



Tesis de grado

Licenciatura en Geografía

# Análisis de índices de riesgo de incendio forestal y su aplicabilidad en el Uruguay

Autora: Claudia Martínez

Tutora: Dra. Virginia Fernández

Co-tutora: Dra Madeleine Renom

Facultad de Ciencias

Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Diciembre de 2021

## Miembros del tribunal

---

Dr. Juan Hernández

---

Dra. Madeleine Renom

---

MSc. Yuri Resnichenko

# Análisis de índices de riesgo de incendio forestal y su aplicabilidad en el Uruguay

## Resumen

Existe una gran variedad de propuestas de índices para estimar el riesgo de incendio forestal. Esta diversidad se explica al menos en parte por la adecuación de cada índice a una determinada realidad, que puede incluir las condiciones naturales propias del ambiente objetivo o los recursos de información disponibles como variables de entrada. Por esto, generalmente hay propuestas de índices localizados por país o región, que consideran características propias del lugar como el clima y la cobertura vegetal. Por otro lado, también hay propuestas de índices simples que consideran pocas variables, e índices más complejos que consideran una mayor cantidad de variables y/o una mayor complejidad. Como no se ha desarrollado para Uruguay un índice localizado que considere tanto las características propias de nuestro territorio como los recursos de información disponibles para su construcción, la utilización de cualquier índice preexistente simplemente podría no ofrecer información significativa. En este trabajo se analizan diversas propuestas de índices existentes, se discuten los escenarios y condiciones en que serían aplicables, y se delinea una propuesta de construcción de un índice de riesgo forestal localizado para Uruguay.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>6</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	6
2.2. Objetivos específicos . . . . .	6
<b>3. Consideraciones metodológicas</b>	<b>7</b>
<b>4. Conceptos relevantes</b>	<b>9</b>
4.1. Comportamiento del fuego . . . . .	9
4.2. Definición y características de incendios forestales . . . . .	11
4.3. Factores que influyen en los incendios forestales . . . . .	15
4.3.1. Combustible . . . . .	16
4.3.2. Factores climáticos y meteorológicos . . . . .	20
4.3.3. Topografía . . . . .	23
4.4. Índices . . . . .	24
4.5. Rol de las geotecnologías en la gestión del riesgo . . . . .	26
<b>5. Trabajo relacionado</b>	<b>29</b>
<b>6. Ejemplos de índices de riesgo de incendios</b>	<b>36</b>
6.1. Índice <i>Munger</i> . . . . .	36
6.2. Índice <i>Angström</i> . . . . .	36
6.3. Índice <i>Nesterov</i> . . . . .	37
6.4. Índice <i>National Fire Danger Rating System (NFDRS)</i> . . . . .	39
6.5. Índice <i>MacArthur - Sistema Métrico Australiano</i> . . . . .	40
6.6. Índice <i>Baumgartner</i> . . . . .	41
6.7. Índice <i>Keetch-Byram Drought Index</i> . . . . .	42
6.8. Índice <i>M-68</i> . . . . .	43
6.9. Índice <i>Telicyn</i> . . . . .	43
6.10. Índice <i>Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)</i> . . . . .	44
6.11. Índice <i>Monte Alegre</i> . . . . .	47
6.12. Índice <i>Francés</i> . . . . .	48
6.13. Índice <i>Fosberg Fire Weather Index</i> . . . . .	49
6.14. Índice <i>de Reducción Evapotranspiración para el Peligro de Incendio</i> . . . . .	50
6.15. Índice <i>Español</i> . . . . .	50
6.16. Índice <i>Rodríguez Moretti</i> . . . . .	51
6.17. Índice <i>Portugués</i> . . . . .	52
6.18. Índice <i>Haines</i> . . . . .	53
6.19. Índice <i>I87-Carrega</i> . . . . .	54
6.20. Índice <i>Chile</i> . . . . .	55
6.21. Índice <i>de Riesgo Numérico</i> . . . . .	55
6.22. Índice <i>de Asturias</i> . . . . .	56
6.23. Índice <i>Risco Do Fogo</i> . . . . .	56

<b>7. Discusión</b>	<b>63</b>
<b>8. Propuesta</b>	<b>68</b>
8.1. Presentación . . . . .	68
8.2. Objetivo . . . . .	72
8.3. Alcance . . . . .	72
8.4. Diseño e implementación . . . . .	72
8.5. Pruebas . . . . .	74
8.6. Limitaciones y problemas . . . . .	85
8.7. Análisis de resultados . . . . .	87
<b>9. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>89</b>
<b>Referencias</b>	<b>94</b>

## 1. Introducción

Las tareas de predicción y prevención constituyen estrategias primordiales en la lucha contra incendios, puesto que permiten mejorar la eficacia de los mecanismos de respuesta, a la vez que optimizan y, en consecuencia economizan, el empleo de los recursos disponibles. Además, aportan criterios útiles para la gestión y planificación de los espacios forestales.

Dentro del marco de los sistemas de prevención de incendios, la elaboración de índices de riesgo a partir del estado de las condiciones meteorológicas ha mostrado ser una línea de trabajo fructífera en diferentes países [2]. El fenómeno de los incendios forestales tiene una clara manifestación territorial, ya que tanto los factores que inciden en su desencadenamiento como los efectos se distribuyen en el espacio y son afectados por él. Por lo que un análisis desde la geografía no sólo resulta oportuno sino necesario. El estudio del riesgo de los incendios forestales requiere, en la mayoría de los casos, un análisis integrado del territorio, pues un incendio forestal no se genera por la acción de un factor aislado, sino que se deriva de la acción conjunta de un grupo de factores, entre los cuales la vegetación, tipos climáticos, topografía y actividad humana resultan especialmente significativos [21].

Para un abordaje de la problemática de los incendios forestales, y en particular para construir mapas de riesgo de incendio forestal, es esencial comprender el proceso de los incendios forestales, los factores que contribuyen a hacer que el ambiente sea propenso al fuego, y los factores que influyen en el comportamiento del fuego [20]. Los mapas de riesgo de ignición pueden ayudar a las autoridades competentes, y eventualmente a otros interesados de la sociedad civil, a tomar medidas para prevenir o minimizar los impactos de los incendios forestales. y una vez desencadenado un incendio, los mapas de riesgo de propagación pueden ayudar a tomar medidas apropiadas para el manejo del fuego [22]. Por estos motivos existe un interés general en la investigación sobre índices de riesgo de incendio forestal y su representación en forma de mapas. Como respuesta a este interés, existe una multitud de propuestas con acercamientos diferentes, y esta diversidad se explica al menos en parte por la adecuación de cada índice a una determinada realidad, que puede incluir las condiciones naturales propias del ambiente objetivo o los recursos de información disponibles como variables de entrada. Por esto, generalmente hay propuestas de índices localizados por país o región, que consideran características propias del lugar como el clima y la cobertura vegetal. Por otro lado, también hay propuestas de índices simples que consideran pocas variables, e índices más complejos que consideran una mayor cantidad de variables y/o una mayor complejidad. Como no se ha desarrollado para Uruguay un índice localizado que considere tanto las características propias de nuestro territorio como los recursos de información disponibles para su construcción, la utilización de cualquier índice preexistente simplemente podría no ofrecer información significativa. En este trabajo se analizan diversas propuestas de índices existentes, se discuten los escenarios y condiciones en que serían aplicables, y se delinea una propuesta de construcción de un índice de riesgo forestal localizado para Uruguay.

El resto del trabajo se organiza como sigue. La Sección 2 presenta los objetivos generales y específicos del trabajo. En la Sección 3 se realizan consideraciones metodológicas y epistemológicas. En la Sección 4 se discuten algunos conceptos relevantes para la comprensión de las secciones siguientes. En la Sección 5 se sintetiza un análisis basado en una revisión bibliográfica. En la Sección 6 se presentan varios ejemplos de índices de riesgo de incendio. En la Sección 7 se realiza una discusión crítica de los índices analizados y su aplicabilidad al caso de Uruguay. En la Sección 8 se diseña y desarrolla una propuesta de índice de riesgo de incendios aplicable al caso de Uruguay. Finalmente, en la Sección 9 se presentan las conclusiones, algunos problemas que quedan abiertos y se delinear posibles líneas de trabajo futuro.

## **2. Objetivos**

En esta Sección se presentan los objetivos generales y específicos del trabajo.

### **2.1. Objetivo General**

Analizar el estado del arte sobre el manejo del riesgo de los incendios forestales, con especial atención a su aplicabilidad en el Uruguay.

### **2.2. Objetivos específicos**

Alineados al objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Describir y realizar el análisis crítico de técnicas y herramientas existentes de predicción del riesgo de incendios forestales, con énfasis en la generación de mapas de riesgo.
- Analizar los problemas inherentes al desarrollo de índices de incendio forestal.
- Proponer el diseño de un índice aplicado al territorio uruguayo, implementarlo y discutir los resultados preliminares.

### 3. Consideraciones metodológicas

Una de las dificultades para un abordaje científico de muchos problemas de la geografía, es la característica dual de esta ciencia, que puede considerarse tanto ciencia natural como ciencia social. En la medida que el objeto de estudio de la geografía incluye tanto al hombre como al ambiente y su relación con él, para realizar un abordaje completo podrá, y en algunos casos deberá, apelar a las herramientas y métodos de las ciencias naturales y de las ciencias sociales. En el caso del problema de los incendios forestales y la posibilidad de pronosticar una medida de riesgo de estos eventos, estas dificultades inherentes del abordaje geográfico se hacen evidentes, en tanto contribuyen al problema tanto variables naturales como sociales. Apelando solamente a la lógica, debemos admitir como razonable que variables como la precipitación, la humedad, la temperatura, el viento, el suelo y el tipo de forestación incidirán en la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal. Todas estas variables pertenecen al dominio de las ciencias naturales, y existen herramientas y métodos para tratarlas. Pero ocurre, como veremos en este trabajo, que la mayor parte de los incendios tienen un origen antrópico, por lo que debemos también admitir como razonable que variables como la presión demográfica y las conductas individuales también incidirán en la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal. Aquí nos encontramos además con la complejidad del universo de lo humano, ya que la presión demográfica podrá depender de múltiples factores y algunos muy difíciles de predecir, como por ejemplo una convocatoria no planificada de campamento estival masivo en algún punto de la costa de Rocha. En relación a las conductas individuales, deberemos admitir también que si bien es esperable que incidan variables que podríamos conocer como una medida de recepción de campañas de prevención, tenemos otras variables cuyo conocimiento e incluso su determinación escapan a cualquier análisis. Es probable que todas estas dificultades obliguen simplemente a ignorar la mayoría de las variables sociales, pero aún en esta necesidad debemos ser conscientes de haber realizado una simplificación por limitaciones de posibilidad y no de deseabilidad.

Existen otras limitaciones que pueden advertirse a priori. La primera de ellas es que variables como la precipitación pueden conocerse con exactitud, en el mejor de los casos, en algunos cuantos puntos discretos del territorio. Para poder obtener una cobertura continua sobre un mapa a partir de valores discretos, se debe apelar a un método de interpolación, y toda interpolación genera una superficie con valores supuestos. La suposición puede ser razonable, pero no deja de introducir en un modelo valores no observados que podrían diferir de la realidad. Esto ocurre con todas las variables cuyas observaciones se realicen en puntos discretos, pero sobre todo en los casos espacialmente irregulares como el de la precipitación, para la cual no existe un método de interpolación que se ajuste en todos los casos asegurando un margen de error poco significativo. Otra limitación de los modelos es que si incorporan alguna variable pronosticada, ésta formalmente debería considerarse una variable probabilística, que no tiene un valor fijo en un punto particular del espacio y el tiempo, sino que queda descrita a través de distribuciones de probabilidad. Como los modelos que trabajan con

campos aleatorios agregan una complejidad considerable, para la mayor parte de los propósitos prácticos los modelos se simplifican tratando las variables probabilísticas como si fueran determinísticas. En consecuencia, un modelo que debería haber sido estocástico se torna determinístico por simplificación, y se debe tener presente que estas simplificaciones eventualmente amplían el margen de error de los pronósticos [18].

Finalmente, no existe una teoría única que explique la propensión a la ignición. Como se verá en las secciones 5 y 6, existe una gran diversidad de propuestas de índices, lo cual es explicable no sólo por las diferencias de clima y cobertura vegetal entre diferentes puntos del globo, sino por la ausencia de una teoría. Los índices se utilizan más bien como un producto tecnológico, y se evalúan por su utilidad. En relación a la utilidad, un índice será útil en la medida que haya logrado predecir un alto riesgo de incendio en los eventos de incendio reales. Sin embargo, se debe tener presente que los incendios son eventos infrecuentes, que un riesgo alto no implica que un incendio se produzca, y como el factor antrópico es en ocasiones determinante, un incendio podría producirse aún cuando no exista una alta propensión a que se produzca. En consecuencia, es compleja la tarea de evaluar la eficacia de un índice, lo que no ayuda en la tarea de selección de un índice entre múltiples alternativas.

## 4. Conceptos relevantes

### 4.1. Comportamiento del fuego

Para que ocurra un incendio forestal es necesaria la presencia del fuego. En este contexto, el comportamiento del fuego es un concepto empleado para designar la forma de desarrollo del fuego en un incendio forestal, y también refiere a las características físicas observadas durante un incendio y que determinan el potencial de los efectos de su propagación. Los incendios forestales son todos diferentes, ya que el comportamiento del fuego evolucionará en función de los distintos componentes del entorno [37].

La Figura 1 presenta el denominado *triángulo del fuego*, donde se representan los tres factores necesarios para que ocurra el fenómeno de la combustión. Estos elementos son:

- El *combustible*, material que libera energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor. En el caso de los incendios forestales es la vegetación
- El *comburente*, agente oxidante que favorece la combustión. En el caso de los incendios forestales es el oxígeno presente en el aire
- El *calor*, la energía necesaria para iniciar la combustión. En el caso de los incendios forestales puede ser una simple chispa



Figura 1: Triángulo del fuego. Elaboración propia

La combustión es un proceso químico en el que unas sustancias, los combustibles, se combinan con el oxígeno, desapareciendo en el proceso y dando lugar a la formación de nuevas sustancias. Este proceso tiene tres fases: *precalentamiento*, *combustión de gases* y *combustión de carbón*:

- El *precalentamiento* ocurre cuando un combustible es expuesto a una fuente de calor (sol o llamas), la temperatura comienza a elevarse, se acerca al

punto de ignición que varía de acuerdo a las características del combustible (que puede variar en el orden de los 100°C a 200°C), el combustible pierde humedad y hay una incipiente generación de hidrocarburos gaseosos pero aún sin llamas.

- La *combustión de gases* se inicia cuando la temperatura alcanza valores entre los 300°C y 400°C, se queman sólo los gases y aparecen llamas sobre los combustibles. Con la ignición se acelera el proceso de combustión y precalentamiento. La temperatura continúa ascendiendo hasta los 600°C a 1000°C. Se desprende humo, formado por gases no quemados, anhídrido carbónico y vapor de agua.
- La *combustión de carbón*, la madera se quema, se generan cenizas. Los residuos son sustancias minerales que no arden. Se genera alta intensidad calórica y poco humo.

La Figura 2 grafica cada una de estas fases.

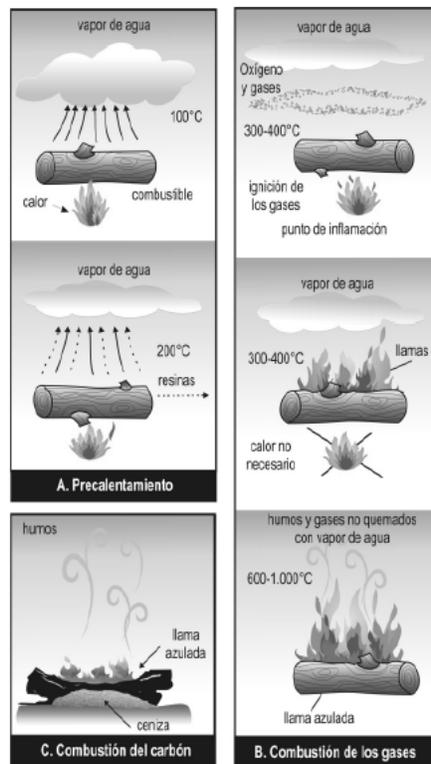


Figura 2: Fases de la combustión. Fuente: [63]

## 4.2. Definición y características de incendios forestales

Existen varias definiciones de incendio forestal, generalmente se encuentra definido como una reacción química fuera de control que se caracteriza por la generación de energía. Cuando dicha reacción afecta a la superficie vegetal en un espacio abierto se la denomina incendio forestal [77]. Los incendios son fuegos que se propagan sin control humano, sean de origen natural o antrópico que ocurren en los ecosistemas terrestres y que se propagan por todo tipo de vegetación [58].

Según Juli Pausas los incendios generalmente se clasifican de acuerdo al estrato de la vegetación afectado por el fuego, a las características de los ecosistemas y a la forma de avance del incendio. Esta clasificación deriva en 3 clases:

- *Incendios de subsuelo*: Este tipo de incendio se produce cuando se quema la materia orgánica que se encuentra entre la superficie y la capa mineral del suelo (virutas, hojas muertas, raíces, residuos vegetales en descomposición, humus, etc). No existe la presencia de llamas pero si se puede detectar por el humo. La falta de oxígeno hace que el avance sea lento pero pueden permanecer varios días con contenidos elevados de humedad generando importantes daños en el ciclo ecológico. Son incendios poco frecuentes y se dan típicamente en turberas y ciénagas.
- *Incendios de superficie*: Son incendios que se propagan por el estrato herbáceo o la hojarasca, se quema el material combustible situado inmediatamente sobre la superficie del suelo, sin alcanzar las copas de los árboles. Esta capa comprende hojas, ramas muertas, troncos caídos, restos de talas, vegetación herbácea viva y matorrales. Hay una discontinuidad vertical del combustible fino, de manera que el sotobosque está separado de la copa de los árboles e impide que el fuego de superficie se propague a las copas. Este tipo de incendios son los más comunes.
- *Incendios de copas*: El fuego afecta prácticamente a todos los estratos de la vegetación y a toda la parte aérea de las plantas, incluyendo las copas de los árboles. Estos incendios son más intensos que los de superficie, presentan mayor dificultad para la extinción y peores efectos sobre la masa forestal.

El conocimiento de las diferentes características físicas de los incendios forestales es imprescindible para describir y entender su comportamiento y son insumos básicos a la hora de implementar modelos. Los incendios forestales pueden describir distintas formas geométricas, distintas morfologías. Pueden adquirir formas circulares, elípticas o irregulares, estas formas están determinadas principalmente por las condiciones meteorológicas (dirección y velocidad del viento), topográficas (pendiente, tipo de suelo) y ecológicas (variación en el tipo de combustible).

Iniciado el fuego en un lugar determinado, las llamas se extienden a su alrededor formando un perímetro que va ardiendo y dejando en su interior una zona quemada. En condiciones de terreno plano, vegetación homogénea y sin

viento, el fuego avanzaría en todas las direcciones de igual forma, y la geometría descrita por el incendio en este caso sería circular.

Los incendios de forma elíptica se caracterizan por la presencia de viento o la inclinación del terreno, el perímetro en llamas suele adoptar una forma de elipse y el fuego tiene distinta intensidad y velocidad en distintos puntos de dicho perímetro.

Los incendios de forma irregular se desarrollan bajo la influencia de viento variable en intensidad y dirección, se quema combustible heterogéneo y/o se propaga en pendientes irregulares, son las geometrías más comunes. La Figura 3 muestra las morfologías descritas [77].

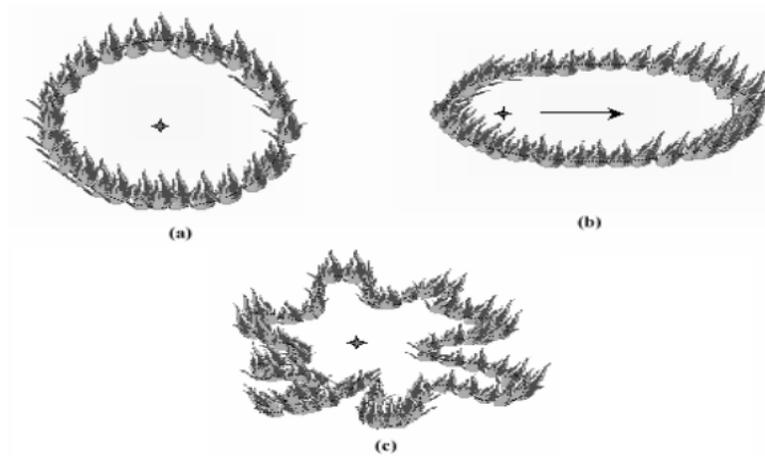


Figura 3: Morfología de los incendios. Fuente: [77]

De acuerdo a L. Zárate, en las morfologías que se describen se pueden distinguir las siguientes partes:

- *Línea o borde del incendio*: es el perímetro del incendio en un momento determinado, línea perimetral que está ardiendo.
- *Frente*: es la sección perimetral del incendio directamente influida por la velocidad del viento y la topografía del terreno, y es donde se produce la mayor velocidad de propagación y generación de calor. En esta sección es donde se ocasionan los mayores daños y su dominio constituye la clave para el control del incendio; a su vez, su extinción es la más difícil.
- *Cola*: es la parte opuesta al frente y por lo general la más próxima al origen del incendio, generalmente es la parte que se quema más lentamente y con menor intensidad.
- *Flancos*: son las partes situadas entre el frente y la cola del incendio, perpendicular a la línea principal de propagación del incendio. Se distinguen

dos flancos, uno derecho y otro izquierdo. No queman de forma tan intensa como el frente aunque son más activos que la cola.

