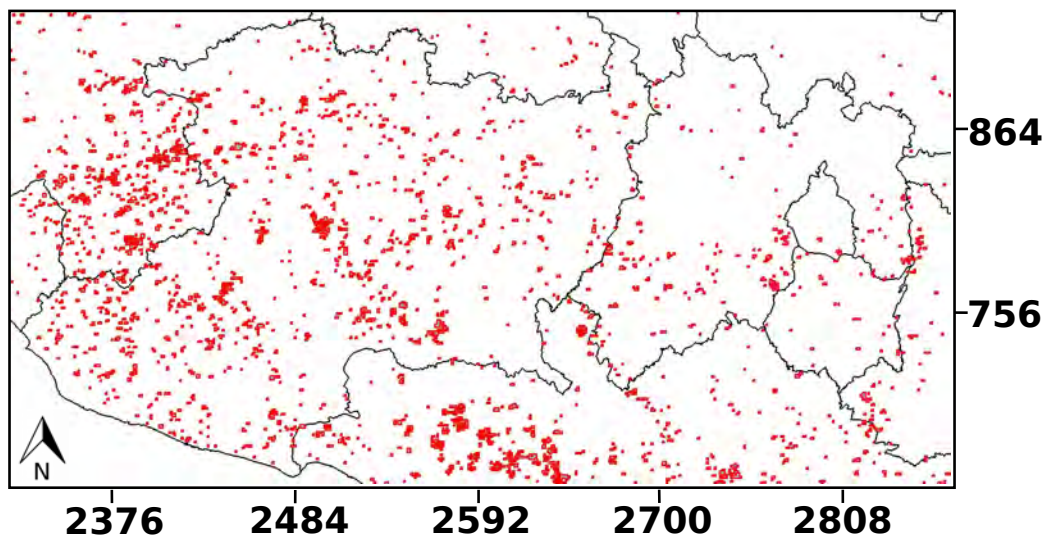


Figura 3.8: Puntos de Calor abril de 2000. Fuente:CONABIO, 2012.

## 3.14. Herramientas para Procesar la Información

### 3.14.1. Sistema de Información Geográfica GRASS

Para éste trabajo el SIG que se empleó es GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), software libre y de código abierto, el cual combina procesamiento de información vectorial, raster y procesos geoespaciales, además de incluir herramientas para el análisis espacial, la modelación y el procesamiento de imágenes con sofisticada visualización (Neteler y Mitasova, 2008).

### 3.14.2. Python

Python es un lenguaje de programación diseñado para leerse de manera sencilla, es especialmente popular por su aplicación para generar scripts, que son pequeños programas automáticos para realizar diversos procesos (Donaldson, 2009). La implementación de Python es de código abierto, de uso y distribución libre.

Éste lenguaje fue utilizado para automatizar los procesos por medio de scripts para generar los diferentes mapas dentro de GRASS que se utilizaron durante la aplicación del modelo y finalmente la obtención de la cartografía del FPI. Al final del presente documento se anexan algunos de los programas desarrollados para éste trabajo.

### 3.14.3. R-Statistics

R es un software y lenguaje de programación estadístico de código libre y flexible. R ofrece una variedad de técnicas estadísticas, gráficas, incluye modelos lineales y no lineales, análisis de series de tiempo, además de proporcionar gráficos de alta calidad (Verzani, 2005). En éste trabajo R fue utilizado para realizar las interpolaciones de temperatura mediante el Kriging con Deriva externa (KDE).

### 3.14.4. PostgreSQL

PostgreSQL es uno de los servidores de base de datos objeto-relacional, disponibles más avanzados, es un producto de código abierto (Douglas y Douglas, 2003). PostgreSQL tiene una extensión llamada postGIS la cual añade soporte a objetos geográficos y permite la conexión a aplicaciones con SIG como GRASS. PostgreSQL puede manejar volúmenes grandes de datos de manera eficiente, y además puede conectarse con un software estadístico como R para el análisis de los datos. Para éste trabajo se utilizó la interacción de la base de datos en PostgreSQL con R para el manejo de la información de temperaturas diarias para los años 2000-2001.

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

Durante la realización de éste trabajo fue posible obtener alrededor de 60 mapas de Índice Normalizado de Vegetación del satélite Terra-MODIS para los años 2000-2001, los cuales sirvieron para alimentar el modelo pues éste requiere información del verdor relativo de la vegetación y su humedad, el cual se estima a partir de dicho índice.

A partir de la información obtenida del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III, fue posible genera mapas diarios de temperatura máxima y mínima para los mismos dos años, los cuales sirvieron como base para generar mapas de temperaturas máximas y mínimas promedio para cada 16 días, de igual forma se obtuvieron mapas de temperaturas medias totales también para cada 16 días haciendo concordar las fechas con las de los mapas de NDVI previamente obtenidos.

Partiendo de las temperaturas fue posible estimar la Humedad Relativa para periodos iguales a los del NDVI, ésto utilizando la metodología propuesta por la FAO. La Humedad Relativa es un parámetro fundamental en el FPI, puesto que, la Humedad Relativa influye principalmente en el Contenido de Humedad en equilibrio del combustible (EMC), y dicha humedad es información primordial para obtener resultados correctos en la aplicación del modelo.

La figura 4.1 muestra el resultado obtenido de la aplicación del FPI, los resultados del modelo van de 0 a 100 (en porcentaje) donde 0 significa que no existe posibilidad de que se genere un incendio forestal y 100 implica que es totalmente absolutamente probable que exista un incendio forestal en la zona.

Es importante hacer énfasis en que éste proceso puede ser automatizado mediante la programación del proceso, y puede utilizarse para generar cartografía de riesgo para cada 16 días.

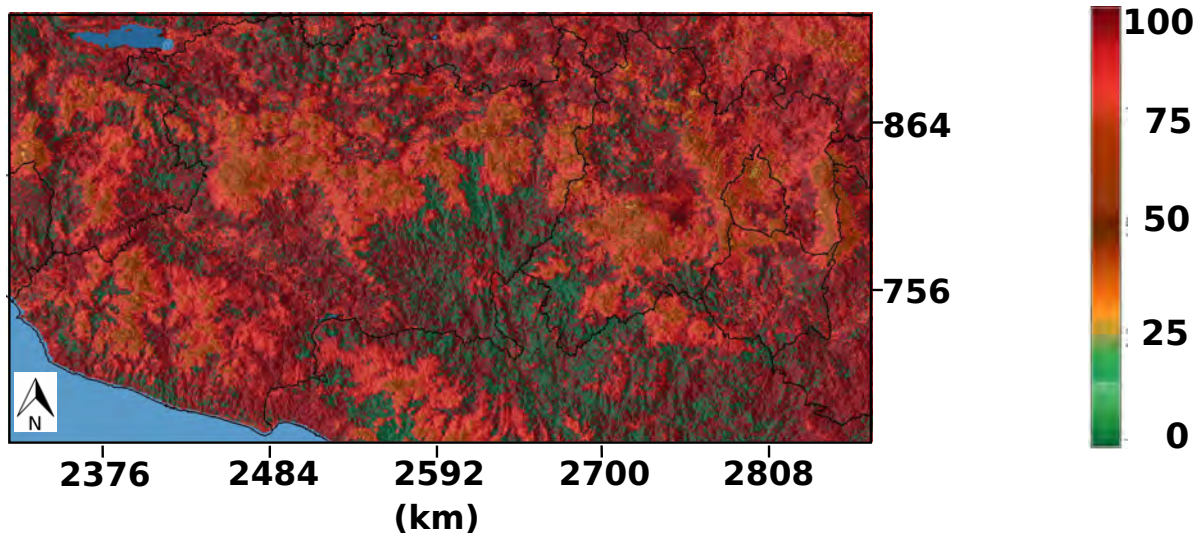


Figura 4.1: Índice Potencial de Incendio. 18/02/2000-05/03/2000.

Puesto que no existe cartografía previa de zonas susceptibles a incendios forestales, y contamos solamente con la información de puntos de calor proporcionada por CONABIO, utilizando dicha información se generaron los mapas correspondientes a los meses de marzo a mayo de 2000 y 2001, éstas fechas son utilizadas haciendo referencia a los meses que SEMARNAT reporta como los de mayor incidencia en fenómenos de éste tipo. Es importante mencionar que al adquirir la información de puntos de calor existe ausencia de datos para algunas fechas, por lo que la generación de los mapas se hizo con la información existente sin modificación alguna.

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran visualmente las coincidencias y las diferencias entre los puntos de calor y el FPI. En color azul se muestran las zonas de calor y en rojos las obtenidos mediante la aplicación del modelo FPI (para zonas con probabilidad mayor a 70 por ciento de ocurrencia). Es posible observar que en su mayoría los puntos de calor se encuentran dentro del FPI, lo que indica que fue posible reproducir la información reportada por CONABIO, pero además, el FPI tiene como finalidad reportar zonas de susceptibilidad a incendiarse, mas no necesariamente zonas que se hayan incendiado o vaya a ocurrir éste fenómeno.

Si bien es evidente que existe gran diferencia entre los mapas, sobre todo en la cantidad de pixeles que muestra el FPI que son mayores a los mostrados por los puntos de calor es necesario hacer referencia a que el FPI muestra zonas susceptibles no sólo por altas temperaturas sino también por la concentración de combustible con baja humedad.

Algo importante para resaltar es que los dos años que se utilizaron para realizar éste estudio SEMARNAT reporta que el Estado de México fue el estado con un mayor número de incendios con un número para el año 2000 mayor a 2000 incendios y para

2001 cercanas a los mil incendios, es decir, un número grande e importante de incendios, sin embargo, al observar los puntos de calor para el año 2000 en dicha zona es posible visualizar que no existe un gran número de puntos (en azul) reportados, sin embargo el FPI muestra una cantidad importante sobre todo en el mes de marzo de 2000 de área susceptible a incendiarse.



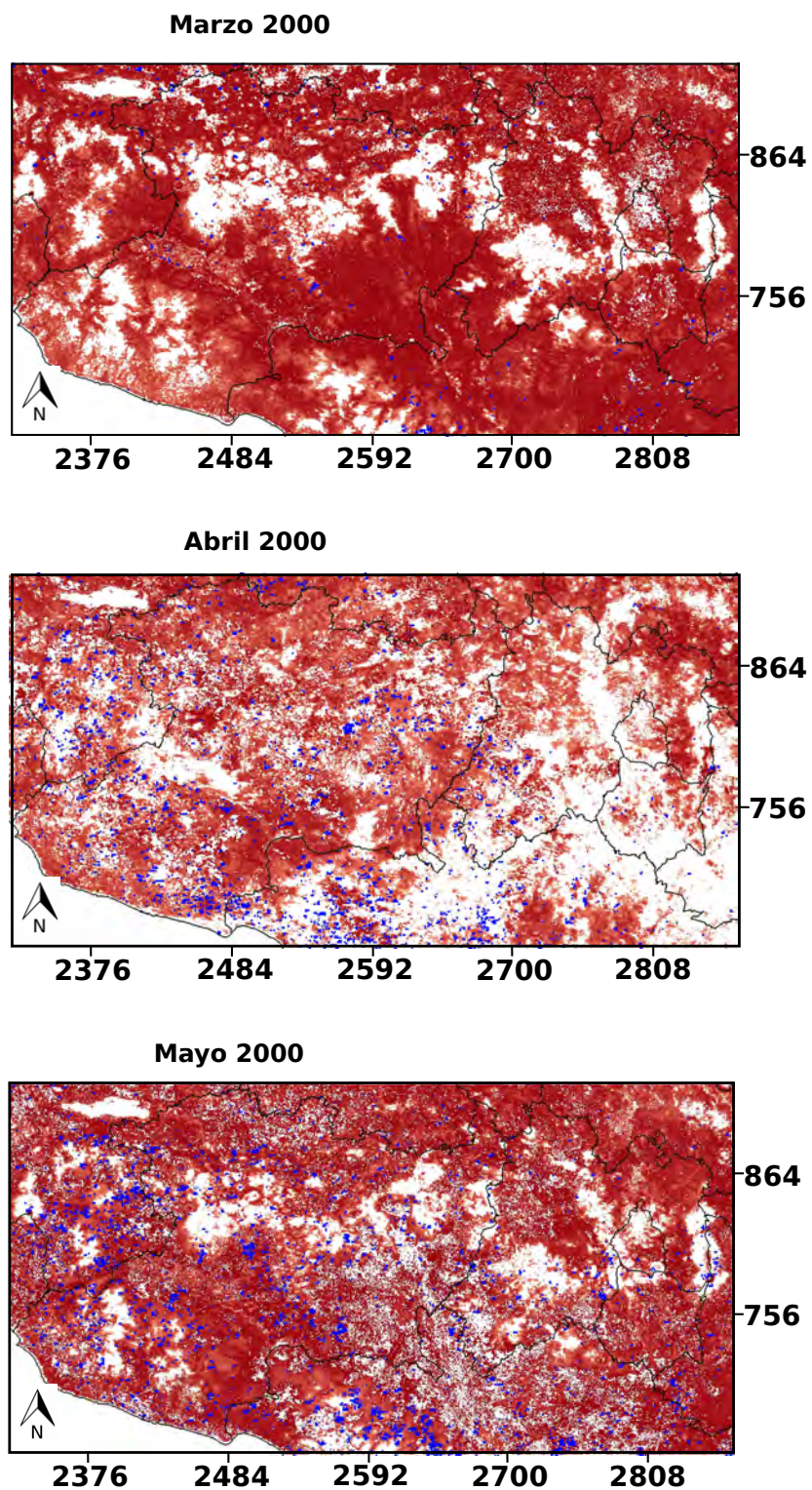


Figura 4.2: Puntos de Calor FPI de marzo a mayo de 2000.