- *Dedos*: son fuegos que progresan detrás del frente, pudiendo dividirse en varias partes largas y estrechas, con una intensidad y tamaño propios según las condiciones locales. Cada dedo puede desarrollar un nuevo frente de incendio.
- *Islas*: son áreas localizadas en el interior del perímetro del incendio, con presencia de restos de combustible sin quemar.
- *Entrantes*: son partes del perímetro de un incendio que se desarrollan más lentamente a causa de la presencia de obstáculos o situaciones desfavorables.
- *Focos secundarios*: son incendios que se producen fuera del perímetro del incendio a causa de la emisión de partículas combustibles incandescentes.

El frente avanza más rápido cuanto más fuerte es el viento o más inclinado el terreno pues las llamas van desecando el combustible que está sin arder, lo que facilita su ignición, y al mismo tiempo la elipse se va haciendo más alargada. En los flancos y cola, por el contrario, el fuego no encuentra estas condiciones en la vegetación y avanza más despacio y por ello serán los lados por los que se pueda atacar el fuego directamente. La Figura 4 ilustra las partes de un incendio descritas [77].



Figura 4: Partes de un incendio. Fuente: [77]

Conocer las características físicas del frente del incendio es fundamental para la predicción del comportamiento del mismo, por ejemplo conocer la velocidad de propagación, la intensidad lineal o intensidad calórica y la temperatura. De estas características, una de las más difíciles de medir en un gran incendio es la temperatura, ya que varía mucho en el tiempo y el espacio, y es función del tipo, tamaño, distribución espacial y contenido hídrico del combustible, así como de

la velocidad del viento. Dependiendo de la zona del incendio que se observe se registrarán valores distintos, como las temperatura del suelo, de la zona de combustible, de la zona de llamas y de la columna de convección [77].

Dos conceptos son los más importantes para caracterizar el incendio: la velocidad de propagación y la intensidad calórica.

- *Velocidad de propagación*: distancia recorrida por el incendio por unidad de tiempo. Esta velocidad es dependiente del viento, de la pendiente del terreno y del tipo de combustible. La velocidad de propagación varía según el tipo de incendio; en terrenos planos sin influencia del viento, desplazándose superficialmente consumiendo hojarascas y vegetación pequeña, puede desplazarse a un ritmo de 50 a 200 metros por hora; en cambio, un incendio subterráneo lo hace mucho más lento avanzando unos pocos metros al día.
- *Intensidad calórica*: cantidad de calor que se libera en el frente del incendio por unidad de tiempo y de longitud. Es una forma de cuantificar el potencial de peligrosidad. En el Cuadro 1 se muestra la expresión matemática que la representa [44].

$$I = H \times W \times r$$

*siendo*

*I*: intensidad calórica, expresada en Kcal/s/m de frente de avance

*H*: poder calórico del combustible, expresado en Kcal/Kg de material

*W*: peso del combustible disponible, expresado en Kg de materia seca / m<sup>2</sup>

*r*: velocidad de propagación del fuego, expresado en m/s

Cuadro 1: Determinación de la intensidad calórica

Por otra parte, también es fundamental conocer las características geométricas de la llama en el frente de incendio, ya que son indicadores muy importantes para estudiar el comportamiento del fuego (altura, longitud, ángulo de inclinación, profundidad o anchura de su llama).

La transferencia de calor es de las características más importante en el fenómeno de los incendios forestales, porque el calor provoca graves daños, acrecienta y expande el fuego y lo propaga. El tipo y la cantidad de calor transmitido influyen en la velocidad de propagación de un incendio; por otra parte, la combustión no se puede mantener sin una aportación continua de calor. La transferencia de calor se efectúa mediante los tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. Estos tres mecanismos se presentan de forma simultánea en el transcurso de un incendio.

- La *conducción* es la transferencia de calor que se produce a través de un medio material por contacto directo entre los cuerpos sin intercambio de materia, el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que están en contacto. Por ejemplo cuando se incendia un

bosque, el calor se propaga por conducción hacia otras partes del combustible (troncos y ramas) más frías. La madera tiene una elevada capacidad calorífica, cuanto más masa tenga más calor transmitido necesitará para iniciar su proceso de combustión. La madera es un mal conductor del calor, entonces la conducción es lenta, esto es muy notorio en un bosque de grandes masas de troncos y hojas donde la conducción de calor es mucho más lenta que en cualquiera de los otros mecanismos (convección y radiación). En cambio, si en el bosque hay material combustible de baja carga (ramas chicas, residuos, humus de la descomposición de hojas y madera), la transmisión de calor por conducción es mucho más rápida. Debido a la conducción, los troncos, las ramas y otros combustibles del bosque que han iniciado su proceso de combustión se continúan quemando aunque ya haya pasado el frente del incendio, esto se debe a que el calor está presente en el interior de los materiales, y de hecho en ocasiones es responsable de que los incendios se vuelvan a reactivar.

- La *convección* transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas, se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. Gran parte del calor generado en los incendios se transmite por convección. El mecanismo de convección es el predominante cuando se transfiere energía entre los gases calientes desprendidos por un incendio y la superficie sólida del combustible, que se encuentra a diferente temperatura.
- La *radiación* es la transferencia de calor por radiación electromagnética (generalmente infrarroja) que se genera por el movimiento térmico de las partículas cargadas que hay en la materia, es la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura. La mayor parte de la energía calorífica de un incendio se debe a la radiación y la convección. La radiación ayuda a calentar el combustible antes que el fuego se haya iniciado. Algunos autores han considerado este mecanismo como el máximo responsable del precalentamiento de los combustibles cuando avanza un frente de llama en un incendio forestal [66, 75]. La radiación puede provenir tanto de los sólidos, como de los líquidos y gases. De hecho, las llamas de un incendio son una mezcla de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) y de cenizas incandescentes [77].

El estudio de los incendios forestales puede ser abordado por diversas disciplinas y con distintos enfoques, pero sin duda se trata de «*un fenómeno verdaderamente geográfico, puesto que sus causas están ligadas a factores eminentemente territoriales y sus efectos tienen una clara incidencia en el paisaje*» [31].

### 4.3. Factores que influyen en los incendios forestales

El comportamiento de la mayoría de los incendios forestales, en cierta medida es predecible si se conocen adecuadamente los factores que influyen en la ignición y en la propagación del fuego. Los principales factores que influyen sobre el

comportamiento del incendio son: el *combustible* (la vegetación), los *factores climáticos y meteorológicos*, y la *topografía* (orientación y pendiente).

#### 4.3.1. Combustible

Es uno de los componentes más importantes en el comportamiento del fuego. En el caso de los incendios forestales el combustible es la cobertura vegetal. Es importante conocer las propiedades de estos combustibles que condicionan la intensidad y la velocidad de propagación de un incendio, tales como:

- Carga de combustible: la cantidad de combustible por unidad de superficie.
- La forma (cilíndrica, esférica, irregular, etc) y el tamaño (ancho y largo) del combustible se pueden utilizar para determinar la relación geométrica «radio de área de superficie a volumen» (o *surface area to volume ratio*, SA/V). Mediante la ecuación del Cuadro 2 se puede determinar esta relación entre el área de la superficie y el volumen en combustibles que tienden a una forma cilíndrica o alargada. Intuitivamente, es una medida de qué tan fino es el combustible. En general el tiempo de ignición decrece cuando el combustible es más fino, y viceversa [44, 5].

$$\sigma = 4/d$$

superficie/volumen (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

Cuadro 2: Ecuación superficie/volumen del combustible

Otro aspecto importante es la compactación del combustible, el espacio existente entre el combustible, que afecta tanto a la ignición como a la propagación. Cuando el combustible está muy compactado la velocidad de propagación del fuego suele ser más lenta por falta de oxígeno. Además, el espacio entre los combustibles determina el mecanismo de transferencia de calor, si están muy separados, la transferencia será por radiación y convección.

Por otra parte importa también conocer como se distribuye el combustible en el espacio, su continuidad espacial facilita la propagación del fuego.

Existe una gran variabilidad en los combustibles en cuanto a su tipo, forma y tamaño. Debido a esto se han elaborado descripciones generalizadas de los combustibles, denominadas *modelos de combustibles*. La clasificación más conocida es la desarrollada por Rothermel en 1972 [65]. Si bien fue pensada para Estados Unidos, es ampliamente utilizada en otros países, y ha sido la base de otros modelos de combustible. Se define al modelo de combustible como un conjunto de valores numéricos que describen el tipo de combustible. Estos valores son luego utilizados en los modelos de predicción matemáticos del comportamiento del fuego, especialmente para modelar la velocidad e intensidad de propagación [7].

La clasificación de Rothermel define 11 modelos de combustibles. Esta caracterización considera la carga de material (vivo y muerto), tamaño y clase de

partícula, relación área de superficie a volumen, contenido de calor por categoría y profundidad del «colchón» de combustible. Se puede aplicar un modelo de combustible a varios tipos de vegetación. En estos 11 modelos Rothermel mantuvo constantes las propiedades de las partículas de combustible (contenido mineral, densidad, etc), y el contenido de humedad de cada modelo era del 30 % para todos por igual. Con el correr de los años se han incorporado distintas consideraciones a esta clasificación. En 1976 Albini redefine estos 11 modelos y agrega dos tipos más, *Domant Brush* y *Southern Rough* [4]. De esta forma pasan a ser 13 los modelos de combustible. La valoración en el contenido de humedad se mantuvo para los 11 modelos definidos por Rothermel, pero los dos modelos agregados por Albini especifican valores distintos. En 1981 Anderson [6] hace aportes en lo que refiere a las características de los modelos. De todas formas, la clasificación original de Rothermel sigue siendo la base de los modelos de combustibles utilizados en gran parte del mundo, en algunos casos con adaptaciones de acuerdo a las necesidades y a la realidad del lugar para el cual se adapta. Vale mencionar que estos modelos de combustibles son efectivos para explicar la propagación del fuego en superficie, pero no son efectivos para explicar la transición del fuego a la copa de los árboles [67].

El Cuadro 3 describe los 13 modelos de combustible de Rothermel y Albini en 4 grupos de acuerdo a sus características («M» significa Modelo).

Grupo	M	Descripción
1. Modelos de Pasto	1	Pasto fino, seco, bajo. El matorral cubre menos de 1/3 de la superficie. Cantidad de materia seca 1-2 t/ha
	2	Pastizal con presencia de matorral o arbolado. Cubren de 1/3 a 2/3 de la superficie. Cantidad de materia seca 5-10 t/ha
	3	Pastizal espezo y alto mayor a 1m. Modelo típico de la sabana. Los campos cereales representan este modelo. Cantidad de materia seca 4-6 t/ha
2. Modelos de Matorral	4	Matorral o arbolado joven muy denso de 2m de altura. Continuidad horizontal y vertical del combustible. Cantidad de materia seca 25-35 t/ha
	5	Matorral denso y joven, menos de 1m de altura. Poco material muerto. Cantidad de materia seca 5-8 t/ha
	6	Material parecido al modelo 5 pero con alturas > 1m. Restos de frondosas. Cantidad de materia seca 10-15 t/ha
	7	Matorrales de especies muy inflamables alturas < 2m. Pinares de sotobosque. Cantidad de materia seca 10-15 t/ha
3. Modelos de Hojarasca Bajo Arbolado	8	Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas. Se forma una capa compacta. Cantidad de materia seca 10-12 t/ha
	9	Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas. Se forma una capa poco compacta. Cantidad de materia seca 10-12 t/ha
	10	Restos de leños, leña gruesa producto de vendavales. Presencia de matorral y herbáceas. Cantidad de materia seca 30-35 t/ha
4. Modelos de Restos de Corta y Operaciones	11	Bosque claro, con restos ligeros. Capa poco compacta de escasa altura. Cantidad de materia seca 30-35 t/ha
	12	Predominio del resto sobre el arbolado. Capa continua de hasta 60cm de altura. Cantidad de materia seca 50-80 t/ha
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos. Cubren todo el suelo. Cantidad de materia seca 100-150 t/ha

Cuadro 3: Modelos de Combustible de Rothermel y Albini. Fuente: [4]

Estos modelos de combustible constituyen insumos importantes en los modelos de comportamiento del fuego o simulaciones de incendios. Sus valoraciones cuantitativas quedan sujetas a las realidades de cada lugar donde se pretenda implementar, así como a las ecuaciones del modelo.

La inflamabilidad de una especie depende de numerosas características y tiene que ver con las estructuras de la planta y con el tipo de tejido que posee.

Las plantas pueden tener algunos rasgos que les proporcionen mayor inflamabilidad, por ejemplo características estructurales tales como mayor proporción de biomasa fina o muerta. Por ejemplo, las gramíneas suelen ser plantas muy inflamables porque su biomasa es muy fina. También existen características químicas (compuestos orgánicos volátiles) que aumentan la inflamabilidad de las plantas, como pueden ser resinas, esencias y terpenos. Las plantas de las familias de las labiadas tienen abundantes compuestos aromáticos inflamables [58].

Las características intrínsecas de los combustibles son importantes de conocer, tales como el poder calorífico, composición química, densidad, conductividad térmica, entre otras. La materia vegetal es siempre combustible, pero no siempre es inflamable. La inflamabilidad varía según la especie y el contenido de humedad. En general se realizan ensayos en laboratorio sometiendo a pruebas de quemas distintos vegetales para dar una valoración a la inflamabilidad dependiendo del tipo de vegetación. En estos ensayos se estudian por lo menos 4 componentes:

1. el *tiempo de ignición*, facilidad con la que un material entra en ignición,
2. la *duración de la combustión*, describe la propiedad de un combustible para continuar quemándose,
3. el *calor liberado*, se refiere al calor desprendido, que ha de ser en cantidad suficiente para mantener la combustión y propagarla a la materia vegetal próxima y
4. la *proporción del combustible quemado*, se refiere a la proporción de la masa de un combustible que entró en combustión

Las mediciones se pueden realizar a distintas escalas como ser partes de la planta, plantas completas y comunidades de plantas, y también se pueden tener en consideración componentes estructurales como el tamaño y forma de hojas y el grosor de las ramas, o químicos como la humedad, presencia de compuestos volátiles y resinas. A escala de plantas completas la inflamabilidad depende también de la disposición física de la biomasa, por ejemplo el volumen del dosel, la retención de biomasa muerta y la disposición de las ramas. La escala de comunidades de vegetación presenta dificultades para determinar inflamabilidad ya que una planta en particular puede ser anulada por la inflamabilidad de otras plantas de la comunidad. Hay experimentos de laboratorio que muestran que especies muy inflamables, aún en bajas proporciones en la comunidad, pueden aumentar significativamente la inflamabilidad general del sistema. El efecto que tiene la presencia de una especie en particular en la inflamabilidad total de la comunidad, varía mucho con la composición de la comunidad y con la distribución horizontal y vertical del resto de las especies en el espacio [52].

La inflamabilidad de los combustibles guarda una estrecha relación con la superficie o contorno de los mismos. Si el combustible presenta una gran cantidad de aristas, abundantes ramas finas, puntiagudas, espinescentes, es altamente inflamable. Por otra parte es necesario tener presente que la inflamabilidad es una característica dinámica, varía en el tiempo, y lo puede hacer a escala de

plantas, donde los componentes de la inflamabilidad pueden variar anualmente e interanualmente como el contenido de humedad y el punto de ignición, y a escala de comunidades. Luego de un incendio las comunidades vegetales sufren cambios en su composición y en sus estructuras que alteran su inflamabilidad, hay especies que después de un incendio aumenta su inflamabilidad y se produce una retroalimentación positiva entre el fuego y la vegetación, en estas especies el fuego provoca más fuego, al poco tiempo de ocurrido un incendio la comunidad es lo suficientemente inflamable para sostener uno nuevo. La inflamabilidad de estas comunidades vegetales desciende a lo largo del tiempo y de no suceder incendios entonces son ambientes menos inflamables. Trabajos de campo que evalúen estas inflamabilidades sobre todo a escala de comunidad son bastantes escasos, y la mayoría de los estudios de los mismos se deben a modelos de simulación y a procesos de teledetección [74].

No es fácil de cuantificar la inflamabilidad: no tiene una medida concreta sino que existen diversos parámetros que sí son medibles y que están relacionados con la inflamabilidad de las plantas, como por ejemplo la proporción de biomasa muerta, o cantidad y tipo de volátiles inflamables, pero estos últimos requieren de análisis químicos muy complejos. Las diferentes medidas relacionadas con la inflamabilidad no tienen por qué estar correlacionadas entre sí, por ejemplo a veces se considera que una planta en la que el fuego se prende y propaga rápidamente es muy inflamable, aunque desprenda poco calor, otras veces se considera que la planta es inflamable si genera gran intensidad de calor. A escala de comunidad la determinación de la inflamabilidad se torna aún más difícil, porque no sólo varía de especie a especie, sino con el tamaño, con la densidad de la planta y con la distribución espacial y la cobertura de cada especie. La inflamabilidad mayor de las plantas suele darse en etapas recientes de la sucesión vegetal, ya que son comunidades abiertas y dominan las especies de crecimiento rápido, y menor en las especies de etapas tardías de la sucesión vegetal. A lo largo de la sucesión la biomasa suele aumentar, por ello en muchos casos la máxima inflamabilidad de la comunidad y el máximo riesgo de incendio ocurre en situaciones intermedias de la sucesión, donde existen algunas especies de crecimiento relativamente rápido y otras que acumulan cantidades significativas de biomasa [58].

#### **4.3.2. Factores climáticos y meteorológicos**

Los incendios y el clima están fuertemente relacionados y eso se hace evidente al comprobar que la mayoría de los incendios ocurren durante las épocas secas y cálidas. Pero se vuelve complejo poder determinar las relaciones entre el fuego y los parámetros climáticos y meteorológicos. Las condiciones meteorológicas secas favorecen la inflamabilidad de la vegetación, dejando la vegetación en condiciones más que favorables para la ignición, ya sea proveniente de causas naturales como un rayo, como de alguna actividad antrópica. Por otra parte, condiciones húmedas previas a la época seca incrementan la cantidad y la continuidad del combustible fino, lo que favorece a la ignición y la propagación del fuego en la siguiente época seca [58].

El clima ejerce un factor de control predominante en la frecuencia y ocurrencia de incendios, porque determina la sucesión de períodos secos y húmedos, la acumulación de biomasa, la carga de combustible y su estado hídrico. Las variaciones en el contenido de humedad del combustible y por consiguiente su inflamabilidad, provienen fundamentalmente de una compleja interrelación entre las diferentes variables meteorológicas y los distintos tipos de combustibles. La radiación solar, precipitación, temperatura del aire y humedad atmosférica afectan principalmente al contenido de humedad del combustible y tienen un papel protagonista en el inicio de un incendio. Una vez iniciado el incendio, otras variables como la velocidad y dirección del viento o la estabilidad atmosférica ofrecen una notable influencia en la propagación del fuego [3].

La temperatura del aire, de los combustibles vegetales y de la superficie del suelo están estrechamente relacionadas entre sí a través del intercambio de calor por diversos mecanismos. Los combustibles vegetales al aumentar su temperatura aceleran su secado y facilitan de esta forma la ignición [28].

La vegetación condiciona la cantidad de radiación solar que llega al suelo y atrapa parte de la radiación de onda larga emitida por la superficie y la retiene dentro del dosel. De esta forma se generan grandes diferencias en la cantidad de radiación neta retenida por los distintos estratos de vegetación, con diferencias de temperatura en las alturas dentro del dosel. El aumento de la temperatura debido a la cantidad de radiación que llega a la superficie depende de las características propias de cada suelo (reflectividad, abosortividad, emisividad, entre otras).

Los combustibles reciben radiación solar tanto directa como difusa en una cantidad dada que depende del momento, de la ubicación geográfica, de la forma y de la estructura del complejo de combustible (densidad, especies que lo componen, etc.). La inflamabilidad de los combustibles varía con su temperatura, a mayor temperatura mayor probabilidad de ignición. La respuesta de los combustibles a una cantidad de radiación incidente varía mucho de acuerdo con qué tipo de combustibles se trate. En combustibles vivos la incidencia de la radiación activa diversos mecanismos fisiológicos, en combustibles muertos la energía recibida es utilizada para evaporar la humedad que estos contienen e incrementar su temperatura.