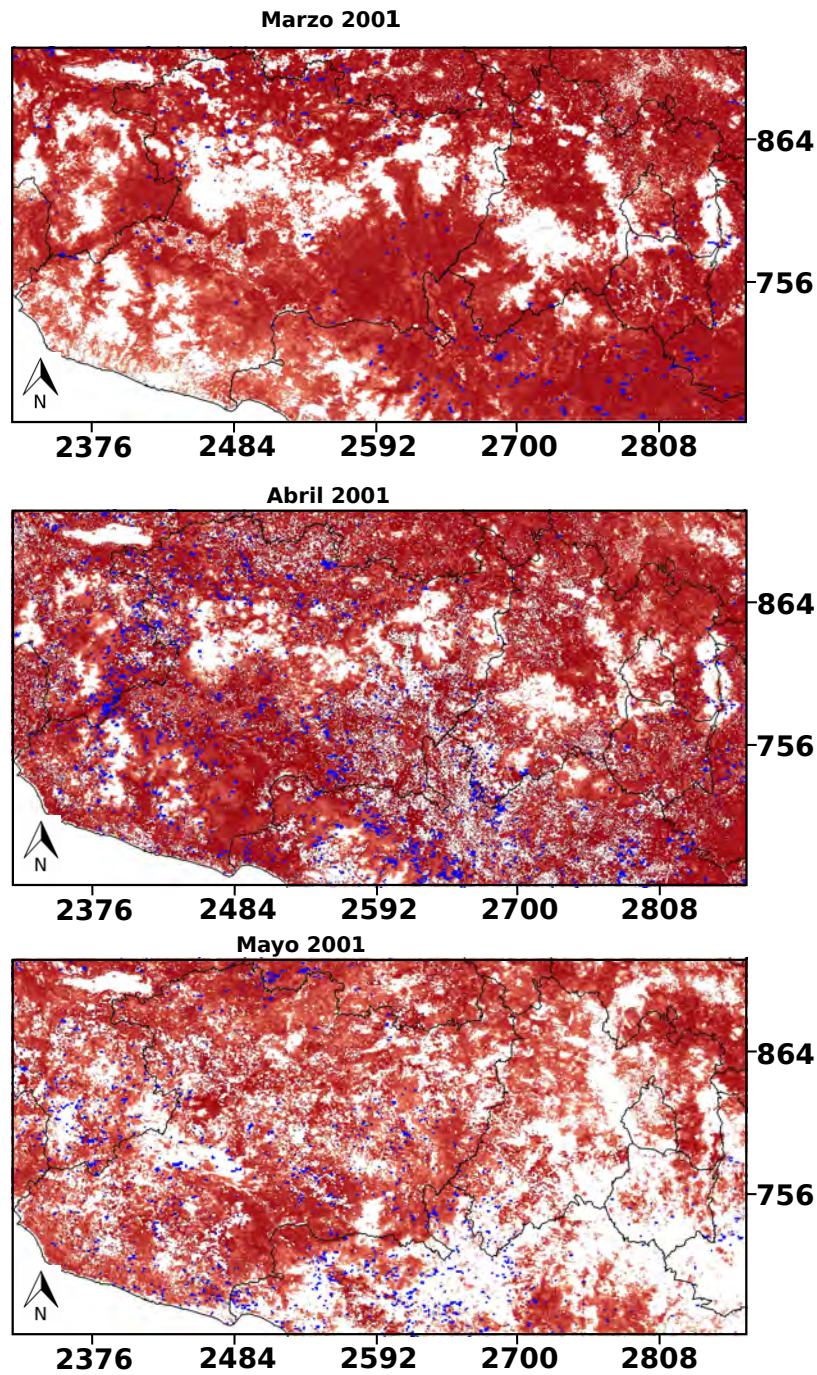


Figura 4.3: Puntos de Calor contra FPI de marzo a mayo de 2001



# Capítulo 5

## Conclusiones

Después de obtener la información necesaria para la aplicación del modelo Índice Potencial de Incendio, y obtener la cartografía correspondiente para cada una de las variables que alimentan su funcionamiento, es posible concluir que éste procedimiento puede ser útil como base para futuras aplicaciones tanto a escala local como nacional. El modelo incorpora información cualitativa y cuantitativa de factores que influyen en la generación de incendios forestales como son temperaturas, humedades de combustible y ambiente e incluye información respecto a las características del combustible, ésto aportado por el NDVI.

El modelo requiere de información principalmente de temperaturas mínimas y máximas diarias, es por ello que es de gran importancia contar con información mas precisa, confiable y que se encuentre con distribución espacial mas uniforme.

Cabe resaltar que todo el proceso se realizó en software libre por lo que la realización del trabajo no genera ningún costo y puede ser aplicado de la misma manera a escala nacional. La utilización de software de programación que permiten automatizar procesos de cálculo y agilizar los mismos es de considerable importancia para la realización de estudios que impliquen el manejo de cantidades importantes de información, es por ésto que GRASS, Python, PostgreSQL y R fueron herramientas de suma utilidad en éste trabajo.

Al ser ésta la primer cartografía de probabilidad de incendios forestales y debido a la carencia en información necesaria, tanto estadística como información que alimente al modelo, es posible que existan cierto déficit en los resultados, pero es importante resaltar que los resultados del modelo muestran coincidencia con los incendios forestales en las zonas que se encuentran reportadas en la literatura.

# Apéndice A

## Python script para renombrar mapas dentro de GRASS

El script fue elaborado para cambiar renombrar los mapas raster dentro de GRASS cambiando la fecha de gregoriana a días julianos.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import raster as grass
3 for year in range (2000,2003):
4     years='%i'%year
5     for month in range (1,13):
6         if (month)==1:
7             months='_0%i'%month
8             for jd in range (1,32):
9                 if(jd<10):
10                    jds='_0%i'%jd
11                    jd='%i'%jd
12                    ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%ds
13                    days='0%i'%jd
14                    mapsal='ndvi%i'%year+'%i'%days
15                    try:
16                        grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
17                    except:
18                        pass
19                else:
20                    jds='%i'%jd
21                    ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%ds
22                    days='0%i'%jd
23                    mapsal='ndvi%i'%year+'%i'%days
24                    try:
25                        grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
26                    except:
27                        pass
28            if (month)==2:
29                months='_0%i'%month
30                for jd in range (1,32):
31                    if(jd<10):
32                        jdi=jd+31
33                        jds='_0%i'%jd
34                        ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%ds
35                        days='0%i'%jdi
36                        mapsal='ndvi%i'%year+'%i'%days
37                    try:
38                        grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
39                    except:
```



```

108     try:
109         grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
110     except:
111         pass
112     else:
113         jdi=jd+121
114         jds='_ %a ' %jd
115         ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
116         days=' %a ' %jd i
117         mapsal=' ndvi %s ' %year+' %s ' %d days
118     try:
119         grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
120     except:
121         pass
122     if (month)==6:
123         months='_0 %s ' %month
124         for jd in range (0,32):
125             if (jd<10):
126                 jdi=152+jd
127                 jds='_0 %a ' %jd
128                 ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
129                 days=' %a ' %jd i
130                 mapsal=' ndvi %s ' %year+' %s ' %d days
131             try:
132                 grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
133             except:
134                 pass
135             else:
136                 jdi=jd+152
137                 jds='_ %a ' %jd
138                 ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
139                 days=' %a ' %jd i
140                 mapsal=' ndvi %s ' %year+' %s ' %d days
141             try:
142                 grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
143             except:
144                 pass
145         if (month)==7:
146             months='_0 %s ' %month
147             for jd in range (0,32):
148                 if (jd<10):
149                     jdi=182+jd
150                     jds='_0 %a ' %jd
151                     ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
152                     days=' %a ' %jd i
153                     mapsal=' ndvi %s ' %year+' %s ' %d days
154                 try:
155                     grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
156                 except:
157                     pass
158                 else:
159                     jdi=jd+182
160                     jds='_ %a ' %jd
161                     ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
162                     days=' %a ' %jd i
163                     mapsal=' ndvi %s ' %year+' %s ' %d days
164                 try:
165                     grass.run_command( 'g.rename' , rast=(ymd, mapsal))
166                 except:
167                     pass
168         if (month)==8:
169             months='_0 %s ' %month
170             for jd in range (0,32):
171                 if (jd<10):
172                     jdi=213+jd
173                     jds='_0 %a ' %jd
174                     ymd=' ndvi %s ' %year+' %s ' %months+' %s ' %jd ds
175                     days=' %a ' %jd i

```

```

176     mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
177     try:
178         grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
179     except:
180         pass
181     else:
182         jdi=jd+213
183         jds='_%a' %jd
184         ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds
185         days='%a' %jdi
186         mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
187     try:
188         grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
189     except:
190         pass
191     if (month)==9:
192         months='_0 %s' %month
193         for jd in range (0,32):
194             if (jd<10):
195                 jdi=244+jd
196                 jds='_0 %a' %jd
197                 ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds
198                 days='%a' %jdi
199                 mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
200             try:
201                 grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
202             except:
203                 pass
204             else:
205                 jdi=jd+244
206                 jds='_%a' %jd
207                 ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds
208                 days='%a' %jdi
209                 mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
210             try:
211                 grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
212             except:
213                 pass
214         if (month)==10:
215             months='_%s' %month
216             for jd in range (0,32):
217                 if (jd<10):
218                     jdi=274+jd
219                     jds='_0 %a' %jd
220                     ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds
221                     days='%a' %jdi
222                     mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
223                 try:
224                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
225                 except:
226                     pass
227                 else:
228                     jdi=jd+274
229                     jds='_%a' %jd
230                     ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds
231                     days='%a' %jdi
232                     mapsal='ndvi %s' %year+' %s' %days
233                 try:
234                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
235                 except:
236                     pass
237         if (month)==11:
238             months='_%s' %month
239             for jd in range (0,32):
240                 if (jd<10):
241                     jdi=305+jd
242                     jds='_0 %a' %jd
243                     ymd='ndvi %s' %year+' %s' %months+' %s' %jds

```

## APÉNDICE A. PYTHON SCRIPT PARA RENOMBRAR MAPAS DENTRO DE GRASS 41

```

244     days='%i' % jdi
245     mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
246     try:
247         grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
248     except:
249         pass
250     else:
251         jdi=jd+305
252         jds='_%i' % jdi
253         ymd='ndvi %s' % year+' %s' % months+' %s' % jds
254         days='%i' % jdi
255         mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
256         try:
257             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
258         except:
259             pass
260     if (month)==12:
261         months='_%s' % month
262         for jd in range (0,32):
263             if (jd<10):
264                 jdi=335+jd
265                 jds='_0%i' % jdi
266                 ymd='ndvi %s' % year+' %s' % months+' %s' % jds
267                 days='%i' % jdi
268                 mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
269                 try:
270                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
271                 except:
272                     pass
273             else:
274                 jdi=jd+335
275                 jds='_%i' % jdi
276                 ymd='ndvi %s' % year+' %s' % months+' %s' % jds
277                 days='%i' % jdi
278                 mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
279                 try:
280                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
281                 except:
282                     pass
283     else:
284         for month in range (1,13):
285             if (month)==3:
286                 months='_0%s' % month
287                 for jd in range (0,32):
288                     if (jd<10):
289                         jdi=59+jd
290                         jds='_0%i' % jdi
291                         ymd='ndvi %s' % year+' %s' % months+' %s' % jds
292                         days='0%i' % jdi
293                         mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
294                         try:
295                             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
296                         except:
297                             pass
298                     else:
299                         jdi=jd+59
300                         jds='_%i' % jdi
301                         ymd='ndvi %s' % year+' %s' % months+' %s' % jds
302                         days='0%i' % jdi
303                         mapsal='ndvi %s' % year+' %s' % days
304                         try:
305                             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
306                         except:
307                             pass
308             if (month)==4:
309                 months='_0%s' % month
310                 for jd in range (0,32):
311                     if (jd<10):

```

```

312     jdi=90+jd
313     jds='_0%' '%d
314     ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
315     days='0%i' '%d
316     mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
317     try:
318         grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
319     except:
320         pass
321     else:
322         jdi=jd+90
323         jds='_%' '%d
324         ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
325         days='%' '%d
326         mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
327         try:
328             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
329         except:
330             pass
331     if (month)==5:
332         months='_0%' '%month
333         for jd in range(0,32):
334             if (jd<10):
335                 jdi=120+jd
336                 jds='_0%' '%d
337                 ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
338                 days='%' '%d
339                 mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
340                 try:
341                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
342                 except:
343                     pass
344             else:
345                 jdi=jd+120
346                 jds='_%' '%d
347                 ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
348                 days='%' '%d
349                 mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
350                 try:
351                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
352                 except:
353                     pass
354     if (month)==6:
355         months='_0%' '%month
356         for jd in range(0,32):
357             if (jd<10):
358                 jdi=151+jd
359                 jds='_0%' '%d
360                 ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
361                 days='%' '%d
362                 mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
363                 try:
364                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
365                 except:
366                     pass
367             else:
368                 jdi=jd+151
369                 jds='_%' '%d
370                 ymd='ndvi%' '%year+' '%' '%months+' '%' '%d
371                 days='%' '%d
372                 mapsal='ndvi%' '%year+' '%' '%days
373                 try:
374                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
375                 except:
376                     pass
377     if (month)==7:
378         months='_0%' '%month
379         for jd in range(0,32):

```