La temperatura del aire en las proximidades de la superficie está fuertemente asociada a la temperatura de la superficie del suelo y de la vegetación que la cubre. El aumento de la temperatura del suelo o de la vegetación que la cubre, genera corrientes convectivas que aumentan la probabilidad de ignición de los combustibles aéreos. Las diferencias en las temperaturas deben de ser consideradas en los análisis de peligrosidad de incendios, ya que son determinantes del contenido de humedad de los combustibles así como también responsables de la generación de movimientos de aire que afectan al comportamiento del fuego. Las variaciones de la temperatura con la altura también dan lugar a fenómenos relevantes en el comportamiento del fuego, tales como las inversiones térmicas.

El contenido de humedad de los combustibles esta estrechamente relacionado con el contenido de humedad de la atmósfera y es un factor crítico para el comienzo y el comportamiento posterior de los incendios.

Hay diversos parámetros que permiten estimar la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, la humedad relativa es el más frecuentemente utilizado para evaluar la peligrosidad de los incendios mediante índices, justamente porque indica la capacidad de la atmósfera de absorber humedad. La humedad relativa es un indicador del porcentaje de vapor de agua que contiene el aire con respecto al máximo que podría contener a la temperatura y presión en que se encuentra en ese momento. Cuando la humedad relativa es baja, la evaporación y secado de los combustibles se ven favorecidos, aumentando la probabilidad de ignición.

El contenido de humedad de los combustibles vivos es el resultado de procesos fisiológicos y fenológicos que ocurren en las plantas, regulados por la absorción de agua a través de las raíces y por las pérdidas por transpiración. La transpiración es regulada por factores atmosféricos, como son la radiación solar, la temperatura, humedad relativa y el viento y por las estructuras internas de la hoja. Hay que tener presente que los complejos de combustibles, integrados por diferentes especies de vegetación tienen formas distintas de responder a los cambios en el ambiente, hacen un aprovechamiento diferente del agua disponible en el suelo, lo que les confiere diferencias en el contenido de humedad. Entre los combustibles vivos la vegetación herbácea es uno de los principales contribuyentes a la propagación del fuego, sobre todo las anuales que son más afectadas por eventos de sequía respecto a las perennes, en parte por las raíces superficiales. En el caso de las leñosas los más altos contenidos de humedad están en el follaje y en los brotes nuevos. En el caso de los combustibles muertos el contenido de humedad está determinado por las variables meteorológicas como la temperatura, radiación y la precipitación. Los combustibles están constantemente intercambiando humedad con su entorno, cuando el contenido de humedad del aire es alto o cuando se producen precipitaciones y ganan humedad, mientras que en los períodos sin humedad o sin lluvia entregan humedad a la atmósfera.

Si el contenido de humedad de la atmósfera se mantuviera constante durante un cierto período llegaría un momento que la presión de vapor de los combustibles y la presión de vapor del aire se equilibrarían, cesando el intercambio de humedad, en este punto es que se alcanza el punto de humedad de equilibrio.

La pérdida o ganancia de humedad no se produce a velocidad constante, sino que es más rápida al principio y más lenta a medida que los combustibles se acercan a la situación de equilibrio. Se define como tiempo de retardo al tiempo necesario para que un combustible gane o pierda las dos terceras partes de la diferencia entre su contenido de humedad inicial y su contenido de humedad de equilibrio con el medio que lo rodea, el tiempo de retardo es mayor a medida que aumenta el tamaño de los combustibles. El diámetro de los combustibles se usa junto con el tiempo de retardo para determinar clases y estimar la peligrosidad de los incendios.

El comportamiento de los incendios es afectado por los movimientos del aire tanto horizontales como verticales que se producen en la atmósfera. En el caso de los movimientos horizontales (el viento) son relativamente fáciles de percibir y de hecho es una de las variables que se usan en los índices de riesgo de incendio; en cambio, los movimientos verticales no resultan tan fáciles de integrar en

estos índices, pero tienen diversos efectos sobre el comportamiento del fuego. En algunos casos, cuando la atmósfera está estable, el desarrollo de la columna de convección se ve inhibido, el viento tiene velocidad y dirección constante y el comportamiento del fuego es más sencillo de predecir. Por otro lado la inestabilidad atmosférica asociada a vientos arrachados favorece el desarrollo de grandes columnas convectivas, el comportamiento del fuego se torna errático y difícil de predecir.

Diversos índices de riesgo de incendio toman en cuenta la precipitación como una de las variables del análisis, ya que es una de las variables que aportan humedad a los combustibles de acuerdo al diámetro de los mismos. Los combustibles finos reaccionan rápidamente frente a la precipitación alcanzando la saturación en el corto tiempo, pero de la misma forma pierden el contenido de humedad de sucederse un período corto de ausencia de precipitaciones y alta evaporación y los predispone a la ignición. Los combustibles de mayor diámetro demoran más en modificar su contenido de humedad, y esta es una de las razones por las cuales se debe tener mucho cuidado a la hora de cuantificar el peso relativo de la variable precipitación en los cálculos de índices de riesgo de incendios. Por ejemplo el sistema de evaluación de peligro de incendios de Canadá incluye tres códigos para la estimación del contenido de humedad de los combustibles:

1. código de contenido de humedad de combustible finos,
2. código de contenido de humedad de mantillo y
3. código de sequía

Cada uno evalúa el contenido de humedad del combustible con diferente tiempo de retardo.

Otra de las variables muy importantes e incidentes en el comportamiento del fuego es el viento. Este controla la velocidad y propagación del fuego. Las observaciones del viento deben contemplar no sólo las características del viento en superficie, sino también del viento en altura. Las columnas de convección de gran desarrollo vertical favorecen la interacción entre el viento de distintos niveles y aumentan la probabilidad de que el viento de altura pueda alcanzar la superficie, modificando la velocidad y dirección de propagación del fuego. Además, el viento aumenta la provisión de oxígeno, acelera el proceso de secado de los combustibles, transporta el material en combustión, y acelera la fase de precalentamiento al acercar las llamas a los combustibles [28].

### 4.3.3. Topografía

La topografía es otro de los factores que más influyen en el comportamiento del incendio. Entre otros aspectos favorece la transferencia de energía, y condicionan algunas características de la vegetación y la climatología. Los factores topográficos son los factores relativamente más constantes y su influencia sobre el fuego es más fácil de prever. La pendiente incide en la velocidad de propagación del fuego y en combinación con el viento pueden acelerar la velocidad de

propagación, porque produce un efecto de corrientes de aire caliente que pueden incrementar violentamente la velocidad de propagación (anticipa la exposición de los combustibles forestales a la fuente calórica, reduciéndose por lo tanto la duración de la fase de precalentamiento en la combustión). El calor transferido por radiación y por convección se incrementa cuando el fuego asciende por una pendiente [44].

Importa también la exposición o la orientación de las laderas o pendientes ya que incide en el comportamiento del incendio por las variaciones de viento y radiación solar que reciben dichas laderas. La intensidad de la radiación es mayor cuando la ladera es perpendicular al ángulo de incidencia del sol. La forma que presenta el terreno, como la presencia de cañadas, barrancos, valles o crestas, ejerce gran influencia en los regímenes de viento, que a su vez, influyen de manera determinante en la dirección y velocidad de propagación del fuego [77].

En zonas montañosas, las características geomorfológicas, la exposición de la ladera y la posición topográfica, condicionan las características ambientales del sitio, como ser la temperatura y la humedad, afectando las distintas especies vegetales, influyendo sobre la fisonomía, la composición florística y la riqueza de especies, entre otros aspectos.

#### 4.4. Índices

Un índice es un escalar, un vector, una matriz de números o una proporción que indica características o propiedades específicas de interés [69]. El monitoreo del riesgo de un determinado fenómeno puede ser realizado mediante herramientas como los índices. Los índices de riesgo predicen la probabilidad de que ocurra el evento cuyo riesgo se trata de estimar, y de esta forma ofrecen una alerta temprana para poder tomar acciones oportunas. Al tratarse de una medida, permite comparar los cambios relativos en el tiempo y/o en el espacio.

En el caso de los incendios forestales, la elaboración de índices de riesgo ha demostrado ser una línea de trabajo fructífera para el monitoreo y la prevención de los incendios. Un índice de riesgo de incendio forestal es un instrumento de predicción que cuantifica el riesgo de incendio a partir de un conjunto de factores (permanentes y variables) que condicionan el inicio y propagación del fuego. Las condiciones climatológicas figuran entre los factores permanentes que permiten una caracterización general del área. Son los factores variables los que, medidos o estimados periódicamente, proporcionan la oscilación del índice a corto plazo. En las primeras investigaciones de carácter preventivo, se observó que el comportamiento del fuego estaba influido por los fuertes cambios que a lo largo del día experimenta el contenido de humedad de los combustibles muertos existentes sobre el suelo. Las variaciones del contenido de humedad del combustible y su inflamabilidad provienen fundamentalmente de una compleja interrelación entre las diferentes variables meteorológicas y los distintos tipos de combustibles. La radiación solar, precipitación, temperatura del aire y humedad atmosférica afectan principalmente al contenido de humedad del combustible y por tanto son relevantes en el inicio de un incendio. Una vez iniciado el incendio, otras

variables, como la velocidad y dirección del viento o la estabilidad atmosférica ofrecen una notable influencia en la propagación del fuego [3].

La lucha contra los incendios forestales es un trabajo complejo que requiere de diferentes instrumentos y procedimientos. Entre las herramientas más comunes de la fase de prevención se encuentran los índices de riesgo de incendio. Estos índices tratan de predecir la probabilidad de ocurrencia de los fuegos con un margen de error aceptable, por lo que suelen estar basados en inferencias estadísticas [48].

La finalidad de los índices de riesgos de incendios es predecir cuándo, dónde y cómo es más probable que se desarrolle un incendio forestal. Las respuestas a estas preguntas permiten identificar las épocas y zonas de mayor riesgo, lo que constituye un insumo para la gestión de un sistema de defensa [42].

El riesgo de incendios comprende dos componentes: la ignición y la propagación. En la ignición se consideran aquellos factores que tienen que ver con el origen del incendio, y en la propagación se consideran los elementos que afectan la dispersión del fuego una vez iniciado el mismo [24].

Un buen sistema de prevención de incendios debería de contar con índices de riesgo que consideren de alguna manera los siguientes componentes; tipo, cantidad y contenido de humedad del combustible, naturaleza e incidencia de los agentes causantes de los incendios, facilidad de ignición, posibilidad de propagación y dificultad de extinción derivadas de los factores tanto estructurales como dinámicos que intervienen en los incendios, factores físicos como la topografía y factores meteorológicos. También podrían incorporar el daño potencial del evento en el caso que se produjera. En la actualidad, los sistemas operativos de prevención de incendios difícilmente incorporen este último aspecto [2].

Como se mencionó en la Sección 1, los índices disponibles en la actualidad varían mucho en función de las variables que consideran. Existe gran variedad de índices meteorológicos basados en distintos enfoques y con diferentes niveles de complejidad en sus formulaciones [2]. Los más sencillos utilizan diferentes variables meteorológicas para estimar la probabilidad de ignición de un incendio, mientras que en los más complejos se combinan un gran número de factores a partir de modelos teóricos y/o empíricos para conseguir índices de ignición y propagación [3].

Los sistemas más complejos son desarrollados no sólo en aquellos países que se ven más afectados por el fenómeno de los incendios forestales, sino que cuentan con recursos humanos y económicos que les permiten dedicar recursos a la investigación y el desarrollo de estos productos. Estos sistemas en general trabajan en el desarrollo de modelos de comportamiento del fuego, experimentos desarrollados en laboratorios o en campo que requieren de inversiones económicas altas. Del relevamiento también surge que ha habido un progreso en el tiempo en el desarrollo de estas herramientas desde el primer diseño, por un lado tratando de mejorar y ampliar las capacidades de los sistemas ya implementados y por otro buscando adaptar esos sistemas en distintos países, en muchos casos poniendo el foco en resolver el problema de la pérdida de extensas superficies boscosas y la modificación de innumerables procesos naturales [17].

#### 4.5. Rol de las geotecnologías en la gestión del riesgo

El riesgo se puede entender de varias maneras, y existen en la literatura al menos dos definiciones muy utilizadas y que no son excluyentes sino complementarias. Una de estas definiciones se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\text{riesgo} = \text{probabilidad} \times \text{impacto} \quad (1)$$

Con esta acepción del riesgo, usualmente utilizada en análisis cuantitativos, queda claro que se debe poner énfasis tanto en la probabilidad de ocurrencia de un evento como en el impacto que el evento tendría de producirse. La probabilidad puede ser más fácil o más difícil de calcular (sobre todo si se tiene en cuenta el factor humano como agente principal del inicio de los incendios) pero tiene la bondad de ser una medida objetiva; mientras que el impacto puede ser objetivo o valorativo según el caso. Si estuviéramos considerando, por ejemplo, el riesgo del desperfecto total de una máquina en una línea de producción, el impacto podría medirse como el costo de reposición de la máquina sumado al costo derivado de la detención de la producción hasta la reposición. Aún en este caso podría haber complicaciones como el impacto de no poder cumplir con determinados contratos o el prestigio de la empresa, pero todas esas variables podrían traducirse en términos económicos, lo que facilita el análisis.

En cambio, en el caso de un incendio forestal hay un par de dificultades para lograr un cálculo sencillo del impacto. En primer lugar, aunque pudiéramos saber con cierta exactitud cuál es la probabilidad de ocurrencia de un incendio en alguna zona, podría ser muy difícil predecir cómo evolucionará el incendio una vez iniciado, si podrá ser controlado por los bomberos o cuánto tiempo pasará hasta su extinción, y por dónde se propagará, todo lo cual sin dudas incidirá en el impacto. En segundo lugar, puede haber consideraciones valorativas sobre el peso relativo de diferentes tipos de impacto: impacto económico por pérdida de bienes muebles e inmuebles, impacto ambiental, o impacto por pérdida de vidas humanas y lesiones. Pueden existir diferencias valorativas y esto imposibilita llegar a un acuerdo general sobre una medida del impacto. Todas estas dificultades pueden tentar a desentenderse del impacto y enfocarse en la probabilidad de ocurrencia del inicio de un incendio, lo que de suceder implicaría que formalmente no se está prediciendo una medida de riesgo ya que no puede asumirse que el impacto será una constante. Vale aclarar en este punto que la probabilidad de ocurrencia del inicio de un incendio, por sí misma, puede ser una medida de relevancia en algunos casos; si bien esto no afecta la validez general de la afirmación anterior. Pensemos por ejemplo en un producto diseñado para el monitoreo y respuesta por parte de los bomberos; sin importar el pronóstico del impacto (asumiendo que pudiera calcularse) ellos deberán responder ante la constatación del inicio de un incendio, con lo cual las previsiones que deberían realizar podrían basarse únicamente en la probabilidad.

La otra de las definiciones de riesgo se puede expresar como:

$$\text{riesgo} = \text{amenaza} \times \text{vulnerabilidad} \quad (2)$$

Con esta segunda acepción, usualmente utilizada en análisis cualitativos y en casos donde el impacto es conocido a priori, el foco del análisis cambia. Para que ocurra un riesgo debe existir por un lado una vulnerabilidad interna, inherente al sistema. En el caso del incendio forestal, la vulnerabilidad estará dada por la facilidad con que el fuego podría extenderse, y es claro que de no existir vulnerabilidad (como en el caso de estar transitando un período de lluvias copiosas) no habrá riesgo de incendio. El otro factor que incide en el riesgo en esta acepción es la amenaza, que es algo externo al sistema. En el caso del incendio forestal, la amenaza estará dada por la probabilidad de que un agente externo (sea natural como un rayo, o humano) inicie un fuego que se desarrolle como un incendio. Siendo que la mayor parte de los incendios son iniciados por el hombre, es razonable suponer que la amenaza varía de forma directa (no necesariamente lineal) con la presión demográfica. Como vimos antes, esta amenaza que es fundamentalmente humana, tiene las dificultades de predicción de todo lo que debe considerar la indeterminación de lo humano.

Cabe la pregunta, en este caso, de cuál definición de riesgo utilizar. Al no ser excluyentes, podrían incluso combinarse para lograr un abordaje más completo. Una observación interesante es que la ecuación 2, que no considera el impacto (o lo considera conocido a priori y fijo, o sea constante) podría ser considerada también como una medida de la probabilidad de ocurrencia. De esta forma, podría pensarse en sustituir la probabilidad de la ecuación 1, por el lado derecho de la ecuación 2, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\text{riesgo} = \text{vulnerabilidad} \times \text{amenaza} \times \text{impacto} \quad (3)$$

De esta forma logramos separar la probabilidad como producto de la vulnerabilidad (interna, intrínseca) por la amenaza (externa y fundamentalmente humana) lo que constituye una mejora importante respecto de la ecuación 1; y a la vez logramos considerar el impacto, que no estaba considerado en la ecuación 2. El orden de los factores en la ecuación 3 es irrelevante, pero fueron ordenados a propósito de menor a mayor dificultad de cálculo, por el peso de los componentes humanos. Por supuesto, es discutible si será más difícil de calcular la amenaza que el impacto, pero lo que se trata de evidenciar es que el cálculo del impacto no puede tener una fórmula de consenso, ya que algunos considerarán mayor cualquier impacto ambiental a cualquier impacto sobre los bienes y otros no, y éstas diferencias valorativas simplemente imposibilitan el consenso.

Por otra parte, las tecnologías de la información han revolucionado la forma de gestión del riesgo y la capacidad de respuesta y prevención frente a las diversas amenazas. Por ejemplo, los eventos de incendios forestales pueden ser analizados desde diversas perspectivas del conocimiento, pero en sí mismos se tratan de fenómenos geográficos ya que su aparición y desarrollo queda fundamentalmente determinado por factores territoriales y sus efectos tienen incidencia sobre el paisaje [32].

Una de las herramientas que más ha incrementado su uso es la Tecnología de la Información Geográfica (TIG). Se entiende como TIG *“todas aquellas disciplinas que permiten generar, procesar o representar información geográfica*

*entendiendo por información geográfica cualquier variable que está, o es susceptible de estar, geo-referenciada en el espacio mediante coordenadas  $x,y,z$ " [23].*

Esta definición incluye a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de Teledetección, herramientas que posibilitan obtener información espacial, realizar análisis y desarrollar aplicaciones para la gestión sobre el territorio.

La *información geográfica* es imprescindible en la toma de decisiones, ya sea para elaborar políticas territoriales y ambientales a escala local, como regional o global. El dato, producto de una observación, es el hecho bruto y la *información geográfica* se define por un contenido más elaborado que tiende a reducir nuestra incertidumbre sobre el mundo que nos rodea. Los datos geográficos se caracterizan por la posición, los atributos temáticos, el tiempo, las relaciones espaciales y la dimensión. Sólo constituyen lo que se llama *información geográfica* cuando se almacenan sistemáticamente y son consultables o explotables. Por otra parte, el dato es uno de los componentes esenciales de un SIG. En ellos, esta *información geográfica* se puede representar en forma de mapa con un sistema de coordenadas para georreferenciarla [11].

En este contexto de nuevas tecnologías para el manejo de información geográfica es posible elaborar los mapas de riesgo, entendiendo a estos últimos como aquellas herramientas que pretenden identificar las actividades o procesos sujetos a riesgo, cuantificar la probabilidad de estos eventos y medir el daño potencial asociado a su ocurrencia.

La aproximación geográfica puede abordarse, de una manera básica, definiendo el contexto en el que el desastre se materializa o se podría materializar. La cartografía de los riesgos está tratando de avanzar más allá, contribuyendo a establecer una zonificación de los niveles de riesgo a partir de la combinación de mapas de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Ahora bien, un estudio geográfico que se detenga exclusivamente en las dimensiones espaciales del riesgo corre el peligro de obviar su dimensión temporal [51].

## 5. Trabajo relacionado

Si bien es cierto que los incendios forestales datan de hace millones de años [58] las herramientas con el objetivo de monitorearlos y evaluar la probabilidad de ignición y de propagación del fuego, así como los daños potenciales que puedan causar no son tan antiguas, y datan de principios del siglo XX.

A los efectos de conocer el estado del arte en la materia y analizar la aplicabilidad y/o adaptabilidad de una de estas herramientas para la evaluación del riesgo de los incendios forestales en Uruguay, se realizó una revisión bibliográfica de las herramientas usadas en distintos países a lo largo de la historia, haciendo especial énfasis en trabajos que estuvieran relacionados a la construcción de índices y mapeo asociado.