```

380     if (jd<10):
381         jdi=181+jd
382         jds='_0%' + '%d'
383         ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
384         days='%' + '%d'
385         mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
386         try:
387             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
388         except:
389             pass
390     else:
391         jdi=jd+181
392         jds='_%' + '%d'
393         ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
394         days='%' + '%d'
395         mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
396         try:
397             grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
398         except:
399             pass
400     if (month)==8:
401         months='_0%' + '%month'
402         for jd in range (0,32):
403             if (jd<10):
404                 jdi=212+jd
405                 jds='_0%' + '%d'
406                 ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
407                 days='%' + '%d'
408                 mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
409                 try:
410                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
411                 except:
412                     pass
413             else:
414                 jdi=jd+212
415                 jds='_%' + '%d'
416                 ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
417                 days='%' + '%d'
418                 mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
419                 try:
420                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
421                 except:
422                     pass
423     if (month)==9:
424         months='_0%' + '%month'
425         for jd in range (0,32):
426             if (jd<10):
427                 jdi=243+jd
428                 jds='_0%' + '%d'
429                 ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
430                 days='%' + '%d'
431                 mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
432                 try:
433                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
434                 except:
435                     pass
436             else:
437                 jdi=jd+243
438                 jds='_%' + '%d'
439                 ymd='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%months+' + '%' + '%ds'
440                 days='%' + '%d'
441                 mapsal='ndvi%' + '%year+' + '%' + '%days'
442                 try:
443                     grass.run_command('g.rename', rast=(ymd, mapsal))
444                 except:
445                     pass
446     if (month)==10:
447         months='_%' + '%month'

```





# Apéndice B

## Python script para escalar NDVI

Script para dividir una serie de mapas entre 1000 y al mismo tiempo se multiplican por una mascara que sirve para delimitar la zona de estudio.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import raster as grass
3 for year in range (2000,2002):
4     years='%i'%year
5     for month in range (1,12):
6         if (month<10):
7             months='_0%i'%month
8             for jd in range (1,31):
9                 if(jd<10):
10                    jds='_0%i'%jd
11                    ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%jds
12                    mapas=ymd+'a'
13                    mascara='mask'
14                    try:
15                        grass.mapcalc("$mapas=_float($ymd)*mascara/10000", mapas=mapas, mascara=mascara, ymd=ymd)
16                    except:
17                        pass
18                else:
19                    jds='_%i'%jd
20                    ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%jds
21                    mapas=ymd+'a'
22                    mascara='mask'
23                    try:
24                        grass.mapcalc("$mapas=_float($ymd)*mascara/10000", mapas=mapas, mascara=mascara, ymd=ymd)
25                    except:
26                        pass
27
28 else:
29     months='_%i'%month
30     for jd in range (1,31):
31         if(jd<10):
32             jds='_0%i'%jd
33             ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%jds
34             mapas=ymd+'a'
35             mascara='mask'
36             try:
37                 grass.mapcalc("$mapas=_float($ymd)*mascara/10000", mapas=mapas, mascara=mascara, ymd=ymd)
38             except:
39                 pass
40         else:
41             jds='_%i'%jd
42             ymd='ndvi%i'%year+'%i'%months+'%i'%jds
43             mapas=ymd+'a'
```

```
44     mascara='mask'
45     try:
46         grass.mapcalc("$mapas=_float($ymd)*mascara/10000", mapas=mapas, mascara=mascara, ymd=ymd)
47     except :
48         pass
```

# Apéndice C

## Python script para hacer medias de 16 días

El script calcula la media para cada 16 días en series de tiempo.

```
1
2 from grass.script import *
3 for year in range(2000,2002):
4     maps=' '
5     for jd in range(1,366):
6         if (jd>0 and jd<17):
7             if (jd<10):
8                 sjd='00%i' %jd
9             if (jd>9):
10                sjd='0%i' %jd
11                newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
12            if (jd)<16:
13                newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
14            if (jd)==16:
15                newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd
16            maps=' %s' %maps+' %s' %newmap
17            if (jd)==16:
18                run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%i' %year+'001',method="average")
19
20 #01
21         maps=' '
22         if (jd>16 and jd<33):
23             if (jd>16):
24                 sjd='0%i' %jd
25                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
26             if (jd)<32:
27                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
28             if (jd)==32:
29                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd
30                 maps=' %s' %maps+' %s' %newmap
31                 if (jd)==32:
32                     run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%i' %year+'017',method="average") #02
33                     maps=' '
34         if (jd>32 and jd<49):
35             if (jd>32):
36                 sjd='0%i' %jd
37                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
38             if (jd)<48:
39                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd+', '
40             if (jd)==48:
41                 newmap='tmax %s' %year+' %s' %sjd
42                 maps=' %s' %maps+' %s' %newmap
```

```

41         if (jd)==48:
42             run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'033',method="average") #03
43             maps=''
44     if (jd>48 and jd<65):
45         if (jd>48):
46             sjd='0%i'%jd
47             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
48         if (jd)<64:
49             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
50         if (jd)==64:
51             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd
52     maps='%e'%maps+'%e'%newmap
53     if (jd)==64:
54         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'049',method="average") #04
55     maps=''
56     if (jd>64 and jd<81):
57         if (jd>64):
58             sjd='0%i'%jd
59             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
60         if (jd)<80:
61             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
62         if (jd)==80:
63             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd
64     maps='%e'%maps+'%e'%newmap
65     if (jd)==80:
66         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'065',method="average") #05
67     maps=''
68     if (jd>80 and jd<97):
69         if (jd>80):
70             sjd='0%i'%jd
71             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
72         if (jd)<96:
73             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
74         if (jd)==96:
75             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd
76     maps='%e'%maps+'%e'%newmap
77     if (jd)==96:
78         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'081',method="average") #06
79     maps=''
80     if (jd>96 and jd<113):
81         if (jd>96):
82             sjd='0%i'%jd
83             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
84         if (jd>99):
85             sjd='%a'%jd
86             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
87         if (jd)>112:
88             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
89         if (jd)==112:
90             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd
91     maps='%e'%maps+'%e'%newmap
92     if (jd)==112:
93         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'097',method="average") #07
94     maps=''
95     if (jd>112 and jd<129):
96         if (jd)>112:
97             sjd='%a'%jd
98             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',
99         if (jd)==128:
100             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd
101     maps='%e'%maps+'%e'%newmap
102     if (jd)==128:
103         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'113',method="average") #08
104     maps=''
105     if (jd>128 and jd<145):
106         if (jd)>128:
107             sjd='%a'%jd
108             newmap='tmax%e'%year+'%e'%sjd+',',

```

```

109         if (jd)==144:
110             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
111         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
112         if (jd)==144:
113             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'129 ',method=" average") #09
114             maps=' '
115     if (jd>144 and jd<161):
116         if (jd)>144:
117             sjd=' %a '%jd
118             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
119         if (jd)==160:
120             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
121         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
122         if (jd)==160:
123             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'145 ',method=" average") #10
124             maps=' '
125     if (jd>160 and jd<177):
126         if (jd)>160:
127             sjd=' %a '%jd
128             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
129         if (jd)==176:
130             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
131         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
132         if (jd)==176:
133             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'161 ',method=" average") #11
134             maps=' '
135     if (jd>176 and jd<193):
136         if (jd)>176:
137             sjd=' %a '%jd
138             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
139         if (jd)==192:
140             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
141         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
142         if (jd)==192:
143             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'177 ',method=" average") #12
144             maps=' '
145     if (jd>192 and jd<209):
146         if (jd)>192:
147             sjd=' %a '%jd
148             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
149         if (jd)==208:
150             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
151         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
152         if (jd)==208:
153             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'193 ',method=" average") #13
154             maps=' '
155     if (jd>208 and jd<225):
156         if (jd)>208:
157             sjd=' %a '%jd
158             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
159         if (jd)==224:
160             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
161         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
162         if (jd)==224:
163             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'209 ',method=" average") #14
164             maps=' '
165     if (jd>224 and jd<241):
166         if (jd)>224:
167             sjd=' %a '%jd
168             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd+', '
169         if (jd)==240:
170             newmap='tmax %s '%year+' %s '%sjd
171         maps=' %s '%maps+' %s '%newmap
172         if (jd)==240:
173             run_command('r.series ',input=maps,output='tmedtmax %a '%year+'225 ',method=" average") #15
174             maps=' '
175     if (jd>240 and jd<257):
176         if (jd)>240:

```

```

177         sjd='%a' % %jd
178         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
179     if (jd)==256:
180         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
181     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
182     if (jd)==256:
183         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'241',method="average") #16
184         maps=' '
185 if (jd>256 and jd<273):
186     if (jd)>256:
187         sjd='%a' % %jd
188         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
189     if (jd)==272:
190         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
191     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
192     if (jd)==272:
193         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'257',method="average") #17
194         maps=' '
195 if (jd>272 and jd<289):
196     if (jd)>272:
197         sjd='%a' % %jd
198         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
199     if (jd)==288:
200         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
201     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
202     if (jd)==288:
203         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'273',method="average") #18
204         maps=' '
205 if (jd>288 and jd<305):
206     if (jd)>288:
207         sjd='%a' % %jd
208         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
209     if (jd)==304:
210         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
211     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
212     if (jd)==304:
213         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'289',method="average") #19
214         maps=' '
215 if (jd>304 and jd<321):
216     if (jd)>304:
217         sjd='%a' % %jd
218         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
219     if (jd)==320:
220         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
221     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
222     if (jd)==320:
223         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'305',method="average") #20
224         maps=' '
225 if (jd>320 and jd<337):
226     if (jd)>320:
227         sjd='%a' % %jd
228         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
229     if (jd)==336:
230         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
231     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
232     if (jd)==336:
233         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'321',method="average") #21
234         maps=' '
235 if (jd>336 and jd<353):
236     if (jd)>336:
237         sjd='%a' % %jd
238         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd+', '
239     if (jd)==352:
240         newmap='tmax %s' % %year+' %s' % %jd
241     maps='%s' % %maps+' %s' % %newmap
242     if (jd)==352:
243         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax %a' % %year+'337',method="average") #22
244         maps=' '

```

```
245     if (jd>352 and jd<369):
246         if (jd)>352:
247             sjd='%a'%jd
248             newmap='tmax%s'%year+'%s'%sjd+', '
249         if (jd)==368:
250             newmap='tmax%s'%year+'%s'%sjd
251     maps='%s'%maps+'%s'%newmap
252     if (jd)==368:
253         run_command('r.series',input=maps,output='tmedtmax%a'%year+'353',method="average") #23
```



# Apéndice D

## Python script exportar mapas TIF

El script sirve para exportar mapas de tipo raster en formati .tif a una carpeta.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import raster as grass
3 for year in range (2000,2003):
4     years='%i'%year
5     for month in range (1,13):
6         if (month<10):
7             months='_0%s'%month
8             for jd in range (1,32):
9                 if(jd<10):
10                    jds='_0%i'%jd
11                    ymds='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds+'b'
12                    ymd='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds
13                    try:
14                        grass.read_command('r.out.gdal', input=ymds, output=ymd+'.tif')
15                    except :
16                        pass
17                if (jd>9):
18                    jds='_%s'%jd
19                    ymds='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds+'b'
20                    ymd='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds
21                    try:
22                        grass.read_command('r.out.gdal', input=ymds, output=ymd+'.tif')
23                    except :
24                        pass
25 for year in range (2000,2003):
26     years='%i'%year
27     for month in range (1,13):
28         if (month>9):
29             months='_%s'%month
30             for jd in range (1,32):
31                 if(jd<10):
32                    jds='_0%i'%jd
33                    ymds='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds+'b'
34                    ymd='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds
35                    try:
36                        grass.read_command('r.out.gdal', input=ymds, output=ymd+'.tif')
37                    except :
38                        pass
39                if (jd>9):
40                    jds='_%s'%jd
41                    ymds='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds+'b'
42                    ymd='ndvi%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds
43                    try:
44                        grass.read_command('r.out.gdal', input=ymds, output=ymd+'.tif')
```

```
45     except :  
46         pass
```

# Apéndice E

## Python script para reproyectar mapas

Se elaboró el script para reproyectar mapas raster de una locación a otra dentro de GRASS.

```
1 from grass.script import*
2 loc='newatlas'
3 meth='nearest'
4 for year in range (2000,2003):
5     for month in range (1,13):
6         for day in range (1,32):
7             if (month<10):
8                 if (day<10):
9                     months='%i'%year+'_0%i'%month+'_0%i'%day
10                    map='ndvi%s'%months+'b'
11                if (day>9):
12                    months='%i'%year+'_0%i'%month+'_%i'%day
13                    map='ndvi%s'%months+'b'
14            if (month>9):
15                if (day<10):
16                    months='%i'%year+'_%i'%month+'_0%i'%day
17                    map='ndvi%s'%months+'b'
18                if (day>9):
19                    months='%i'%year+'_%i'%month+'_%i'%day
20                    map='ndvi%s'%months+'b'
21                    maps='ndvi%s'%months
22            run_command('r.proj',input=map,location=loc,method=meth)
```

# Apéndice F

## Python script para importar mapas a GRASS

El script importa mapas raster en formato .tif a GRASS.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import raster as grass
3 for year in range (2000,2003):
4     years='%i'%year
5     for month in range (1,13):
6         if (month<10):
7             months1='0%s'%month
8             months='_0%s'%month
9             for jd in range (1,32):
10                if(jd<10):
11                    jds='0%i'%jd
12                    jds1='_0%i'%jd
13                    ymd='tmax%s'%year+'%s'%months1+'%s'%jds
14                    ymds=''+ymd+'.tif'
15                    ymdl='tmax%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds1
16                    try:
17                        grass.read_command('r.in.gdal', flags="o", input=ymds, output=ymdl, overwrite = True)
18                    except :
19                        pass
20                if (jd>9):
21                    jds='%i'%jd
22                    jds1='_%i'%jd
23                    ymd='tmax%s'%year+'%s'%months1+'%s'%jds
24                    ymds=''+ymd+'.tif'
25                    ymdl='tmax%s'%year+'%s'%months+'%s'%jds1
26                    try:
27                        grass.read_command('r.in.gdal', flags="o", input=ymds, output=ymdl, overwrite = True)
28                    except :
29                        pass
30 for year in range (2000,2003):
31     years='%i'%year
32     for month in range (1,13):
33         if (month>9):
34             months1='%i'%month
35             months='_%i'%month
36         for jd in range (1,32):
37             if(jd<10):
38                 jds='0%i'%jd
39                 jds1='_0%i'%jd
40                 ymd='tmax%s'%year+'%s'%months1+'%s'%jds
41                 ymds=''+ymd+'.tif'
```

```
42     ymdl='tmax%$ '%year+'%$ '%months+'%$ '%$ds1
43     try:
44         grass.read_command('r.in.gdal', flags="o", input=ynds, output=ymdl, overwrite = True,)
45     except :
46         pass
47     if (jd > 9):
48         jds='%$ '%$d
49         jds1='_ '$ '%$d
50         ymd='tmax%$ '%year+'%$ '%months1+'%$ '%$ds
51         ynds=''+ymd+'.tif'
52         ymdl='tmax%$ '%year+'%$ '%months+'%$ '%$ds1
53     try:
54         grass.read_command('r.in.gdal', flags="o", input=ynds, output=ymdl, overwrite = True)
55     except :
56         pass
```