De los primeros trabajos que se encuentran sobre la medida del riesgo de los incendios forestales son los de Gisborne de 1928 [34] y 1936 [35]. En ellos se refiere que lo que probablemente representa el esfuerzo pionero en los estudios de incendios forestales en Estados Unidos, fue el realizado por la Oficina de Silvicultura (Bureau of Forestry) descrito en un informe de 1901. Gisborne definió una escala de peligro de incendio basado en componentes como la estación del año, la humedad del material combustible de mayor grosor, la humedad relativa (tomada como una medida de la inflamabilidad de los materiales combustibles más finos) y la velocidad del viento. Integró estas variables en un medidor del peligro semejante a una regla de cálculo que, por vez primera, permitió a un funcionario jefe de vigilantes contra incendios forestales, obtener un índice numérico del peligro de fuego. En principio este invento estuvo pensado para aplicarse en la estación experimental de bosques y praderas en la zona norte de las montañas Rocallosas. Pero el invento demostró ser tan útil, que se replicó su uso en otras estaciones experimentales, adaptado a sus peculiaridades regionales. La propuesta definía siete clases de peligro de incendio para facilitar a los oficiales forestales evaluar el peligro de incendio en un escala numérica, con el propósito de evitar la subjetividad y estandarizar las evaluaciones. Esta estandarización era necesaria para justificar el desvío de recursos de una estación a otra, lo que no podía estar basado en evaluaciones subjetivas. La escala de siete clases puede verse en la Figura 5, donde se reproduce una sección del folleto preparado a mano que utilizaban los oficiales forestales para la evaluación del peligro.

- USUAL ORGANIZATION ACCORDING  
TO CLASS OF FIRE DANGER**
- CLASS      FOR REGION J OF THE U.S.F.S.**
- 1** *No men specially detailed to fire control.*
  - 2** *Men positions covering special dangers such as dangerous slash or brush disposal operations. Plan key lookouts following lightning storms in June.*
  - 3** *Men key detection positions. Commence placing minimum protective organization.*
  - 4** *Probability of continuance warrants placing the average season protective organization.*
  - 5** *After one day finish placing full "average" organization. After two consecutive days commence filling "first overload" positions. After about 7 consecutive days complete first overload.*
  - 6** *After one day complete first overload. After two consecutive days commence filling second overload. After about 4 consecutive days complete second overload.*
  - 7** *Upon occurrence of class 7 danger or if it is predictable with certainty, mobilize supplemental overloads and take other action specified by the Third Emergency Call in the Overload Plan.*  
  
*After Aug. 30 reduce the organization to "average" as soon as possible following one day of class 3 or lower danger.*

Figura 5: Sección del folleto «Forest fire danger meter» de Gisborne, de 1936

Cada una de las clases de la Figura 5 determina qué medidas específicas se deben de llevar a cabo para prevenir y suprimir incendios. La clase 1 en esta escala significa un peligro de incendio tan leve que no es necesario que ningún hombre sea especialmente designado para el control de incendios, mientras que la clase 7 prescribe la utilización de todos los recursos posibles [35].

Después de estos trabajos pioneros, se realizaron esfuerzos en varios países del mundo. Esta información se sistematizó en el Cuadro 4, donde pueden verse con detalle los requerimientos de cada uno de los índices desarrollados. Esta revisión no pretende ser un inventario exhaustivo, no figuran en la misma las herramientas que fueron modificadas y republicadas incluso con un nuevo nombre o con un distintivo de una adaptación de la original. Por ejemplo, existe una mejora del índice Fórmula Monte Alegre (FMA) denominada FMA+. Sin embargo, es un inventario representativo de la diversidad existente en materia de índices de riesgo de incendio forestal.

Requerimientos														
Nombre	P	I	T	Pr	HR	V	N	TC	VC	CS	PT	FI	R	RS
Munger		•		•										
Angstrom		•	•		•									
Nesterov		•	•	•	•									
NFDRS	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
Mc Arthur	•	•	•	•	•									
Baumgartner		•	•	•	•									•
KBDI		•	•	•										
M68		•	•	•				•						
Telicyn		•	•	•	•									
CFDRS	•	•	•	•	•	•		•	•	•				
FMA		•		•	•									
Francés		•	•	•		•								
Fosberg		•	•		•									
IREPI		•	•	•	•									•
R-M		•	•	•	•	•								
Portugués		•	•	•	•	•								
Risco do Fogo		•	•	•	•						•	•	•	
Haines*		•												
Asturias		•	•	•	•	•					•	•		
Chile		•	•	•	•	•		•				•		
Carrega		•	•	•	•	•		•						
Numeral Risk	•	•	•	•	•	•	•							
Español		•	•	•	•								•	

Cuadro 4: Tabla de índices y sus requerimientos. Elaboración propia

Referencias:

P: *Propagación*, I: *Ignición*, T: *Temperatura*, Pr: *Precipitación*, HR: *Humedad Relativa*, V: *Viento*, N: *Nubosidad*, TC: *Tipo de Combustible y/o Fase Fenológica*, VC: *Volumen de Combustible*, CS: *Componente Social*, PT: *Pronóstico del Tiempo*, F: *Focos de Incendios*, RS: *Radiación Solar*

\*: condiciones de la atmósfera en altura.

Como se puede observar en el Cuadro 4, existen variedad de métodos para estimar el peligro de incendio y éstos tienen diversos requerimientos en cuanto a la cantidad y tipo de variables de entrada, métodos de integración, escalas temporal y espacial y objetivo o propósito perseguido. En algunos casos sólo se pretende determinar la posibilidad de ignición, mientras que en otros casos se pretende ir un poco más allá y definir cómo se puede llegar a propagar el incendio. Existen herramientas simples que se centran sólo en el comportamiento de unas pocas variables, por ejemplo los índices de sequías que evalúan la disponibilidad de agua almacenada en el suelo, y que en algunos casos se utilizan para complementar a los sistemas de índices más complejos. Estos índices simples en general toman en cuenta el efecto de la temperatura, humedad relativa y precipitación, y de esa forma dan una probabilidad de ignición. Un ejemplo de ellos es

el índice KBDI (ver Subsección 6.7). Por otra parte, existen también herramientas más complejas que incorporan relaciones entre variables meteorológicas, el estado de los combustibles y el comportamiento del fuego para producir indicadores que presenten cuantitativamente las dificultades de control y de impacto potencial del fuego, por ejemplo el sistema canadiense (ver Subsección 6.10) y el estadounidense (ver Subsección 6.4). Estos índices analizan las probabilidades de ignición y de propagación y más allá de algunas diferencias puntuales en los cálculos entre estos dos ejemplos, como puede ser el caso de que el sistema estadounidense se base en varios modelos de combustibles forestales mientras que el canadiense lo haga con un modelo estándar, el propósito en ambos es cuantificar el estado hídrico del combustible y la probabilidad de ignición. El sistema canadiense, para determinar la propagación toma en consideración el viento y la humedad de los combustibles finos; mientras que el estadounidense considera además de esto la humedad de otros combustibles de distinto grosor e incluye la pendiente como factor importante. Estas herramientas en algunos casos están basadas sólo en desarrollos teóricos y en otros en la integración del desarrollo teórico y la experimentación empírica (en laboratorios o en el campo). El sistema de peligro estadounidense tiene una fuerte fundamentación matemática y física en la determinación de la humedad de los combustibles, y parámetros obtenidos mediante estudios en laboratorio; mientras que el sistema canadiense si bien está fuertemente basado en fundamentos físicos, los índices se construyeron empíricamente a partir de análisis de numerosos datos de campo.

Las variables meteorológicas como viento, precipitación, temperatura y humedad relativa son factores determinantes en la ocurrencia de un incendio, por lo que están presentes en todas estas herramientas. La ponderación y la relación entre ellas y/o con otros factores que inciden en la ocurrencia y propagación de un incendio es lo que varía entre las mismas.

El objetivo explícito o implícito de estas herramientas es poder obtener un valor cuantitativo para la humedad del combustible, y especialmente del combustible fino, ya que es el factor más determinante en la probabilidad de inicio de un incendio. La mayoría de los índices descritos poseen un factor acumulativo, esto significa que se necesita conocer las condiciones pasadas para determinar las condiciones presentes. Los índices basados en la sequía en general consideran la reserva del agua en el suelo y calculan la evapotranspiración, por lo que los cambios en el corto plazo están más suavizados dentro del cálculo.

Los orígenes de los índices de riesgo de incendios datan del comienzo del siglo XX, y desde entonces se han ido modificando y mejorando progresivamente. Los estudios pioneros en el campo de los sistemas de riesgo de incendios se desarrollaron en Estados Unidos y Canadá. En el caso de Estados Unidos, el desarrollo estuvo orientado a la conformación de un Sistema de Peligro de Incendios y esto llevó a que progresivamente se fueran desarrollando índices distintos que luego serían combinados y/o integrados en el sistema. En general, el surgimiento de estas herramientas fue la respuesta a la motivación por resolver el problema de los incendios, que no sólo tiene grandes costos económicos sino también ambientales y humanos. La recurrencia de estos eventos convierte al problema en persistente, y por ello se justifica la inversión de recursos en investigar y desa-

rollar herramientas, así como en ponerlas a prueba y perfeccionarlas de forma permanente. Por ejemplo, el gran incendio ocurrido en Victoria (Australia) el 13 de enero de 1939, denominado *viernes negro*, de gran magnitud espacial y que no sólo afectó a los bosques sino que también tuvo consecuencias fatales sobre vidas humanas, marcó un punto de inflexión en el abordaje de los incendios en Australia. De un incendio es importante saber cuándo, dónde y cómo se va a desencadenar, motivo por el cual es importante incrementar la efectividad de la herramienta que lo monitorea, y esas preguntas se intentan responder a través de índices o sistemas de índices.

En esta revisión, el índice más antiguo que se describe es el índice Munger (ver Subsección 6.1) del año 1916, desarrollado e implementado para Estados Unidos, un índice simple de naturaleza meteorológica y fácil de calcular. Se usó, según el autor, con el propósito de obtener una medida objetiva del riesgo de incendio forestal comparativo de un año a otro y de una región a otra, después de determinar que la frecuencia de las lluvias torrenciales era el factor con mayor influencia en el peligro de incendio del noroeste sobre el Pacífico. También sirvió como base para otras herramientas y si bien es cierto que no fue muy utilizado en el abordaje de la problemática de los incendios forestales a futuro, sí se usó como monitoreo de las sequías. Los índices Angstrom (ver Subsección 6.2), Nesterov (ver Subsección 6.3), Baumgartner (ver Subsección 6.6), Telicyn (ver Subsección 6.9), M-68 (ver Subsección 6.8) y KBDI (ver Subsección 6.7) también son índices de cálculo sencillo y tienen como requisitos solamente variables meteorológicas. No por esta razón dejan de ser importantes herramientas en la temática de los incendios forestales, ya que ellos en algunos puntos del planeta aún son utilizados en algunos casos con su modelo original y en otros con adaptaciones a las realidades del lugar donde se implementan. Por ejemplo, el índice Nesterov es uno de los índices más usados en su modelo original y/o con modificaciones a escala mundial y con vigencia actualmente. Algunos de estos siguen siendo la fuente de inspiración para el abordaje de nuevos índices o de modificaciones sobre el mismo. Índices como Nesterov, M-68 y Baumgartner están basados en métodos empíricos, en la evaluación de un gran número de incendios forestales y variables meteorológicas y fenológicas. El índice Baumgartner, desarrollado en Alemania en 1967, de naturaleza meteorológica y con el objetivo de determinar sequías, se calcula a finales del invierno y comienzo de la primavera, después del deshielo y sin consideraciones iniciales puntuales, pero no se calcula para los meses de invierno. El índice Baumgartner se ha implementado fundamentalmente en Alemania pero actualmente está en desuso. El KBDI está integrado al sistema de peligro estadounidense, pero también se sigue utilizando principalmente como guía para estimar la deficiencia de humedad acumulada en distintas capas del suelo, además de utilizarse ampliamente en investigaciones sobre incendios.

Índices como el Fosberg (ver Subsección 6.13) que también está integrado al sistema de peligro de incendios de Estados Unidos, pero que no ha sido de uso exclusivo de esa parte del mundo, es una herramienta relativamente sencilla para la evaluación de los incendios forestales mediante el análisis de variables meteorológicas. Este índice ha tenido modificaciones sobre todo en lo

que respecta a la incorporación de las precipitaciones, es muy sensible a las variaciones de humedad de los combustibles finos y por lo tanto se usa como un buen complemento en la integración de índices de los sistemas de peligro de incendios.

Los índices relevados han sido desarrollados e implementados fundamentalmente en Estados Unidos, Canadá y el norte de Europa, pero también es cierto que se usaron y se usan en otras partes de mundo en algunos casos mediante algunos ajustes a las nuevas realidades.

En las décadas de 1970 y 1980 comienzan a desarrollarse índice específicos en algunos países de Europa. En Francia se desarrolló el índice de Orioux (ver Subsección 6.12) en 1974, basado en el efecto de la sequía de la vegetación arbustiva viva y el viento. Después se desarrollaron otros índices basados en la evapotranspiración como fue el de Carrega (ver Subsección 6.19) en el año 1987, con el propósito de ser aplicable a la región sur de Francia. En Italia en el año 1984 se desarrolla el índice denominado de Reducción de la Evapotranspiración para el Peligro de Incendio (ver Subsección 6.14), también basado en la evapotranspiración y diseñado para implementarse en la región de los Alpes, ya que el régimen de los incendios en esa región es distinta al mediterráneo. Por otra parte en Portugal en 1988 se desarrolla un índice (ver Subsección 6.17) inspirado en el Nesterov con la diferencia de que es corregido con la velocidad el viento. En España en 1987 se comienza a utilizar un índice meteorológico de ignición (ver Subsección 6.15) derivado del sistema estadounidense, que sólo tomaba en consideración el estado hídrico de los combustibles finos muertos, por lo cual se propone considerar también el estado de la vegetación viva a través de la incorporación de los modelos de combustibles y así poder predecir la propagación. Esta tarea la llevó a cabo el entonces Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) y este trabajo terminó derivando en lo que se denominó el Grado Actual de Peligro de Incendios Español.

En América Latina también ha habido desarrollos de índices nuevos y de adaptaciones a los ya conocidos. En 1972 en Brasil y pensado para la región del sudeste de ese país se desarrolló el índice conocido como Fórmula Monte Alegre (FMA, ver Subsección 6.11), este índice también fue aplicado a otras partes del mundo por ejemplo en Cuba. Se lo siguió estudiando y derivó en algunas modificaciones que dieron surgimiento al índice Fórmula Monte Alegre Alterada (FMA+). Por otra parte, para la región de la Patagonia en Argentina, se diseñó en el año 1988 el índice denominado Rodríguez-Moretti (ver Subsección 6.16) en alusión a los investigadores que lo crearon. En Chile en el año 1990 se desarrolló un índice propio para el país (ver Subsección 6.20) que básicamente determina el contenido de humedad del combustible fino muerto. Dispone de dos indicadores: uno que determina el nivel de peligrosidad de incendios por medio del contenido de humedad de la vegetación fina y muerta, y el otro que determina la probabilidad de ignición. Este último es un indicador para las horas más críticas de la tarde, y es calculado a partir de la radiación solar de la tarde, la temperatura y la humedad del combustible fino muerto. En Brasil en 1998 comienza a desarrollarse el índice Risco do Fogo (ver Subsección 6.23) al que progresivamente se le han realizado mejoras. Este índice está enmarcado dentro

del *Sistema de quemadas* de Brasil, donde se integra también otra información relativa a los incendios como la presencia de focos activos, las áreas quemadas, datos de concentración de contaminantes emitidas por los incendios, entre otras.

A medida que avanza el tiempo avanza también la complejidad y la riqueza de los sistemas que se desarrollan para predecir y monitorear los incendios. Este avance va de la mano con el avance en el desarrollo y disponibilidad de las geotecnologías, así como también de la toma de conciencia del impacto negativo que los incendios pueden generar en las vidas y formas de vida humanas y en los distintos ecosistemas, cuando la frecuencia e intensidad de los mismos supera ciertos umbrales de tolerancia. En estos últimos años, incluso se está abordando la problemática de los incendios ya no a nivel de los estados individuales sino en bloques geográficos. Por ejemplo, en Europa, debido al fuerte impacto de los incendios forestales en los países del mediterráneo, se conformó en 1997 un grupo de investigación dentro del Joint Research Centre (Centro Común de Investigación de la Unión Europea) con el objetivo de trabajar en el desarrollo y la mejora de los métodos de cálculo para la evaluación del riesgo de incendio forestal a escala europea [42]. Actualmente dentro del programa *Copérnico*<sup>1</sup> está disponible el sistema de información europeo (EFFIS) sobre incendios forestales que brinda información histórica sobre regímenes de incendios forestales en Europa, Oriente Medio y África del Norte. La vigilancia de los incendios abarca la totalidad del ciclo de un incendio, proporciona información sobre las condiciones previas y evalúa los daños posteriores, y está disponible para consultar mediante un Sistema de Información Geográfico en su sitio web.

De la revisión bibliográfica, también se pudo observar que en los últimos años, algunos países que no tienen herramientas concretas han desarrollado planes de manejo del fuego, orientados a determinar qué actividades se pueden desarrollar en los ámbitos de prevención, extinción y restauración post-incendio, guías de buenas prácticas, legislación orientada a la prevención y en algunos casos al ordenamiento territorial. Varios países han creado dependencias orientadas al manejo del riesgo, incluyendo aunque no restringiendo su alcance a los incendios forestales, lo que evidencia que existe una preocupación generalizada respecto al tema.

Actualmente, algunos investigadores están trabajando en el diseño de índices mixtos, que combinan variables meteorológicas con imágenes de satélite, e incluso están utilizando las imágenes satelitales como insumo para interpolar los valores de las variables meteorológicas [22].

---

<sup>1</sup>Programa dirigido en forma conjunta con la Agencia Espacial Europea y la Agencia Europea de Medio Ambiente, a través del siguiente link se accede al mismo: [https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis\\_current\\_situation/](https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis_current_situation/)

## 6. Ejemplos de índices de riesgo de incendios

A continuación se describen brevemente cada uno de los índices obtenidos de la revisión bibliográfica, presentados en el Cuadro 4. Esta presentación sigue un orden cronológico, en función de cuándo fue desarrollado cada índice. La excepción es el índice *Risco do Fogo*, que se presenta al final ya que se trata con mayor nivel de detalle.

### 6.1. Índice *Munger*

En 1916, en Oregon, Estados Unidos, se desarrolló el índice de riesgo de incendios denominado *Munger*, en honor al apellido del investigador principal. Se trata de un índice de naturaleza simple, que sólo requiere precipitaciones como datos de entrada. Al considerarse que existen múltiples factores meteorológicos que influyen en el peligro de incendio como ser viento, precipitación o humedad del aire, y que la consideración de tantas variables de entrada generaba una complejidad significativa, se decidió considerar únicamente el factor más relevante en la región de interés, esto es, una cuantificación de los períodos de sequía. Se propuso un índice de sequía simple basado en la duración de los períodos sin lluvia, asumiendo que la relación entre la duración de la sequía y la intensidad de la sequía no era lineal.

El índice de *Munger* se restablece a cero cuando la precipitación diaria excede 0.05 pulgadas (aproximadamente 1.27 mm) y es particularmente apropiado para medir sequías a corto plazo. Se podría considerar que es un índice adecuado para capturar la humedad fina del combustible y, por lo tanto, predecir la ignición, pero no para predecir la propagación del fuego. Su cálculo está pensado para realizarse de forma diaria, se requieren condiciones húmedas para iniciar el cálculo del índice, precipitación diaria mayor a 0.05 pulgadas. En el día anterior al inicio del cálculo el valor inicial debe establecerse en 0. En resumen, se trata de un método gráfico para representar y comparar las intensidades de las sequías[50].

Su fórmula es la siguiente:

$$\text{Munger} = \frac{1}{2} \times w^2$$

siendo:

w = número de días desde la última lluvia diaria superior a 0,05 pulgadas

Cuadro 5: Fórmula Índice *Munger*

### 6.2. Índice *Angström*

En 1942 se desarrolló e implementó el índice denominado *Angström*, también en honor del investigador a cargo. Si bien en un comienzo se diseñó para su implementación en los países nórdicos como Suecia, Noruega y Finlandia, entre los años 1960 y 1987 se implementó en Portugal. Utiliza sólo la temperatura del aire y la humedad relativa en su cálculo, y proporciona una indicación del

número probable de incendios en un día determinado. El índice de Angström podría ser un buen indicador cuando hay cambios rápidos en las situaciones meteorológicas, que aumentan la situación de peligro de incendio tan rápidamente que los modelos de humedad del suelo no pueden registrar a tiempo [45].

Se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{R}{20} + \frac{27-T}{10}$$

siendo:

I = índice Angstrom

R = Humedad Relativa

T = Temperatura del aire

Cuadro 6: Fórmula Índice Angstrom

### 6.3. Índice *Nesterov*

El índice de ignición Nesterov se desarrolló en la ex Unión Soviética en 1949 por el científico V. G. Nesterov. Este ha sido uno de los índices más utilizados en todo el mundo, entre otros aspectos por su simplicidad en el cálculo. Es un índice de clasificación de peligro de incendio diario, simple, que tiene como requerimientos de entrada datos de temperatura diaria del aire, temperatura del punto de rocío y precipitación.

El índice es acumulativo y se vuelve cero cuando la precipitación diaria supera los 3 mm, utiliza la precipitación como variable de restricción, esto implica que el índice determinado por la fórmula se suma diariamente hasta que ocurra una lluvia. La cantidad de precipitación entonces determina las modificaciones a efectuar en los valores del índice. La sequedad del combustible se estima asumiendo que la velocidad de secado está relacionada con la saturación del vapor y, por lo tanto, tiene en cuenta la temperatura del punto de rocío. Es particularmente apropiado para capturar la humedad fina del combustible y para predecir la ignición del fuego, pero no es apropiado para predecir el comportamiento o la propagación del fuego. Los datos meteorológicos utilizados para su cálculo deben registrarse a las 15 horas, se requieren condiciones húmedas (precipitación diaria mayor a 1 mm) el día anterior al inicio del cálculo del índice. El valor inicial del índice debe establecerse en 0.

Es un índice de ignición que simplemente determina las condiciones propicias para desencadenar un incendio y es netamente meteorológico, ya que sólo toma en cuenta variables meteorológicas.

Su fórmula original es:

$$N = \sum (d.t)$$

siendo:

N = índice Nesterov

d = déficit de saturación

t = temperatura del aire (°C)

Cuadro 7: Fórmula Índice Nesterov

Su utilización está diseñada para iniciarse a comienzos de la primavera, en aquellas latitudes del planeta donde se desarrolló, a partir del día que la temperatura supera los 0°C. El índice aumenta diariamente siempre que la precipitación no exceda los 3 mm, en cuyo caso el índice desciende a 0 y el cálculo inicia nuevamente. Los valores de salida del índice Nesterov se pueden clasificar en cinco clases de peligro de incendio, que se muestran en el Cuadro 8.

Clase	Interpretación
1	No hay peligro
2	Peligro Bajo
3	Peligro Medio
4	Peligro Alto
5	Peligro Extremo

Cuadro 8: Niveles de Peligro

Originalmente los valores de estas clases de peligro se determinaron comparando la ocurrencia de incendios con los valores del índice durante un período de 10 años. Por ejemplo, el límite superior de la clase "sin peligro de incendio" (300) corresponde a los valores del índice durante el período de referencia por debajo del cual no se produjo ningún incendio. El límite superior de la clase de "peligro de incendio bajo" (1000) corresponde a los valores del índice por debajo de los cuales se produjeron el 25 % de todos los incendios, y el límite superior de la clase de "peligro de incendio medio" (4000) corresponde a los valores del índice por debajo de los cuales 65 % de todos los incendios ocurrieron. Y es por esto que el índice Nesterov se puede ajustar fácilmente para cualquier región cambiando los umbrales a partir de una prueba empírica durante un tiempo significativo [53].

Se han realizado muchas modificaciones y mejoras del índice Nesterov. Un tipo frecuente de modificación es el uso de otros datos de temperatura distintos de la temperatura a las 15:00 por razones de disponibilidad de datos o mejora del rendimiento del índice. En otras modificaciones se han incluido la velocidad del viento y los valores diarios de las precipitaciones, o se han tomado en cuenta la temperatura mínima y la humedad del suelo. Por otra parte Nesterov ha sido fuente de inspiración y base para la generación de otros índices como el Portugués (ver Subsección 6.17) o el M-68 (ver Subsección 6.8).

En Uruguay actualmente es el índice que tiene disponible el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), el cual se publica en el período que el Institu-

to entiende que existe una probabilidad significativa de ocurrencia de incendios forestales: desde el mes de diciembre hasta el mes de abril. El mapa que se muestra en la Figura 6 representa el índice Nesterov calculado para la fecha del 9 de enero de 2018. Para el cálculo INUMET utiliza datos de temperatura del aire, humedad relativa y precipitación de la red de estaciones convencionales disponibles que luego son interpoladas. En este caso las clases de riesgos son sólo 4 ya que la clase «sin riesgo» no es tomada en cuenta.

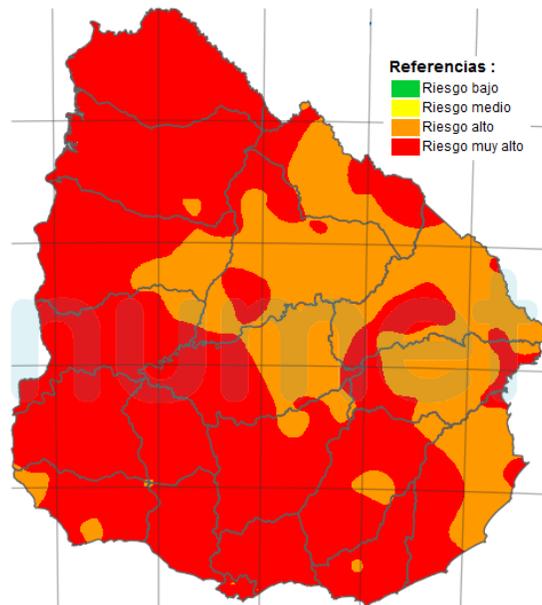


Figura 6: Ejemplo de salida del mapa Nesterov en Uruguay. Fuente: INUMET

#### 6.4. Índice *National Fire Danger Rating System (NFDRS)*

En la década de 1960 se desarrolla el Sistema de Peligro de Incendios de Estados Unidos, que comienza a estar operativo en la década de 1970. Evalúa la probabilidad de que se produzca un incendio forestal en un lugar y momento determinado. Si bien proporciona algunos aspectos de cómo se podría desarrollar el fuego no lo hace con precisión. El objetivo fundamental es poder proporcionar una guía para la planificación de las medidas de supresión y pre-supresión. El sistema está integrado por 4 índices que evalúan los distintos componentes del riesgo:

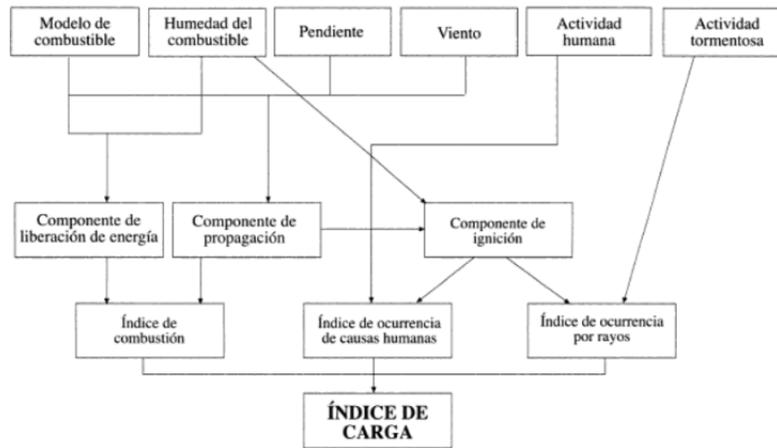
1. Índice de ocurrencia de incendios, combina el riesgo asociado a la actividad de tormenta y a la presencia humana
2. Índice de combustión, comportamiento del fuego en lo que respecta a la propagación y liberación de energía, integra el efecto del viento, la pendiente y las propiedades del combustible

3. Índice de carga de incendios, obtenido mediante la combinación de los anteriores. Valora las dificultades de control y extinción del fuego, ofreciendo una información global del peligro
4. Índice de severidad estacional, pronostica la carga total de trabajo requerida para el control de todos los incendios que ocurrirán en una temporada

En la década de 1980 este índice se actualiza y se incorpora el índice *Keetch Byram* (ver Subsección 6.7) con el propósito de cuantificar la sequía a largo plazo y poder modificar los modelos de humedad de los combustibles. El fundamento de este sistema es el modelo de comportamiento del fuego de Rothermel (ver Cuadro 3), un modelo matemático que se basa en los principios de la combustión y en datos proporcionados por el laboratorio del fuego. En la década de 1990 se incorporan imágenes satelitales para realizar un seguimiento del estado de la vegetación viva [27]. También tiene incorporado el índice *Haines* (ver subsección 6.18).

La filosofía del NFDRS es considerar siempre el peor escenario [23].

El Cuadro 9 presenta el esquema de dependencias entre las variables y los índices de este sistema de peligro (las flechas pueden leerse como «es una variable de»).



Cuadro 9: NFDRS: Sistema de Peligro de Incendio Forestal

### 6.5. Índice *MacArthur* - *Sistema Métrico Australiano*

En 1967, el científico A. G. McArthur desarrolla el primer sistema de evaluación de peligro de incendio forestal de Australia. Con el correr de los años este sistema fue modificado y adaptado de acuerdo a las fallas detectadas y a las nuevas necesidades. Inicialmente el sistema fue desarrollado para las pasturas de Nueva Gales del sur y bosques de eucaliptos. En la década de 1980 se detectaron deficiencias en el sistema MacArthur y una creciente tendencia a

incorporar modelos de comportamiento del fuego desarrollados en otros países, sin haber sido validados, ajustados y testeados para la realidad de Australia. Esto desencadenó que el Consejo Federal Australiano, mediante una conferencia celebrada en Canberra en 1988, estableciera acuerdos entre privados y públicos para la estandarización de la evaluación de peligro de incendios para el país.

Actualmente los índices utilizados se relacionan directamente con la probabilidad de ignición, la velocidad de propagación y las dificultades de supresión, desarrollados específicamente para determinados tipos de pastizales y bosques. El contenido de humedad de los combustibles se calcula para dos grupos: combustibles finos y combustibles pesados, y el contenido de humedad de los combustibles finos se evalúa a partir de datos de temperatura del aire y de humedad relativa. Para los combustibles pesados se utiliza el índice de Sequía de *Keetch-Byram* (ver Subsección 6.7).

Se trata de un sistema complejo que como resultado final presenta una categorización desde el 0 hasta el 100, definidas en 5 clases de peligro, mediante una serie de tablas de origen estadístico-empírico, se obtienen los índices y factores intermedios que darán lugar al índice de peligro final [29]. El valor máximo representa las peores condiciones que pueden darse en verano.

Su fórmula se define en el Cuadro 10.

$$FFDI = 2 \times e^{-0,45+0,987 \times \ln(DF) - 0,0345 \times H_{15} + 0,0338 \times T_{15} + 0,0234 \times U_{15}}$$

siendo:

$$\begin{aligned} FFDI &= \text{McArthur Forest Fire Danger Index} \\ H_{15} &= \text{Humedad relativa del aire (\%) a las 15:00} \\ T_{15} &= \text{Temperatura del aire (°C) a las 15:00} \\ U_{15} &= \text{Velocidad del viento (Km/h) a las 15:00} \\ DF &= \min \left[ 10, \frac{0,191 \times (KB DI_{SI} + 104) \times (W + 1)^{1,5}}{3,52 \times (W + 1)^{1,5} + P - 1} \right] \end{aligned}$$

Cuadro 10: Fórmula Índice MacArthur-Australia

En el Cuadro 10, DF es el factor de sequía (Drought Factor), un número entre 0 y 10 que representa la influencia de las temperaturas recientes y los eventos de lluvia en la disponibilidad de combustible [39].

Este índice se actualiza dos veces al día, una vez en la mañana y otra vez en la tarde, durante la temporada de incendios, y debe de ser utilizado de forma conjunta con los pronósticos meteorológicos <sup>2</sup>.

## 6.6. Índice *Baumgartner*

Sobre finales de la década de 1960, en Alemania se desarrollaron dos índices de riesgo de incendios forestales, fundamentalmente meteorológicos, con el objetivo de evaluar diariamente el riesgo de incendios.

Uno de ellos fue el índice de *Baumgartner* desarrollado y utilizado en la antigua Alemania Occidental por A. Baumgartner en 1967 <sup>3</sup>. Es un índice acu-

<sup>2</sup>Disponible en: <http://www.bom.gov.au/nsw/forecasts/fire-map.shtml>

<sup>3</sup>el otro es el M-68, desarrollado en Alemania Oriental y presentado en la Subsección 6.8

mulativo que toma como entrada la evapotranspiración y la precipitación de los últimos cinco días. Se parte de la base que el peligro de que se genere un incendio está condicionado básicamente por la sequedad de los combustibles, y ésta depende de la evapotranspiración. Los resultados se basan en el balance hídrico meteorológico, o dependiente de la temperatura del aire, la humedad relativa y la precipitación [10]. La ecuación del Cuadro 11 muestra su fórmula de cálculo.

$$I_{Bg} = \sum_{d-4}^d p - \sum_{d-4}^d etp$$

siendo:

$I_{Bg}$  = Índice Baumgartner  
 $p$  = Precipitación en mm  
 $etp$  = Evapotranspiración potencial  
 $d$  = Día de cálculo

Cuadro 11: Fórmula Índice Baumgartner

### 6.7. Índice *Keetch-Byram Drought Index*

En 1968, se desarrolló el índice de sequía denominado *Keetch-Byram Drought Index (KBDI)* en los Estados Unidos por J. J. Keetch y G. M. Byram. Se trata de un índice de naturaleza meteorológica, con el objetivo de medir la sequía y facilitar las operaciones de control de incendios. Es un índice acumulativo cuyos insumos fundamentales son la temperatura diaria, la precipitación diaria y anual como datos de entrada. Para la temperatura, se debe utilizar la temperatura máxima del aire o la temperatura de bulbo seco en el momento de la observación. Su objetivo es reflejar la sequedad y por lo tanto la inflamabilidad del material orgánico en el suelo, teniendo en cuenta los efectos de la lluvia y la evapotranspiración sobre la deficiencia de humedad en las capas profundas y superiores del suelo. Que sea acumulativo significa que es necesario comenzar el cálculo del índice cuando la capa superior del suelo está saturada de agua (después de un período de lluvias abundantes) y el primer valor de índice se establece en 0.

El *KBDI* se ha incluido en el Sistema Nacional de Clasificación de Peligros de Incendios de Estados Unidos (NFDRS). El rango de los valores de salida de *KBDI* se puede dividir en varias etapas, sin embargo, aunque estos valores tienen un significado definido en términos de deficiencia de humedad, el significado de una etapa particular para la actividad y el control del fuego debe determinarse localmente [47].

El Cuadro 12 presenta su fórmula de cálculo.

$$\text{KBBI}_t = Q + \frac{(800-Q) \times (0,968 \times e^{0,0486 \times T} - 8,30) \times \Delta_t}{1 + 10,88 \times e^{-0,0441 \times P}} \times 10^{-3}$$

siendo:

T = temperatura del aire (°C)

$\Delta_t$  = incremento del tiempo

P = precipitación media anual

Q =  $\text{KBBI}_{t-1} - P_{net_t} \times 100$

$$P_{net_t} = \max \left[ 0, P_t - \max \left( 0, P_{lim} - \sum_{i=1}^{rr-1} P_{t-i} \right) \right]$$

rr = número de días consecutivos con lluvias

Cuadro 12: Keetch-Byram Drought Index

## 6.8. Índice M-68

Este índice fue desarrollado por H. Kase en 1969 y se llamó *M-68*. Inspirado en el índice Nesterov y con el propósito de ser implementado en Alemania Oriental, el M-68 requiere un déficit diario de presión de vapor y temperatura del aire medidos a las 13:00 como datos de entrada. El índice es acumulativo y sus valores se suman diariamente desde el 15 de febrero hasta el 30 de setiembre. Se incluyen dos factores de corrección, uno que tiene en cuenta el estado de la vegetación y otro que tiene en cuenta la lluvia y la nieve. Estos factores se aplican en primavera, finales de verano y otoño. El cálculo del índice debe comenzar el 15 de febrero, o después del deshielo, y finalizar el 30 de setiembre o al final de la temporada de incendios. Si  $T \leq -9,9$  ° C, entonces el M-68 es igual a cero.

El valor se corrige diariamente por precipitación, capa de nieve y finalmente por condición de la vegetación. Para el cálculo del índice del día siguiente solo se utilizan los valores corregidos por la precipitación y la capa de nieve. El cálculo se realiza como se muestran en el Cuadro 13.

$$\sum_{15feb}^{30set} = (T13 + 10) \cdot \Delta e_{13}$$

T13 = Temperatura del Aire en °C

$\Delta e_{13}$  = Déficit de Presión de Vapor.

Cuadro 13: Índice M-68

Este índice se interpreta en 5 clases de peligro de incendio, que van desde el 0 con una probabilidad de ocurrencia de incendios menor al 3 %, hasta la clase 4 con una probabilidad de ocurrencia de incendio mayor o igual al 60 % [46].

## 6.9. Índice Telicyn

En 1970 fue desarrollado en la Unión Soviética el índice de riesgo de incendio denominado Telicyn en honor a G. P. Telicyn. Se trata de un índice logarítmico,

de naturaleza meteorológica, que evalúa la probabilidad de que se inicie un incendio de acuerdo a las variables meteorológicas. Tiene como requerimientos para su cálculo, la temperatura del aire, el punto de rocío y el número de días sin precipitaciones. Si hay una precipitación superior a 2,5 mm el índice se hace cero, y comienza una nueva sumatoria al día siguiente. En los días de lluvia, el índice es igual a cero [73].

El cálculo se realiza como se muestra en el Cuadro 14.

$$\sum_{n=1}^n \log (t-td)$$

siendo:

t: temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

td: punto de rocío ( $^{\circ}\text{C}$ )

n: número de días sin lluvia

Cuadro 14: Índice Telicyn

### 6.10. Índice *Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)*

En la década de 1970 se comenzó a desarrollar el denominado *Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)* producto de varias décadas de investigación sobre incendios forestales, y desde entonces ha sido modificado en varias instancias. Este desarrollo deriva de un proceso evolutivo que se origina en 1928 con J. G. Wright y es continuado durante las siguientes décadas por varios investigadores hasta el presente.

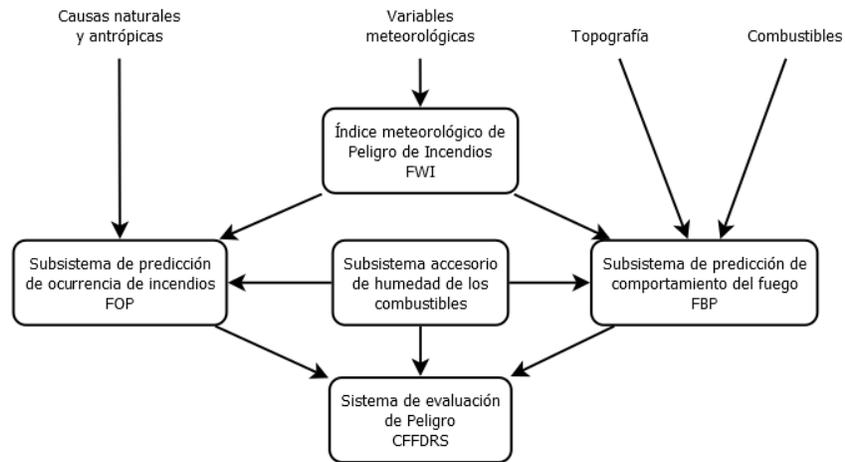
El proceso de evolución ha mantenido ciertas características de un sistema a otro, y también hubo una tendencia hacia la simplificación tanto en las mediciones meteorológicas requeridas como en el método de cálculo. El enfoque fue basar las calificaciones de peligro en experimentos de campo. La teoría física, si bien se utilizó cualitativamente con buenas ventajas en el diseño de los experimentos, no se utilizó directamente en el análisis. Como resultado de esta filosofía, existe una gran cantidad de datos de campo (lecturas meteorológicas, contenido de humedad del combustible y pequeñas clasificaciones de prueba de fuego), todos vinculados entre sí [76].

Este sistema está conformado por 4 módulos o subsistemas, ellos son:

1. Un índice meteorológico, el *Fire Weather Index (FWI)* calculado a partir de observaciones diarias de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación. De él se determinan los efectos que el contenido de humedad de los combustibles y el viento tienen en la probabilidad de inicio y en el comportamiento de los incendios forestales.
2. Un sistema de predicción del comportamiento del fuego, *Fire Behavior Prediction (FBP)*, que a partir del modelo de combustible, meteorología, topografía y contenido de humedad aporta información sobre la propagación e intensidad del fuego (velocidad, combustible quemado, intensidad del fuego, posibilidad de inicio de fuego en copas, etc).

3. Un índice de predicción de la ocurrencia, *Fire Occurrence Prediction* (FOP), basado en la causalidad de los incendios, tanto de origen humano como natural (rayos).
4. Un sistema accesorio de humedad del combustible, *Accesory Fuel Moisture Sytem* (AFMS), con el propósito de complementar a los anteriores mediante la inclusión de códigos específicos.