# Apéndice G

## Python script para importar vectores .shp a GRASS

Importa mapas tipo vector de un archivo .shp dentro de una locación en GRASS.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import core as grass
3 for month in range (1,13):
4     if (month<10):
5         months='0%i' % month
6         for jd in range (1,32):
7             if (jd<10):
8                 jds='0%i' % jd
9                 noct='%' % months+'%' % jds+'noc'
10                nocts='noc%' % months+'%' % jds+'2001'
11                inputs=noct+'.shp'
12                try:
13                    grass.run_command("v.in.ogr", flags='oe', dsn=inputs, output=nocts, min_area=0.00001, snap=
14                except :
15                    pass
16            if (jd>9):
17                jds='%' % jd
18                noct='%' % months+'%' % jds+'noc'
19                nocts='noc%' % months+'%' % jds+'2001'
20                inputs=noct+'.shp'
21                try:
22                    grass.run_command("v.in.ogr", flags='oe', dsn=inputs, output=nocts, min_area=0.00001, snap=
23                except :
24                    pass
25        if (month>9):
26            months='%' % month
27            for jd in range (1,32):
28                if (jd<10):
29                    jds='0%i' % jd
30                    noct='%' % months+'%' % jds+'noc'
31                    nocts='noc%' % months+'%' % jds+'2001'
32                    inputs=noct+'.shp'
33                    try:
34                        grass.run_command("v.in.ogr", flags='oe', dsn=inputs, output=nocts, min_area=0.00001, snap=
35                    except :
36                        pass
37                if (jd>9):
38                    jds='%' % jd
39                    noct='%' % months+'%' % jds+'noc'
40                    nocts='noc%' % months+'%' % jds+'2001'
41                    inputs=noct+'.shp'
```

## APÉNDICE G. PYTHON SCRIPT PARA IMPORTAR VECTORES .SHP A GRASS 58

```
42         try :
43             grass.run_command("v.in.ogr", flags='oe', dsn=inputs, output=nocts, min_area=0.00001, snap=
44         except :
45             pass
```

# Apéndice H

## Python script cálculos del FPI

Se elaboró el script para automatizar los cálculos del Índice Potencial de Incendio.

```
1 import grass.script as grass
2 from grass.script import raster as grass
3 for year in range (2000,2002):
4     years='%a'%year
5     maps=''
6     for jd in range (1,366):
7         if (jd<10):
8             sdj='00%i'%jd
9         if (jd>9 and jd<100):
10            sdj='0%i'%jd
11        if (jd>99):
12            sdj='%a'%jd
13        tmax='tmedtmax% %years+% %sdj'
14        tmin='tmedtmin% %years+% %sdj'
15        tmed='tmedtot% %years+% %sdj'
16        etmax='etmax% %years+% %sdj'
17        etmin='etmin% %years+% %sdj'
18        pv='pv% %years+% %sdj'
19        pv1='pv1% %years+% %sdj'
20        es='es% %years+% %sdj'
21        rh='rh% %years+% %sdj'
22        emc='emc% %years+% %sdj'
23        fm='fm10% %years+% %sdj'
24        tnf='tnf% %years+% %sdj'
25        FPI='FPI% %years+% %sdj'
26        tmedf='tmedf% %years+% %sdj'
27        ndvi='ndvi% %years+% %sdj'
28        rg='rg% %years+% %sdj'
29        mod='model2'
30        ndmx='ndmx'
31        ndmn='ndmn'
32        ndo='ndo'
33        lrmx='lrmx% %years+% %sdj'
34        rgf='rgf'
35        lr='lr'
36        try:
37            grass.mapcalc (" $lrmx=(0.25+0.50*( $ndvi/$ndmx))*100", lrmx=lrmx, ndmx=ndmx, ndvi=ndvi)
38
39            grass.mapcalc (" $tmed=(( $tmax+$tmin)/2)", tmed=tmed, tmax=tmax, tmin=tmin)
40
41            grass.mapcalc (" $etmax=float ((0.6108* exp (17.28*( $tmax-273.15)/(( $tmax-273.15)+237.3))))", etmax=
42
43            grass.mapcalc (" $etmin=float ((0.6108* exp (17.28*( $tmin-273.15)/(( $tmin-273.15)+237.3))))", etmin=
44
```