En el Cuadro 15 se muestra la estructura del Sistema Canadiense de Peligro de Incendios Forestales con los distintos módulos. Es un sistema que incorpora factores meteorológicos, época del año, topografía, tipo y contenido de humedad de los combustibles y actividad de los agentes causantes, a los efectos de evaluar el peligro de que se produzcan incendios forestales y las características de la propagación.



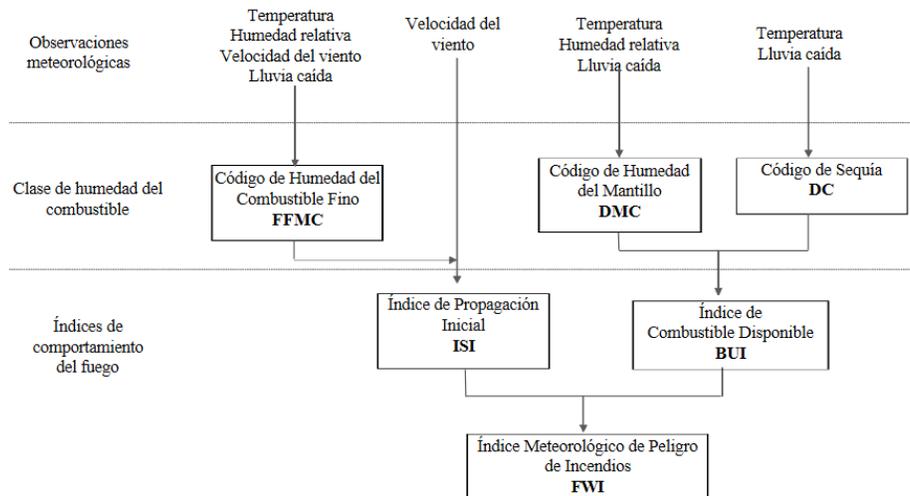
Cuadro 15: Estructura Sistema Canadiense de Peligro de Incendios Forestales

El FWI consiste en un conjunto de ecuaciones que pueden ser procesadas por computadora, fue desarrollado para un determinado complejo de combustible y posteriormente adaptado para otros diferentes. Su cálculo requiere de observaciones meteorológicas de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y lluvia, efectuadas a las 12:00. Se conforma de componentes que, individual y colectivamente, consideran los efectos de la humedad del combustible y del viento en el comportamiento del fuego. La estructura del FWI son tres códigos de humedad:

1. *Fine Fuel Moisture Code (FFMC)*: Código de humedad del combustible fino, se estima a partir de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación. Es un indicador de la facilidad de ignición e inflamabilidad en los combustibles finos.

2. *Duff Moisture Code (DMC)*: Código de humedad del mantillo, indicador del contenido de humedad de la materia orgánica poco profunda y poco compacta; requiere para su cálculo mediciones de humedad relativa, temperatura y precipitaciones y también como dato de entrada la duración del día obtenido de tablas. Es un indicador del combustible disponible para la ignición en las capas de profundidad moderada y en materiales leñosos de tamaño mediano.
3. *Drought Code (DC)*: Código de sequía, requiere de datos de temperatura medidos al mediodía, cantidad de precipitación de las últimas 24 horas y el efecto de la duración del día. Es un indicador del contenido de humedad de la materia orgánica profunda y compacta.

Cada uno de estos códigos fluctúa en forma independiente, respondiendo a los cambios en el contenido de humedad con diferentes tiempos de respuesta. El código de sequía puede subir o bajar lentamente, mientras el código de humedad de los combustibles finos y el código de humedad del mantillo fluctúan más rápidamente. Estos códigos de humedad de combustible se combinan para formar dos índices intermedios, ellos son; *Initial Spread Index (ISI)* representa un valor numérico de propagación de incendio y el *Build Up Index (BUI)* estima numéricamente el total de combustible disponible para la ignición. El FWI es una combinación del ISI y el BUI, representa la intensidad de propagación del fuego, tiene su origen en el valor 0 pero el límite superior está abierto[23].



Cuadro 16: Estructura del Fire Weather Index (FWI)

El FWI se refiere principalmente a un tipo de combustible de pino estándar, pero es útil como índice general de peligro de incendio forestal en Canadá. Se determina todos los días a partir de las lecturas meteorológicas del mediodía

El gobierno de Canadá a través de su Ministerio de Recursos Naturales (*Natural Resources Canada*) publica de forma diaria mapas de clima y comportamiento de incendios durante todo el año y mapas de puntos calientes durante la temporada de incendios forestales, generalmente entre mayo y setiembre.

### 6.11. Índice *Monte Alegre*

En 1972, R.Viana Soares desarrolla un índice diseñado para aplicarse en la región centro paraense (Sudeste) de Brasil. El índice denominado *Fórmula Monte Alegre* utiliza dos variables meteorológicas, una de forma directa, la humedad relativa del aire, medida a las 13:00 y otra de forma indirecta, la precipitación diaria. Es un índice acumulativo sujeto a las restricciones de las precipitaciones, de acuerdo al Cuadro 17.

Lluvia del día (mm)	Modificación en el cálculo
<=2.4	Ninguna
2.5 - 4.9	Disminuir un 30 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día
5.0 - 9.9	Disminuir un 60 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día
10.0 - 12.9	Disminuir un 80 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día
> 12.9	Interrumpir el cálculo (FMA = 0) y recomenzar la sumatoria en el día siguiente

Cuadro 17: Fórmula Monte Alegre: Tabla de restricciones de las precipitaciones

La interpretación del grado de peligro estimado se divide en 5 clases, desde «nulo» cuando el valor del índice es menor que 1, pasando por «pequeño» cuando está entre 1 y 3, «medio» cuando está entre 3.1 y 8, «alto» cuando está entre 8.1 y 20 hasta «muy alto» cuando es mayor a 20. Este es uno de los índices más simples en su cálculo y más accesibles de implementar debido a las pocas variables que considera. El índice se calcula utilizando la ecuación que se presenta en el Cuadro 18 [70].

$$\sum_{n=1}^{n=n} \frac{100}{H}$$

siendo:

H= Humedad Relativa

n= Número de Días sin Precipitaciones mayores a 13.0 mm

Cuadro 18: Fórmula Índice Monte Alegre

Esta fórmula continuó en desarrollo, y sobre los mismos principios pero con algunas modificaciones en la ecuación,. En el 2006 se publica un nuevo trabajo

de la Fórmula de Monte Alegre elaborado por Nunes, Soarez y Batista, denominado a este nuevo índice como Fórmula de Monte Alegre + (FMA+). El objetivo era mejorar la Fórmula de Monte Alegre mediante la inclusión de la velocidad del viento a los efectos de evaluar el potencial de la propagación del fuego, otorgándole mayor eficiencia a la fórmula, mejorar así la prevención y la lucha contra los incendios forestales. de modo que, además de la probabilidad de ignición, como ocurre con la Fórmula de Monte Alegre, el nuevo índice también refleje la propagación de incendios forestales. No sólo cambió la ecuación final sino también la definición de nuevas clases de peligro [54].

### 6.12. Índice *Francés*

El *índice Francés*, desarrollado por A. Orioux en 1974, e implementado por el entonces Servicio Meteorológico Nacional de Francia, inicialmente fue diseñado para predecir el peligro de incendio en el sureste de Francia (clima mediterráneo). Es un índice simple que se calcula a escala diaria, basado en el principio de que el peligro de incendio depende básicamente del viento y la humedad del suelo. Por lo tanto tiene como requerimientos de entrada para su cálculo la velocidad del viento, la temperatura y la precipitación. Se estima la sequedad de la cubierta boscosa a través del cálculo de la evapotranspiración del método de Thornthwaite y se requiere del pronóstico de la velocidad y dirección del viento. Mediante la presentación de una matriz que combina los valores del viento con los de sequía se obtienen los rangos o niveles de riesgos. El cálculo del índice debe iniciarse cuando la reserva de agua  $r$  esté saturada como por ejemplo después de fuertes lluvias. El primer valor  $r$  del índice se establece entonces en 150 [56].

Se calcula como se presenta en el Cuadro 19.

$$r = r_{max} \times e^{-\frac{\sum PET}{r_{max}}}$$

siendo:

- $r$  = reserva de agua estimada en el suelo (mm)
- $r_{max}$  = reserva de agua máxima del suelo (mm)
- PET = Evapotranspiración Potencial diaria (mm)

Cuadro 19: Fórmula Índice Francés-Odrieux

La Figura 20 muestra la matriz de donde se obtienen los niveles de riesgos del índice que van desde bajo a muy fuerte.

Sécheresse \ Vent en km/h	Vent en km/h		
	< 20	20 < V < 40	V > 40
Nulle . . . . .	0	0	0
Assez forte . . . . .	1	1	2
Forte . . . . .	1	2	3
Très forte . . . . .	1	2	3

0 : risque faible  
1 : risque habituel  
2 : risque sévère  
3 : risque très sévère

Cuadro 20: Niveles de riesgo Índice Francés

### 6.13. Índice *Fosberg Fire Weather Index*

En 1978 M. A. Fosberg desarrolla un índice meteorológico para evaluar la influencia del clima en los incendios forestales en función de variables como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Pero diseñadp para la implementación a pequeña escala y a corto plazo. El índice fue denominado *Fosberg Fire Weather Index (FFWI)* y fue diseñado como un suplemento a los cálculos de peligro proporcionados por el Sistema Nacional de Clasificación de Peligros de Incendios de Estados Unidos. Se basa en el contenido de humedad de equilibrio y la velocidad del viento, y requiere observaciones horarias de la temperatura, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento como datos de entrada. Es un índice muy sensible a los cambios de humedad de los combustibles finos. Se ha encontrado que el FFWI está correlacionado con la ocurrencia de incendios en el noreste y suroeste de los Estados Unidos. No se requieren valores o condiciones particulares al iniciar el cálculo de FFWI. El hecho de que el FFWI no tenga en cuenta la lluvia se consideró un problema, en particular para capturar las variaciones espaciales en el potencial de incendios en regiones donde la variabilidad espacial de la lluvia es importante [33]. El FFWI no aprovecha al máximo toda la información meteorológica proporcionada por los modelos numéricos o sistemas de observación más tradicionales. Esto es reconocido y estudiado por S. Goodrick, quién en el 2002 propone una modificación a este índice, basado en que la omisión de la precipitación evita que el FFWI capture variaciones espaciales en el potencial de incendio, debido a la variabilidad espacial en las cantidades de lluvia. Esta omisión puede ser muy importante en una región como Florida, donde las lluvias durante la temporada de incendios generalmente provienen de eventos climáticos locales que brindan una alta variabilidad espacial tanto en la cobertura como en la cantidad de lluvia. Por esto se propone la adición de un factor de disponibilidad de combustible que incorpora las lluvias recientes y la evaporación de esas lluvias. Este factor de disponibilidad de combustible se basa en el índice de sequía de *Keetch-Byram* (ver subsección 6.7), un indicador de sequía diseñado para aplicaciones forestales y ampliamente utilizado en el sureste de los Estados Unidos [38].

El Cuadro 21 presenta la formulación del FFWI.

$$\text{FFWI} = \frac{n \times \sqrt{1+U^2}}{0,3002}$$

siendo:

U = velocidad del viento

y n es un coeficiente de humedad calculado como:

$$n = 1 - 2 \cdot \left(\frac{EMC}{30}\right) + 1.5 \times \left(\frac{EMC}{30}\right)^2 - 0.5 \times \left(\frac{EMC}{30}\right)^3$$

EMC = contenido de humedad de equilibrio

Cuadro 21: Índice Fosberg -FFWI

#### 6.14. Índice de Reducción Evapotranspiración para el Peligro de Incendio

En Italia en el año 1984, G. Bovio desarrolla un índice llamado *Índice de Reducción de la Evapotranspiración para el Peligro de Incendio* (IREPI). Se trata de un índice de carácter meteorológico, basado en la evapotranspiración potencial y real diaria. Estima la pérdida de humedad del suelo, debido a la evapotranspiración real y la compara con el valor potencial de la evapotranspiración para calcular el valor del índice de peligro de incendio. Si el suelo está saturado la evapotranspiración real es igual a la potencial, si el suelo está seco la evapotranspiración real se reduce. Si las precipitaciones diarias son inferiores a la evapotranspiración potencial entonces no afectan a la reserva ya que se evaporan en el día, pero si son fuertes se integran a lo largo de los días. Tiene como requerimientos datos medios diarios de la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y precipitación acumulada, y se propone emplear el método de *Penman* para el cálculo de la evapotranspiración. Este índice no considera de forma directa el efecto del viento en su cálculo, pero éste se incluye en la estimación de la evapotranspiración por el método de *Penman*. Esto hace que tanto la humedad relativa, temperatura y radiación varíen en un día con vientos desecantes, aumentando el valor del índice ya que la evapotranspiración en ese caso también aumentaría. Los valores del índice definen 4 niveles de peligro: mínimo, medio, alto y extremo [13].

Su cálculo se presenta en el Cuadro 22.

$$\text{IREPI} = ((\text{ETP} - \text{ETR}) * 100 / \text{ETP})$$

siendo:

ETP: Evapotranspiración Potencial

ETR: Evapotranspiración Real

Cuadro 22: Índice IREPI

#### 6.15. Índice Español

Este índice es diseñado en 1987 por el entonces Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) de España. Tiene como requerimientos mediciones

de temperatura y humedad relativa para poder estimar el contenido de humedad de los combustibles ligeros y muertos situados sobre la superficie del suelo, entendiendo que los mismos son un factor clave en el inicio de la combustión. Mediante tablas que combinan datos de humedad relativa y temperatura del aire se obtiene la humedad básica del combustible. Luego se le aplican factores de corrección por exposición al sol, topografía y mes y hora en el que se han realizado las observaciones y así se obtiene la probabilidad de ignición. Se trata de un índice de ignición, el cual no tiene en cuenta el estado de la vegetación viva. Para la propagación la Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGCONA) propone usar las características de la vegetación viva obtenido a través de los modelos de combustibles, se atribuye un coeficiente de inflamabilidad a cada formación vegetal lo que permite obtener una estimación del peligro local de incendios. El índice final denominado Grado Actual de Peligro de Incendio Forestal es una combinación de información meteorológica con el factor de riesgo, denominado riesgo local de incendios [23].

### 6.16. Índice *Rodríguez Moretti*

En 1988, Rodríguez y Moretti desarrollaron un índice de riesgo forestal para ser implementado en la región Andino Patagónica, con base en el análisis de correlaciones entre las variables meteorológicas consideradas, la ocurrencia y la magnitud de los incendios ocurridos durante las temporadas de 1984, 1985, 1986 y 1987 en Argentina. Las variables meteorológicas consideradas son la temperatura, humedad relativa, viento y días consecutivos con y sin precipitación que son medidas a las 15:00 horas. Los días de sequía se cuentan a partir del último día con precipitación menor de 2 mm. Se asume que cada una de las variables utilizadas explicaba un determinado porcentaje del peligro total de propagación del fuego, bajo el supuesto que la temperatura y la humedad relativa son las que determinan el contenido de humedad de los combustibles y por ende la ignición de los mismos. La alternancia de períodos secos o húmedos está dada por la ocurrencia de precipitaciones. El peso de cada variable se determinó según el sistema Delphi [64]. El valor del índice se obtiene de la suma de las tablas que se presentan en el Cuadro 23, que son los índices de cada una de las variables.

Tabla 1

Temperatura °C	Índice
menos de 10	2.5
10 a 11.9	5.0
12 a 13.9	7.5
14 a 15.9	10.5
16 a 17.9	12.0
18 a 19.9	15.5
20 a 21.9	17.5
22 a 23.9	20.0
24 a 25.9	22.5
26 o más	25.0

Tabla 2

Humedad %	Índice
80 o más	2.5
79 a 75	5.0
74 a 70	7.5
69 a 65	10.5
64 a 60	12.5
59 a 55	15.0
54 a 50	17.5
49 a 45	20.0
44 a 40	22.5
39 o menos	25.0

Tabla 3

Velocidad del viento (km/h)	Índice
menos de 3.0	1.5
3.0 a 5.9	3.0
6.0 a 8.9	4.5
9.0 a 11.9	6.0
12.0 a 14.9	7.5
15.0 a 17.9	9.0
18.0 a 20.9	10.5
21.0 a 23.9	12.0
24.0 a 26.9	13.5
27.0 o más	15.0

Tabla 4

Días consecutivos de sequía	Índice
1	3.5
2 a 4	7.0
5 a 7	10.5
8 a 10	14.0
11 a 13	17.5
14 a 16	21.0
17 a 19	24.5
20 a 22	28.0
23 a 25	31.5
26 en más	35.0

Cuadro 23: Rodríguez Moretti, tablas para calcular el índice

Finalmente el valor del índice va de 0 a 100 y se divide en 4 clases, leve ( $0 < \text{Valor} < 24$ ), moderado ( $25 < \text{Valor} < 49$ ), alto ( $50 < \text{Valor} < 74$ ) y extremo ( $75 < \text{Valor} < 100$ ).

### 6.17. Índice *Portugués*

En 1988 el Instituto Nacional de Meteorología y Geofísica de Portugal desarrolla e implementa un nuevo índice inspirado en el índice Nesterov, llamado índice *Portugués*, el cual requiere como variables de entrada temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, precipitación diaria y velocidad del viento al mediodía. Se compone de tres indicadores numéricos:

1. un índice de ignición diario
2. un índice acumulativo (suma de los valores del índice de ignición de los días anteriores, definidos por el inicio de la temporada de incendios), y corregido por un factor que depende de la precipitación del día anterior
3. y el índice final de peligro de incendio que resulta de la combinación de (1) y (2), corregido por la velocidad del viento [36].

El índice establece 6 niveles de riesgo, desde el nivel sin riesgo hasta el riesgo extremo.

El Cuadro 24 presenta la fórmula para calcularlo.

Índice de ignición en el día t

$$IG_t = T_{12t} \cdot (T_{12t} - T_{dew12t})$$

siendo:

$T_{12t}$  la temperatura del aire

$T_{dew12t}$  la temperatura del punto de rocío

Índice acumulativo en el día t-1

$$B_{t-1} = p_{t-1} \cdot \sum_{i=1}^{t-1} IG_i$$

siendo:

p el factor de corrección para la precipitación P del día anterior

p	Precipitación
1	$0 \leq P \leq 1$
0.8	$1 < P \leq 2$
0.6	$2 < P \leq 3$
0.4	$3 < P \leq 4$
0.2	$4 < P \leq 10$
0.1	$P > 10$

Índice final

$$Ifa_t = IG_t + B_{t-1}$$

Cuadro 24: Índice Portugués

## 6.18. Índice Haines

En 1988, el meteorólogo D. Haines desarrolla un índice para uso específico en evaluación de peligro de incendios convectivos, denominado LASI (Lower Atmosphere Severity Index) o simplemente Haines. Se calcula en función de la variación de la temperatura en una cierta capa de la atmósfera en el límite inferior de la capa considerada. Resulta ser un buen indicador de la estabilidad atmosférica, evalúa el efecto de las condiciones atmosféricas sobre la vertical de las zonas en donde se produce la expansión del incendio. Las diferencias de temperatura y de humedad entre las capas de 750 y 950 hPa permiten identificar condiciones, que a nivel del suelo se traducen en factores desencadenantes de características erráticas, atmósfera inestable y circulación turbulenta del movimiento de la masa de aire, que favorecen las condiciones de fuerte propagación del fuego.

El modelo de Haines, a diferencia de los demás, considera el problema del fuego como una dinámica vertical a meso escala. A comienzo de los años 2000 otros autores han estudiado la idoneidad del índice de Haines y han propuesto mejoras desde el punto de vista termodinámico en la atmósfera más cercana a la superficie.

El Cuadro 25 presenta la fórmula para calcularlo.

$$LASI = A + B = (T_{p1} - T_{p2}) + (T_{p1} - T_{dp1})$$

siendo:

- A: factor asociado a la estabilidad, dado por la diferencia de temperaturas en los niveles que definen un estrato
- B: factor que representa la humedad en el nivel más bajo del estrato, dado por el decremento de la temperatura del punto del rocío
- $T_{p1}$  la temperatura en el límite inferior de la capa analizada
- $T_{p2}$  la temperatura en el límite superior de la capa analizada
- $T_{dp1}$  la temperatura de rocío en el límite inferior de la capa analizada

Cuadro 25: Índice Haines

Los valores de A crecientes se refieren a la evolución estabilidad-inestabilidad, y los del factor B a la evolución de la humedad-sequedad. Por ejemplo un LASI de 2 (A = 1 y B = 1) indica que son días muy estables y húmedos[49].

La categorización del riesgo se establece como se muestra en el Cuadro 26.