```

45     grass.mapcalc (" $es=float (( $etmax+$etmin)/2)", es=es , etmax=etmax , etmin=etmin )
46
47     grass.mapcalc (" $pv1=_exp(18.3036 - ((3816.44)/((-46.13)+$tmed)))", pv1=pv1 , tmed=tmed)
48
49     grass.mapcalc (" $pv=$pv1*0.133322368", pv=pv , pv1=pv1)
50
51     grass.mapcalc (" $rh=_float (( $pv/$es))*100", rh=rh , es=es , pv=pv)
52
53     grass.mapcalc (" $tmedf=((( $tmed*9)/5) - 459.67)", tmedf=tmedf , tmed=tmed)
54
55     grass.mapcalc (" $emc=if ($rh <=10,0.03229+0.281073*$rh - 0.000578*$rh*$tmedf , _if_($rh >50,_21.0606+
56
57     grass.mapcalc (" $fm=(1.28*$emc)/100", fm=fm , emc=emc)
58
59     grass.mapcalc (" $tnf=(( $fm) - 2)/(( $mod) - 2)/100", tnf=tnf , fm=fm , mod=mod)
60
61     grass.mapcalc (" $rgf=(( $ndo-$ndmn)/($ndmx-$ndmn))*100", rgf=rgf , ndo=ndo , ndmx=ndmx , ndmn=ndmn)
62
63     grass.mapcalc (" $rg=(( $ndvi-$ndmn)/($ndmx-$ndmn))*100", ndvi=ndvi , rg=rg , ndmx=ndmx , ndmn=ndmn)
64
65     grass.mapcalc (" $FPI=float ((1-$tnf)*(1-($rg*$lrnx/(10000)))*100)", FPI=FPI , tnf=tnf , rg=rg , lr
66     grass.mapcalc (" $FPI=if ($FPI >100,0,$FPI)", FPI=FPI)
67     grass.mapcalc (" $FPI=if ( isnull ($FPI), -6000,$FPI)", FPI=FPI)
68 except :
69     pass

```

# Bibliografía

ANDREAE, M.O.: *Biomass Burning. Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. Massachusetts Institute of Technology, 1991. [1.2](#), [1.4](#)

ANDREAE, M.O. y WILGEN, B.W. VAN: *Fire in Southern African Savannas: Ecological and Atmospheric*. capítulo Emissions of trace gases and aerosols from Southern African savanna fires, pp. 161–183. Wits University Press, 1997. [1.2](#)

BAUTISTA, FLOR SILVESTRE: *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 IPICYT, 2009. [1.5](#)

BENNDORF, A.M.; DIMITRAKOPOULOS, A.P.; GANZ, D.; GOLDAMMER, J.G.; HELD, A.; KONDRASHOV, L.; NOLASCO, M.MANTA; MARTÍNEZ, R.; MITSOPOULOS, I.D.; MOORE, P.F.; NIKOLOV, N.; ROBBINS, A.M.J.; SHIELDS, B.J.; SMITH, R.W.; STOCKS, B.J.; TRUESDALE, D. y VANHA-MAJAMAA, I.: *Fire management global assessment 2006*. capítulo Introduction and global analysis, pp. 3–59. FAO, 2007. [1.1](#)

BRAVO, HUMBERTO; SOSA, RODOLFO; SÁNCHEZ, PABLO y JAIMES, MONICA: *Incendios Forestales en México. Métodos de evaluación*. capítulo El impacto de los incendios forestales en la calidad del aire, pp. 75–93. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004. [1.2](#)

BURGAN, R.E.; KLAVER, R.E y KLAVER, J.M.: «Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations». *International Journal of Wildland Fire*, 1998, **8**, pp. 159–170. [3](#), [3.1](#), [3.7](#)

CALIFORNIA-ENVIRONMENTAL-PROTECTION-AGENCY: «Ambient Air Quality Standards (AAQS) for Particulate Matter», 2009. [1.4](#)

CAPULÍN, JUAN; CABALLERO, LEOPOLDO MOHEDANO y ZARATE, RAMÓN RAZO: «Cambios en el Suelo y Vegetación de un Bosque de Pino Afectado por Incendio». *Tierra Latinoamericana*, 2010, **28**, pp. 79–87. [1.7](#)

CARRERA-HERNÁNDEZ, J.J. y GASKIN, S.J.: «Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico». *ELSEVIER*, 2007, p. 231–249. [3](#), [3.4](#)

CASTILLO, MIGUEL: «Incendios Forestales y Medio Ambiente: Una Síntesis Global». *Informe técnico*, Laboratorio de Incendios forestales Universidad de Chile, 2010. [1.6](#)

CCA: «Environment». En: *Basic Conservation of Archival Materials*, Canadian council of Archives, 2003. [3.5](#)

CEDEÑO, OSCAR: *Fire management in México*. FAO, 2001. [1.7](#)

CERTINI, GIACOMO: «Effects of fire on properties of forest soils: a review». *Springer-Verlag*, 2005, **143**, pp. 1–10. [1.1](#), [1.3](#)

CHANDLER, C.; CHENEY, P.; TOMAS, P.; TRABAUD, L. y WILLIAMS, D.: *Fire in Forestry*, 1983. [3.3](#)

COCHRANE, M.A.: «Fire science for rainforests», 2003. [1.1](#)

CONABIO., 1998.

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_index=2](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_index=2)

CONABIO., 1999.

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv731mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_index=2](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv731mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_index=2)

- CONABIO, 2012.  
[http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos\\_calor/doctos/puntos\\_calor.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html) 3.13
- CONDE, CECILIA; FERRER, ROSA MARÍA; ARAUJO, RAQUEL; GAY, CARLOS; MAGAÑA, VÍCTOR; PÉREZ, JOSÉ LUIS; MORALES, TOMÁS y OROZCO, SATURNINO: *Los impactos del niño en México*. capítulo El niño y la Agricultura, pp. 103–135. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Autónoma de México, Secretaría de Gobernación, 2004. 1.6
- CRUZ-LÓPEZ, MARÍA-ISABEL: «Sistema de alerta temprana, monitoreo e impacto de los incendios forestales en México y Centroamérica.» En: *Wildfire*, , 2007. 3.13
- DEBANO, L.F.: *Observations on water-repellent soils in Western United States*. capítulo Water Repellent Soils: a state-of-the-art, 1969. 1.3
- DOMÍNGUEZ, SANTIAGO: *LA FÍSICA DE UN ÍNDICE PREDICTIVO DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES*, 2008. 3.10
- DONALDSON, TOBY: *PYTHON.Second Edition*, 2009. 3.14.2
- DOORENBOS, J. y PRUITT, W.: «Evaluación de la integridad de los datos climaticos». En: *Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, FAO, 1997. 3.5
- DOUGLAS, KORRY y DOUGLAS, SUSAN: *PostgreSQL. A comprehensive guide to building, programming, and administering PostgreSQL databases*. Sams Publishing, 2003. 3.14.4
- GAMARRA, BRUNO: «El Niño as a challenge for Global Climate Models», 2007. 1.6
- GILBERT, M.A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. y GARCÍA-HARO, J.: «Acercas de los Índices de Vegetación». *Teledetección*, 1997, 8, pp. 1–10. 3.2, 3.2
- HAMILTON, L.S.: «A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005». En: *Fire management-global assessment*, FAO, 2008. 1.1, 1.7
- [HTTP://GLOVIS.USGS.GOV/](http://GLOVIS.USGS.GOV/); 2000-2001. 3
- JENNY, H.: «Factors of soil formation». En: *Mc-Graw-Hill*, p. 281, 1941. 1.3
- KNOEPP, JENNIFER-D.; DEBANO, LEONARDO-F. y NEARY, DANIEL-G.: *Wildland Fire in Ecosystems*. capítulo Soil Chemistry, pp. 53–71. United States Department of Agriculture, 2005. 1.3
- MORFÍN, JORGE; JARDEL, ENRIQUE y MICHEL, JOSÉ: *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*, 2012. 3.3
- NASA: «Nasa Ties El Niño Induced Drought to Record Air Pollution From Fires». EARTH OBSERVATORY, 2003.  
<http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/view.php?id=23185> 1.6
- NEARY, DANIEL-G. y FOLLIOTT, PETER-F.: *Wildland Fire in Ecosystems*. capítulo The Water Resource: Its Importance, Characteristics, and General Responses to Fire, pp. 95–103. United States Department of Agriculture, 2005. 1.3
- NEARY, D.G.: «An Overview of Fire Effects on Soils». pp. 18–19 Arizona. United States Department of Agriculture, 2004. 1.3
- NETELER, MARKUS y MITASOVA, HELENA: *OPEN SOURCE GIS A GRASS GIS Approach*. Springer, 2008. 3.14.1
- OSPINA, JULIO-ERNESTO: *Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos*, 2001. 3.6
- REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M. y SHERWOOD, T.K.: *The Properties of Gases and Liquids, 3a ed.* capítulo Apéndice A. Mc Graw-Hill, 1977. 3.5, 3.5
- ROWE, J. S.: *The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems*. capítulo Concepts of Fire Effects on Plant Individuals and Species, pp. 135–152. John Wile & Sons Lid, 1983. 1.6
- SASTRY, NARAYAN: «FOREST FIRES, AIR POLLUTION, AND MORTALITY IN SOUTHEAST ASIA». *Demography*, 2002, 39, pp. 1–23. 1.2
- SCHWELA, DIETRICH; GOLDEMMER, JOHANN; ; MORAWSKA, LIDIA y SIMPSON, OMAR: «Guías de salud para incendios de vegetación: documento de orientación». *Informe técnico*, UNEP, OMM, OMS, CEPIS, 2001. 1.1

- SEMARNAT: *El ambiente en números*. Gobierno Federal, 2011. [1.7](#), [2](#)
- SMITH, S. J.; ANDRES, R.; CONCEPTION, E. y LURZ, J: «Sulfur Dioxide Emissions», 2004. [1.4](#)
- STULL, ROLAND B.: *Meteorology fo Scientists and Engineers*. capítulo Moisture, pp. 95–103. Cengage Learning, 1999. [3.5](#)
- VERZANI, JOHN: *Using R for Introductory Statistics*. Chapman & Hall, 2005. [3.14.3](#)
- VILLERS, LOURDES: «INCENDIOS FORESTALES». *CIENCIAS*, 2006, **081**, pp. 60–66. [3.8](#)
- VILLERS, LOURDES y LÓPEZ, JORGE: *Incendios Forestales en México. Métodos de Evaluación*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004. [1.1](#)
- VÉLEZ, RICARDO: *El Fuego en los Ecosistemas Forestales del Mundo*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2006. [1.1](#)
- WEINHOLD, BOB: «Campos y Bosques en Llamas. Humo Procedente e la Vegetación y Salud Humana». *Environmental Health Perspectives*, 2011, **42**, pp. A50–A57. [1.4](#)