LASI	Clase de Riesgo
2 o 3	Muy Baja
4	Baja
5	Moderada
6	Alta

Cuadro 26: Índice Haines. Categorías

### 6.19. Índice *I87-Carrega*

En 1988, P. Carrega desarrolla el índice I87 para predecir el peligro de incendio en el sur de Francia, basado en el principio de que la aparición y propagación de incendios están condicionadas por los efectos combinados del viento, la humedad del aire, la temperatura y las reservas de agua del suelo. Tiene como insumos la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, y la evapotranspiración (Thornthwaite) y también incluye un coeficiente fenológico para tener en cuenta las diferencias estacionales en la condición de la vegetación. El I87 se puede calcular por horas, según la disponibilidad de datos meteorológicos. Sin embargo, los valores de r y rs se calculan solo a diario, especialmente a las 6:00 AM. Para iniciar el cálculo del índice, las reservas de agua profunda y superficial deben estar saturadas, como ocurre después de fuertes lluvias.

El Cuadro 27 presenta la fórmula de cálculo [16].

$$I87 = \frac{1}{\sqrt{r \times rs}} \times \max [10, T] \times \frac{U}{H} \times PC$$

siendo:

- r: reserva de agua profunda (mm)
- rs: reserva de agua superficial (mm)
- T: temperatura (°C)
- U: velocidad media del viento (m/s)
- H : Humedad Relativa (%)
- PC: coeficiente fenológico

Cuadro 27: Índice Carrega

## 6.20. Índice *Chile*

En 1990, G. Julio desarrolla una serie de índices de riesgo forestal para Chile, construido en base a los factores que afectan a la probabilidad de ocurrencia de incendios. Los índices desarrollados implicaron una ecuación general para todo el país, y 15 ecuaciones específicas que permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en 15 zonas de riesgo distribuidas a lo largo de Chile. Las variables necesarias para este cálculo son datos meteorológicos diarios de precipitaciones, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.

El cálculo requiere de dos factores:

- *Factor de estacionalidad*, que se refiere a la ocurrencia de incendios y usa información de población y vegetación, y
- *Factor de sequía*, que se calcula a partir de los datos de precipitación

El Cuadro 28 muestra las ecuaciones que lo representan [43].

$$Y = 17,6653 + 1.1692 X1 - 0,4387X2 + 0,3473X3 + 18,6882X4 - 0,2664X5$$

siendo:

Y la probabilidad diaria de ocurrencia de incendios forestales en una escala de 0 a 100

X1 = temperatura del aire °C

X2 = humedad relativa %

X3 = velocidad del viento en nudos

X4 = factor de estacionalidad, según tabla

X5 = factor de sequía, según tabla

Cuadro 28: Índice Chile

## 6.21. Índice *de Riesgo Numérico*

En 1990, para mejorar la predicción de la ocurrencia y propagación de incendios en el sur de Francia, se desarrolló el índice denominado *Índice de Riesgo Numérico (The Numerical Risk)* por B. Sol. Este índice tiene en cuenta la humedad del aire, la reserva de agua del suelo, la temperatura diaria del aire, la

temperatura del punto de rocío, la nubosidad, la velocidad del viento y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite) como variables de entrada. Tanto la humedad relativa como los demás factores de la ecuación tienen su propia fórmula de cálculo. El riesgo numérico se interpreta en 3 categorías, desde peligro de incendio bajo, alto peligro de incendio y muy alto [71].

El Cuadro 29 presenta su fórmula de cálculo.

$$RN = 25 - \frac{FH \times WRF \times WF}{15} + RSF$$

siendo:

FH = Humedad Relativa

WRF = Factor de reserva de agua en el suelo

WF = Factor del viento

RSF = Factor de corrección de tasa de dispersión

Cuadro 29: Índice de Riesgo Numérico

## 6.22. Índice de Asturias

En el 2006, el principado de Asturias publica su propio índice de riesgo de incendio forestal, basado en el cálculo previo de 4 factores:

1. *Índice de Alerta*, el cual utiliza mapas de predicciones a 3 días de humedad relativa, datos de temperatura, velocidad y dirección del viento, insumos esenciales para el cálculo del contenido de humedad de los vegetales
2. *Índice de Profesionales*, se otorga un valor numérico que va del 0 al 5 a las condiciones en las que se encuentra el monte de acuerdo a las condiciones meteorológicas
3. *Riesgo Histórico*, se emplea una estadística de incendios forestales recientes (10 años)
4. *Incendios de Conatos*, número de incendios de conatos acontecidos el día anterior y los producidos el mismo día hasta el mediodía

Una vez obtenidos estos 4 factores se calcula el índice de riesgo forestal, otorgando un valor de riesgo comprendido entre 0 y 5, desde riesgo muy bajo, riesgo bajo, riesgo moderado, riesgo alto, riesgo muy alto hasta riesgo extremo. Desde el año 2012 la elaboración del índice de riesgo forestal de Asturias está a cargo del Instituto de Recursos Forestales y Ordenación del Territorio (INDUROT). Básicamente el índice calculado es el *Fire Weather Index* (FWI) ponderado, teniendo en cuenta el reporte de los incendios, factor de corrección que se toma en consideración para el índice final [72].

## 6.23. Índice Risco Do Fogo

En Brasil, el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) junto con el Centro de Previsión de Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC), desarrolló, implementó y disponibilizó un índice de riesgo de incendio forestal llamado

Risco do Fogo (RF). El principio de este índice es que cuantos más días seguidos sin lluvia ha habido en un lugar, mayor es el riesgo de quemarse su vegetación. El cálculo del RF es uno de los productos del Programa de Monitoreo de Quemadas e Incendios Forestales del INPE. La base del cálculo está en el concepto del "Período de Sequía" (PSE), que corresponde al número de días seguidos sin ninguna precipitación durante los últimos 120 días en relación a la fecha de interés. Es fundamental tener en cuenta que el RF indica cuán propicia la vegetación está para ser quemada desde el punto de vista meteorológico, y que el fuego en la gran mayoría de los casos es iniciado por el hombre y no naturalmente. La velocidad del viento no es considerada en los cálculos, pues influye principalmente en la propagación del fuego y no en su ignición.

Para el cálculo del RF son necesarias informaciones diarias de las siguientes variables: precipitación (mm), temperatura del aire (°C) y humedad relativa (%). El campo de precipitación, que es el componente de mayor peso del RF, se obtiene en la resolución espacial de 25 km a partir de las estimaciones de precipitación por satélite, combinadas con datos observacionales de las estaciones de superficie. Los campos de temperatura máxima y de humedad mínima del aire en el horario de las 18UTC son obtenidos por el *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM) en la resolución espacial de 20 km. Estos análisis, a su vez, resultan de la interpolación de los datos de las estaciones meteorológicas en superficie. El mapa de los tipos de vegetación para los cálculos del RF fue una adaptación del producto anual del *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), a su vez generado por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) a partir de los mosaicos del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) con resolución espacial de 1 km del satélite AQUA. De las 17 clases originales de vegetación adoptada por el IGBP se reagruparon en siete principales:

1. Ombrófila densa y tierras alagadas,
2. Bosques deciduales y estacionales,
3. Bosque de Contacto y campinarana,
4. Savana arbórea y caatinga,
5. Savana arbórea abierta
6. Agricultura y varios
7. Pastos y gramíneas.

El mapa de vegetación se reemplaza anualmente si hay una nueva actualización del mismo. A cada una de las clases de vegetación se les asigna un valor de inflamabilidad que en la ecuación del RF se llama constante A [68]. Los valores asignados a la constante A se presentan en la Figura 7.

El RF observado se calcula a partir de datos meteorológicos medidos en las estaciones de superficie, interpolados para toda la rejilla espacial de trabajo, y se combina con la ocurrencia de focos de quema detectados por los satélites

del *Programa Queimadas* del INPE. A partir de este riesgo, se determinan los demás riesgos, para fechas y períodos futuros.

La secuencia del cálculo se detalla a continuación.

1. Determinar diariamente para los puntos de rejilla espacial de toda área geográfica de cobertura, el valor de la precipitación acumulada para once intervalos de días inmediatamente anteriores a la fecha de interés, de 1, 2, 3, 4, 5, 6a10, 11a15, 16a30, 31a60, 61a90 y 91a120 días.

$$\begin{aligned}
 prec1 &= \sum_{i=1}^1 prec(i) \\
 prec2 &= \sum_{i=1}^2 prec(i) \\
 prec3 &= \sum_{i=1}^3 prec(i) \\
 prec4 &= \sum_{i=1}^4 prec(i) \\
 prec5 &= \sum_{i=1}^5 prec(i) \\
 prec10 &= \sum_{i=1}^{10} prec(i) \\
 prec15 &= \sum_{i=1}^{15} prec(i) \\
 prec30 &= \sum_{i=1}^{30} prec(i) \\
 prec60 &= \sum_{i=1}^{60} prec(i) \\
 prec90 &= \sum_{i=1}^{90} prec(i) \\
 prec120 &= \sum_{i=1}^{120} prec(i)
 \end{aligned}$$

Cuadro 30: Variables de precipitación acumulada

2. Calcular los *Factores de precipitación* (fp) con valores de 0 a 1 para cada uno de los once períodos de precipitación acumulada, por medio de una función exponencial empírica de precipitación, específica para cada uno de los once intervalos.

$$\begin{aligned}
 fp1 &= e^{-0,14} \times prec1 \\
 fp2 &= e^{-0,07} \times (prec2 - prec1) \\
 fp3 &= e^{-0,04} \times (prec3 - prec2) \\
 fp4 &= e^{-0,03} \times (prec4 - prec3) \\
 fp5 &= e^{-0,02} \times (prec5 - prec4) \\
 fp6a10 &= e^{-0,01} \times (prec10 - prec5) \\
 fp11a15 &= e^{-0,008} \times (prec15 - prec10) \\
 fp16a30 &= e^{-0,004} \times (prec30 - prec15) \\
 fp31a60 &= e^{-0,002} \times (prec60 - prec30) \\
 fp61a90 &= e^{-0,001} \times (prec90 - prec60) \\
 fp91a120 &= e^{-0,0007} \times (prec120 - prec90)
 \end{aligned}$$

Cuadro 31: Ecuaciones de los factores de precipitación

3. Calcular los *Períodos de Seca* (PSE) por la multiplicación de los *fp* de los once intervalos, conforme a la ecuación del Cuadro 31. En este procedimiento, la precipitación más reciente se pondera con mayor peso, y así se

incorpora al cálculo el efecto temporal del régimen de precipitación. El valor obtenido corresponde a un número hipotético de días seguidos sin lluvia para caracterizar el estado de la vegetación.

$$PSE = 105 \times fp1 \times fp2 \times fp3 \times fp4 \times fp5 \times fp6a10 \times fp11a15 \times fp16a30 \times fp31a60 \times fp61a90 \times fp91a120$$

Cuadro 32: Período de seca

4. Determinar el *Riesgo de Fuego Básico* (Rb) para cada punto de grilla, por medio de la ecuación del Cuadro 32.

$$Rb_n = \frac{0,8 + \text{sen}[\frac{(A_n \times PSE) - 90}{2} \times (3,14 \times 180)]}{2}, \text{ con } n = 1,7$$

Cuadro 33: Riesgo básico

La constante  $A$  varía con los tipos de vegetación de acuerdo con la Figura 7. Es un valor que se asigna según la cubierta vegetal y pretende representar un grado de inflamabilidad. Los 17 tipos de cubierta vegetal considerados se corresponden con 7 valores diferentes, por lo cual en la práctica se realizó una reclasificación del territorio en 7 clases según su inflamabilidad.

Clases de Vegetação do IGBP	Classes principais	Classes IBGE (agrupadas)	Cte. "A"	
0	<i>Water</i>	0	Corpos d'água	-x-
1	<i>Evergreen Needleleaf forest</i>	5	Floresta de contato; Campinarana	2,0
2	<i>Evergreen Broad leafforest</i>	7	Ombrófila densa	1,5
3	<i>Deciduous Needleleaf forest</i>	5	Floresta de contato; Campinarana	2,0
4	<i>Deciduous Broadleaf forest</i>	6	Florestas decíduas e sazonais	1,72
5	<i>Mixed forest</i>	5	Floresta de contato; Campinarana	2,0
6	<i>Closed shrublands</i>	4	Savana arbórea; Caatinga fechada	2,4
7	<i>Open shrublands</i>	3	Savana; Caatinga aberta	3,0
8	<i>Woody savannas</i>	4	Savana arbórea; Caatinga fechada	2,4
9	<i>Savannas</i>	3	Savana; Caatinga aberta	3,0
10	<i>Grasslands</i>	1	Pastagens e gramíneas	6,0
11	<i>Permanent wetlands</i>	0	Alagados permanentes	1,5
12	<i>Croplands</i>	2	Agricultura e diversos	4,0
13	<i>Urbanand built-up</i>	0	Áreas urbanas e construídas	-x-
14	<i>Cropland/Natural vegetation mosaic</i>	2	Agricultura e diversos	4,0
15	<i>Snowand ice</i>	0	Neve e gelo	-x-
16	<i>Barren/sparsely vegetated</i>	0	Solos expostos; mineração	-x-

Figura 7: Valores de la constante A

5. Ajustar el RF según un Factor de Humedad Relativa (FHR) del aire, ya que en este método el riesgo aumenta inversamente con la humedad relativa

$$FHR = -0,006 \times HR + 1,3$$

Cuadro 34: Factor de Humedad Relativa

6. Ajustar el RF según un Factor de Temperatura (FT) del Aire, se trata de la temperatura máxima del aire a la superficie local el día del cálculo, que en este método tiene un efecto lineal directamente proporcional en el Riesgo.

$$FT = 0,02 \times T_{max} + 0,4$$

Cuadro 35: Factor de Temperatura

7. Se genera el Riesgo de Fuego Observado (RFO), multiplicando el valor del Riesgo de Fuego Básico (RB) por los factores de la humedad relativa mínima (FHR) y de la temperatura del aire máximo (FT).

$$RFO = RB \times FHR \times FT$$

Cuadro 36: Riesgo de Fuego Observado

8. Corrección por factor latitudinal, se refiere a la latitud del lugar expresada en grados y corrección topográfica, se refiere a la elevación del terreno expresada en metros.

$$FLAT = 1 + \text{abs}(\text{latitud}) \times 0,003$$

$$FELV = 1 + \text{elevación}(\text{metros}) \times 0,00003$$

Cuadro 37: Corrección por Factor Latitudinal y por Factor Elevación

9. Calcular el Riesgo de Fuego Final. Con el cálculo del Riesgo Observado y los factores de corrección por latitud y elevación se obtiene el Riesgo Final.

$$RF = RFO \times FLAT \times FELV$$

Cuadro 38: Riesgo de Fuego final

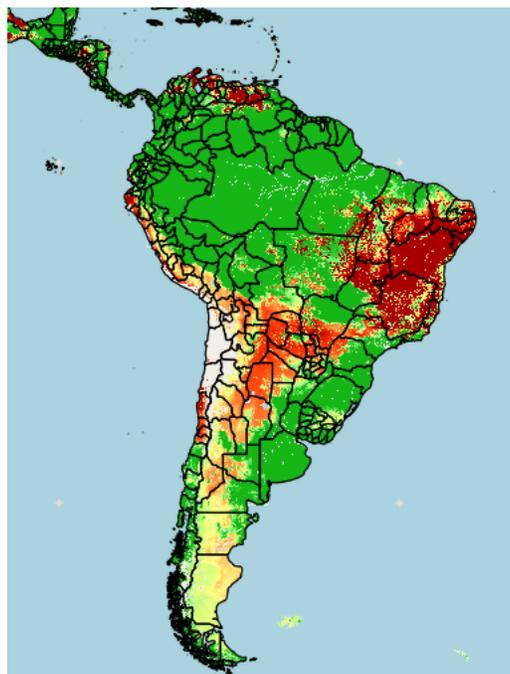
10. Luego se atribuyen las siguientes categorías para los niveles de riesgo de fuego

<i>Riesgo</i>	<i>Valores del Riesgo</i>	<i>Color</i>
Mínimo	$RF < 0,15$	
Bajo	$0,15 < RF \leq 0,40$	
Medio	$0,40 < RF \leq 0,70$	
Alto	$0,70 < RF \leq 0,95$	
Crítico	$RF > 0,95$	

Cuadro 39: Niveles de Riesgo

11. Corrección de Riesgo de Fuego por la detección de focos de quema; cuando se verifica que en lugares con riesgo de fuego es mínimo o bajo y hubo algún foco de quema detectado por los satélites en los últimos 3 días, y en este período no hubo precipitación, el valor de riesgo de fuego se cambia a alto.

A modo de ejemplo la imagen muestra la salida gráfica del cálculo de Risco Do Fogo, que se genera para toda América, pero los datos precisos usados en el cálculo abarcan sólo el territorio de Brasil.



Cuadro 40: Risco Do Fogo, 2021-05-23, entre 12 UTC y 18 UTC

## 7. Discusión

Cualquiera sea la herramienta para monitorear los fenómenos de incendios forestales, queda por demás claro que no son sencillas de desarrollar y de implementar. Las primeras investigaciones en este tema otorgaban mayor relevancia a la influencia que ejercían las variables meteorológicas como la lluvia y la temperatura en el riesgo y por eso éstas están presentes en prácticamente todos los índices. En algunos trabajos, sobre todo los más antiguos, se reconoce explícitamente que la integración en ecuaciones de todos los factores incidentes en un incendio forestal es difícil, y que hay decisiones arbitrarias. En la Figura 8 se presentan los principales hitos en la evolución de los índices de riesgo de incendio relevados, donde se aprecia que en los primeros índices, los esfuerzos estuvieron enfocados en el desarrollo matemático de las funciones.



Figura 8: Principales hitos en la evolución de los índices de riesgo de incendio. Elaboración propia

El mayor desafío sigue radicando en la ponderación y/o relación entre los distintos factores que inciden en un incendio forestal y que se consideren en cada uno de estos desarrollos. Los índices analizados en general presentan un nivel de complejidad creciente en el tiempo, pero este aumento de la complejidad se puede apreciar en la cantidad y variedad de los insumos necesarios para el desarrollo, así como en los métodos de cálculo, pero no en los fundamentos del desarrollo matemático de las funciones. Parte de esta tendencia se podría explicar por la creciente:

- disponibilidad de insumos de información (mayor densidad de redes de observación de variables meteorológicas, imágenes satelitales, etc)
- posibilidad de cálculos automatizados mediante computadoras más potentes y redes de datos con mayor alcance
- posibilidad de ensayos en laboratorios con recursos más modernos y controlados
- disponibilidad de herramientas que permitan la integración de las variables analizadas (como pueden ser los SIG)
- participación de profesionales de distintas disciplinas

- investigación teórica sobre el tema

Pero más allá de esta tendencia a aumentar la complejidad, existe una variedad de enfoques que debería ser explicada. En general, parece haber un acuerdo en que la variable más importante para el riesgo de incendios es una especie de *medida de la propensión a la ignición del combustible*. Sin embargo, la variedad de métodos de *estimación* de esta medida, revela que no existe una única teoría generalmente aceptada que la *calcule* con precisión en todos los casos. Por otro lado, la complejidad del problema ha generado que los abordajes se simplifiquen, y estas simplificaciones algunas veces tienden a omitir algún aspecto poco relevante para el lugar objetivo, que podría sin embargo ser más relevante para otro lugar. Por último, muchas veces existen restricciones en cuanto a los insumos disponibles, y por esto es lógico que un índice que se diseña con el objetivo de ser utilizado en la práctica, simplemente considere en sus fórmulas aquellas variables que estaban disponibles en ese lugar y tiempo específicos. Así, parece haber al menos tres explicaciones complementarias para la divergencia de las formas de cálculo:

- Ausencia de una única teoría generalmente aceptada para el cálculo del riesgo
- Particularidades de la zona objetivo, como clima, topografía o tipo de vegetación
- Disponibilidad de variables de entrada

Estos problemas no eran ignorados por los autores de los índices, y se nota una preocupación generalizada por parte de los mismos sobre la necesidad de una revisión futura, así como de un análisis cuidadoso en caso de que quisieran aplicarse sobre zonas para las cuales no fueron diseñados. En países muy grandes y con varios climas diferentes como Brasil, Estados Unidos o Canadá seguramente se deban tomar en consideración otros factores que en países pequeños como Uruguay.

Otro aspecto importante pero poco tratado es la característica espacial que en general tienen las salidas de estos productos. Más allá de la determinación del riesgo en un punto determinado del espacio, se pretende contar con mapas que muestren el riesgo sobre el terreno. Como se discutió en la Sección 3, son relevantes los métodos de interpolación y el orden de las operaciones discretas y de capas. Aún después de tener las fórmulas, se pueden obtener como resultado mapas diferentes por haber elegido diferentes métodos de interpolación. También se obtendrán mapas diferentes en función del momento en que se decida pasar de cálculos discretos a una interpolación.

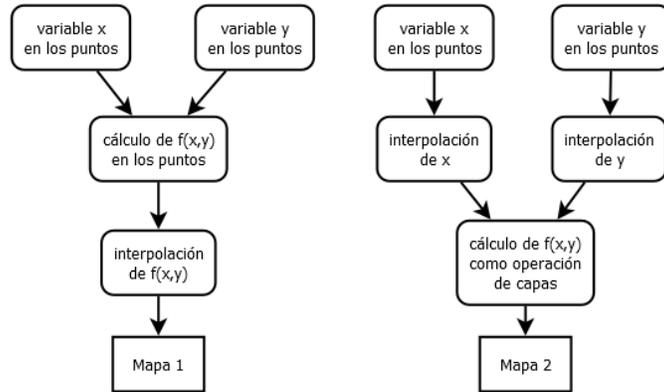


Figura 9: Diferencias en el orden de las operaciones. Elaboración propia

Por ejemplo, la Figura 9 presenta dos formas diferentes de obtener una función  $f(x,y)$  en un mapa. En el caso de la izquierda primero se calcula  $f(x,y)$  para cada punto donde se cuente con las variables  $x$  e  $y$ , y después se interpola  $f(x,y)$  para obtener el «Mapa 1». En el caso de la derecha primero se interpolan las variables  $x$  e  $y$  obteniendo capas, y después se calcula  $f(x,y)$  como operación de capas para obtener el «Mapa 2». Ocurre que muy probablemente el «Mapa 1» sea diferente al «Mapa 2», aún habiendo utilizado las mismas fórmulas y los mismos interpoladores. La elección del orden podría ser una alternativa o no, debido a que las variables  $x$  e  $y$  podrían no estar todas disponibles para los mismos puntos.

Los índices de naturaleza meteorológica utilizan una estimación en base a variables atmosféricas, como alternativa a la medición directa de las condiciones hídricas de la vegetación, asumiendo que la dinámica atmosférica determina el contenido de agua en las plantas. Sin embargo, esta relación no es uniforme, ya que depende de las condiciones fisiológicas de las distintas especies. Las mismas condiciones meteorológicas pueden estar afectando de modo muy diverso al contenido de agua en el combustible.

La mayoría de los incendios forestales tienen una componente humana, ya sea por negligencia o por intencionalidad. La presión demográfica, que ocurre por ejemplo en los lugares turísticos en las temporadas estivales, en un contexto de alta combustibilidad y condiciones meteorológicas favorables al desencadenamiento de un incendio, aumenta el riesgo, así como también determinadas prácticas culturales como son las quemas prescritas. No considerar estos factores por la complejidad de su tratamiento es otra simplificación de los modelos.

Como se discutió en la Sección 3, los modelos son sobresimplificaciones de la realidad, y todas estas sobresimplificaciones podrían aumentar los márgenes de error. Para un índice de riesgo de incendio, podrían considerarse al menos las siguientes sobresimplificaciones y/o causas de error:

- Sobresimplificación inherente de todo modelo respecto de la complejidad

de la realidad

- Sobresimplificación en las fórmulas, sea porque se decide trabajar con un modelo más simple, o porque no se cuenta con todas las variables necesarias
- Sobresimplificación por no considerar los factores antrópicos
- Sobresimplificación derivada de tratar como determinísticas variables probabilísticas, como cuando se utiliza un pronóstico de precipitación
- Sobresimplificación en la asignación de coeficientes de inflamabilidad
- Sobresimplificación por estimar las condiciones hídricas de la vegetación a partir de variables meteorológicas
- Utilización de un modelo diseñado para un lugar diferente
- Error introducido por los métodos de interpolación
- Error introducido por problemas de calidad en los datos, ya sean de correctitud (los registros de precipitación no tienen décimas), de completitud (datos faltantes), de resolución espacial (la densidad de puntos de medición sobre el terreno no es suficiente) o de resolución temporal (se toman datos de una hora diferente a la recomendada por no estar disponibles)

Desde una perspectiva histórica, no es sorprendente que el desarrollo de estas herramientas haya partido de países que tenían interés en resolver lo que aparecía como un problema. Para estos países, los incendios forestales son problemáticos no sólo por los costos económicos, sino también por los costos ecológicos y hasta pérdida de vidas humanas. Pero también son países donde los bosques tienen una cobertura espacial por demás importante. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, encargado de la gestión de los bosques, cerca de un 8% de la superficie de ese país es ocupado por los bosques nacionales, a lo que se debe sumar la superficie de bosques destinados a la industria maderera. El fomento de estos usos del suelo sumado a las prácticas de manejo de tierras que tienen algunos estados, que incluyen la quema prescrita, incrementan el riesgo. Algo similar ocurre en países como Canadá, Rusia y Brasil, los cuales son los países en donde se encuentran la mitad de los bosques del mundo<sup>4</sup>. Por esto no es sorprendente que los primeros índices de riesgo de incendio surgieran en estas partes del mundo o que los desarrollos más complejos se hayan realizado en estos países.

Pero como no sólo el factor combustible es lo que determina la ocurrencia de un incendio, sino que también importan y mucho las condiciones meteorológicas, climas templados con frecuentes fluctuaciones meteorológicas como el mediterráneo también se ven muy afectados por los incendios. Esto explica que también en esta parte del mundo se hayan desarrollado muchos de los índices

---

<sup>4</sup>El Estado de los Bosques del Mundo. Informe 2020 FAO  
<http://www.fao.org/3/ca8642es/CA8642ES.pdf>

presentados en este trabajo y otros más. En la cuenca del Mediterráneo son lamentablemente conocidos los incendios forestales que ocurren cada temporada estival. Los países más afectados son Portugal, España, Francia e Italia, entre otros. Justamente de ellos ha partido la necesidad de disponer de herramientas de monitoreo de incendios forestales, que en un comienzo surgen de forma nacional pero como se menciona la Sección 5 actualmente se está trabajando para tener un monitoreo regional.

La problemática de los incendios forestales es una condición necesaria pero no suficiente para el desarrollo de instrumentos como los índices de riesgo de incendios forestales. La realidad de países como la República Democrática del Congo o Angola, donde ocurren de forma recurrente incendios forestales, impide priorizar el problema. En estos países, las prácticas agrícolas ancestrales debido a la falta de recursos, desencadenan la mayor parte de los incendios. Sin embargo, estos países tienen debilidades institucionales y prioridades más urgentes, que podrían explicar la carencia de instrumentos para el manejo del fuego.

En general se observa un proceso histórico de maduración, ya que en muchos casos antes del desarrollo de un instrumento como un índice se han implementado políticas, procedimientos y guías para el manejo del fuego. En estos casos, el desarrollo de instrumentos como los índices son el resultado de un proceso previo de maduración, cuando se trata de avanzar en las posibilidades de predicción.

La selección de índices presentados en la Sección 6 ofrece una visión general de los índices que se han usado y se usan en el mundo. A priori, varias de esas propuestas podrían ser replicadas en Uruguay. En un análisis inicial sobre las fortalezas y debilidades que existen en Uruguay en cuanto a los requerimientos de estas herramientas, el *Risco Do Fogo* (ver Subsección 6.23) parece ser un buen índice para implementarse en el país.

Algunas de las razones podrían ser las siguientes:

- es un índice de ecuaciones relativamente sencillas
- requiere datos meteorológicos observados que están disponibles en términos generales en el país
- incorpora la cobertura vegetal, también accesible en el país
- se aplica en un país vecino que en alguna medida comparte clima y ecosistemas

De implementarse a nivel nacional, la selección debería de enmarcarse en un trabajo más riguroso, para ponderar las fortalezas y debilidades que presenta el país en cuanto a los requisitos de cada una de estas herramientas, y para testear su desempeño. En el desarrollo de la propuesta de la Sección 8 se encuentran mayores detalles.

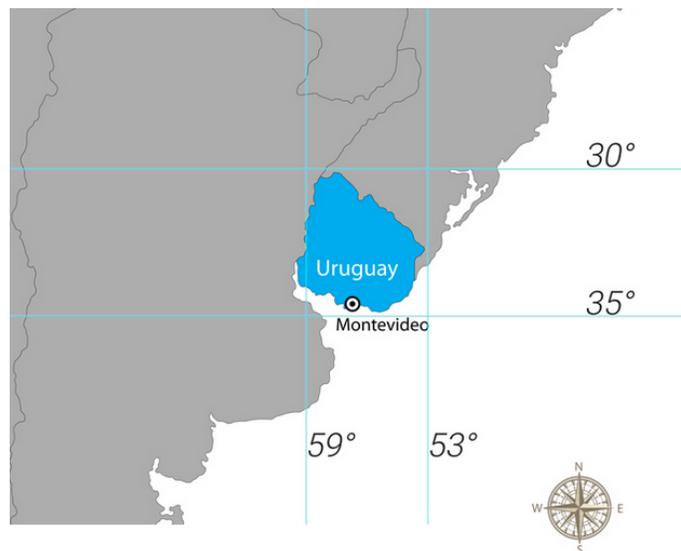
## 8. Propuesta

En esta sección se presenta una propuesta de índice de riesgo de incendio forestal para el territorio uruguayo. En la Subsección 8.1 se presenta el espacio geográfico de aplicación del índice, Uruguay; en las Subsecciones 8.2 y 8.3 se establecen respectivamente el objetivo y el alcance, en la Subsección 8.4 se presentan el diseño y la implementación realizada, en la Subsección 8.5 se describen las pruebas, en la Subsección 8.6 se discuten limitaciones y problemas encontrados, y en la Subsección 8.7 se analizan los resultados.

### 8.1. Presentación

En esta Subsección se presentan las características fundamentales del Uruguay, y se describen brevemente los factores más estables que inciden en los incendios forestales: el clima y la cobertura vegetal.

Uruguay está situado en América del Sur, aproximadamente entre los paralelos  $30^{\circ}$  y  $35^{\circ}$  de latitud Sur y los meridianos  $53^{\circ}$  y  $58^{\circ}$  de longitud Oeste. Limita por el Norte y el Noreste con la República Federativa del Brasil, por el Oeste con la República Argentina a través del río Uruguay, por el Sur con el Río de la Plata y por el Este con el Océano Atlántico. Tiene una superficie continental de  $176.215 \text{ km}^2$



Cuadro 41: Ubicación de Uruguay. Fuente: Instituto Geográfico Militar

En lo que respecta al clima, Uruguay se encuentra en una región de transición caracterizada por fuertes gradientes meridionales que separan la región tropical cálida y la zona más fría de latitudes altas, está ubicado en una zona de gran variabilidad climática cualquiera sea la escala temporal.

Los distintos valores de los parámetros meteorológicos no son condición suficiente para determinar distintos climas en Uruguay, de acuerdo a clasificaciones clásicas como la de Koeppen todo el territorio está comprendido dentro de las siguientes características:

- Clima templado, moderado y lluvioso (temperatura del más frío entre  $-3^{\circ}$  y  $18^{\circ}\text{C}$ ): "tipo C"
- Clima de temperie húmeda (La lluvia es irregular condiciones intermedias entre el w y el s de Koeppen): "tipo f"
- Variedad específica de temperatura (temperatura mes más cálido superior a  $22$  grados centígrados): "tipo a"

En resumen a Uruguay le corresponde la clasificación climática de Koeppen «Cfa»[41].

Las condiciones climáticas dependen de factores que van más allá de sus límites territoriales. La variabilidad interanual es bastante importante en Uruguay y se evidencia principalmente en las precipitaciones, esta variación responde fundamentalmente al fenómeno El Niño - Oscilación Sur, fenómeno que tiene incidencia no sólo en las precipitaciones sino también en las temperaturas y los vientos.

A nivel anual nuestro país tiene un balance de precipitación- evaporación positivo, es decir, llueve más de lo que evapora. Este balance es válido para todas las estaciones excepto el verano cuando la evaporación excede a las lluvias. La ausencia de topografía significativa resulta en que las isothermas sean aproximadamente paralelas a los círculos de latitud, con mayores valores al norte del país (la región norte es alrededor de  $3^{\circ}\text{C}$  mas cálida que la región sur). La amplitud del ciclo estacional es cercano a los  $10-11^{\circ}\text{C}$  entre invierno y verano, siendo un poco mayor al norte que al sur. El otoño tiene menor diferencia térmica entre las regiones norte-sur del país que las demás estaciones. Los acumulados de precipitación son muy similares en las 4 estaciones del año, con valores cercanos a los  $300-350$  mm por trimestre, lo cual implica unos  $1300$  mm por año. Sin embargo, existen algunas diferencias significativas en cuanto a su distribución espacial y temporal. Las estaciones de primavera, verano y otoño registran las mayores precipitaciones, y sobre todo al norte del país donde pueden llegar a valores de  $400$  mm, mientras que en el sur los registros son más cercanos a los  $300$  mm. En el invierno la distribución de lluvias es longitudinal, con mayores valores al este (mayores a  $300$  mm) y menores al oeste del país donde llueve alrededor de  $200$  mm. Uruguay registra precipitaciones durante todo el año, de carácter frontal en el invierno y convectiva en el verano, y además es influenciada remotamente por el estado de las aguas de los océanos tropicales a través de teleconexiones atmosféricas. Estas características hacen que el clima de Uruguay y en particular las lluvias tengan una variabilidad muy grande año a año, década a década y en escalas aún mas largas [8].

El paisaje del Uruguay constituye «una apariencia y una representación y es la expresión material del arreglo u orden de los elementos geográficos producto de la relación Hombre-Sociedad-Medio Natural, visibles al observador» [1].

De acuerdo al atlas de Cobertura del Suelo de Uruguay 2000-2011 [12], las coberturas del país se pueden agrupar en 7 grandes tipos. Ellas son:

- Las áreas terrestres cultivadas y manejadas que representan un 26.7 % del total del área del país. Se definen a las áreas terrestres cultivadas y manejadas como aquellas áreas donde la vegetación natural ha sido reemplazada o transformada por otro tipo de cobertura vegetal de origen antrópico, toda la vegetación que es plantada con el propósito de ser cosechada.
- La vegetación natural y semi-natural un 67.7 %. Las áreas de vegetación y semi-natural se definen como áreas donde la vegetación está en balance con las fuerzas abióticas y bióticas de su biotopo, mientras que la vegetación semi-natural es vegetación no plantada por las personas pero si influenciada por sus acciones. En definitiva se trata de vegetación no artificial y no requiere acción humana para ser mantenida a largo plazo.
- La vegetación natural y semi-natural o regularmente inundada un 3 %. Las áreas de vegetación natural y semi-natural acuática o regularmente inundada describen áreas que son de transición entre sistemas terrestres puros y acuáticos, y donde la napa freática se encuentra cerca de la superficie. La cobertura vegetal está significativamente influenciada por el agua y es dependiente de la inundación.
- Las superficies artificiales y áreas asociadas 0.8 %. Las áreas de superficies artificiales y áreas asociadas, describen áreas que tienen cobertura artificial como resultado de actividades humanas; y los cuerpos de agua, nieve y hielo artificiales refieren a aquellas áreas cubiertas por agua producto de construcciones de reservorios, canales, lagos, etc. Mientras que los cuerpos de agua naturales de agua, nieve y hielo se refieren a áreas que están cubiertas naturalmente por agua como lagos y ríos.
- Áreas descubiertas o desnudas 0.2 %
- Cuerpos artificiales de agua, nieve y hielo un 1.2 % y
- Cuerpos naturales de agua, nieve y hielo 0.6 %

La Figura 10 presenta estas clases. En términos generales, grandes extensiones de praderas naturales, diversos tipos de bosques, extensos bañados y áreas cultivadas en expansión configuran las distintas coberturas del Uruguay <sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>Atlas de Cobertura del Suelo de Uruguay 2000 - 2011, disponible en: <http://www.fao.org/3/i4372s/i4372s.pdf>

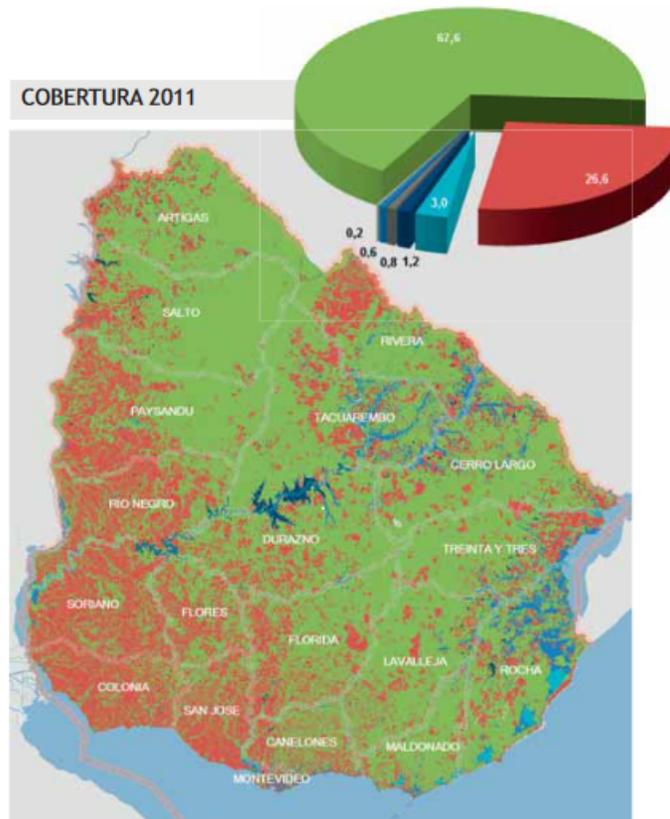


Figura 10: Cobertura del Suelo Uruguay 2000-2011

En Uruguay, la cobertura dominante es el herbáceo natural, seguido de cultivos y plantaciones forestales. La superficie total del Uruguay está comprendida en la región de los pastizales del Río de la Plata, una de las zonas de pastizales naturales más extensas del mundo. En los pastizales naturales se encuentra el 80 % de la riqueza de especies vegetales registradas en Uruguay. En los últimos años se ha podido observar una disminución del herbáceo natural frente al crecimiento de las áreas de cultivos y plantaciones forestales. Este avance de la agricultura originó una de las mayores tasas de cambio de la cobertura original a nivel mundial [61].

Las mayores plantaciones forestales se ubican en tres grandes zonas del país: este, noroeste y centro-oeste; particularmente en los departamentos de Rivera, Tacuarembó, Cerro Largo, Treinta y Tres, Lavalleja y Rocha. Las tierras de cultivo se distribuyen principalmente en las regiones suroeste y oeste, y en parte en el este. El sector forestal se distribuye principalmente en cuatro regiones, siendo las regiones oeste y noreste las que contienen las áreas más extensamente plantadas.

## 8.2. Objetivo

El objetivo de un índice de ignición de incendio forestal es *predecir niveles de riesgo en el territorio* que permitan tomar acciones para una rápida respuesta en caso de iniciarse un incendio.

No es esperable que toda vez que según un índice exista un riesgo alto se produzca un incendio, y tampoco es esperable que cada vez que se produce un incendio algún índice haya previsto un riesgo alto (sobre todo por las variables antrópicas, como se analizaron en la Sección 3). Sin embargo, sí sería esperable que el índice resulte útil, lo cual significa que en general haya precedido un riesgo alto cuando se produce un incendio.

## 8.3. Alcance

Existen varias limitaciones que condicionan el alcance de este trabajo, sobre todo el tiempo disponible para realizar las múltiples pruebas que exigiría una validación de la efectividad del índice, así como los ajustes que puedan realizarse en los múltiples pasos del proceso para optimizarlo. Este trabajo se limita entonces a proponer un *prototipo* de índice que podría mejorarse en varios aspectos. Toda consideración relativa a la automatización de la generación del índice queda explícitamente fuera de alcance, por lo cual el proceso de generación del índice para un día determinado es fundamentalmente manual, y por este motivo la generación de un caso de prueba es costosa.

## 8.4. Diseño e implementación

La metodología utilizada está basada en la del *Risco Do Fogo* descrito en la Subsección 6.23, aunque se introdujeron algunos cambios. Se realizaron ajustes en la ecuación del Riesgo Básico, que se discuten en la Subsección 8.5. También se modificaron los criterios de selección de las variables a utilizar, debido a la disponibilidad de la información en nuestro país, lo que también se discute en la Subsección 8.5. Se decidió no implementar las correcciones por elevación ni latitud, debido a que por las dimensiones y características orográficas de nuestro país no parece justificarse aumentar la complejidad del proceso para lograr una corrección muy marginal. También se decidió no considerar la presencia de focos activos debido a la complejidad que supone su detección a partir del tratamiento de imágenes satelitales.

En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo del proceso. Las actividades están numeradas para hacer referencia a las mismas, pero no suponen un orden estricto. Los artefactos no están numerados y se referencian por nombre, éstos pueden ser un archivo o una capa dentro del SIG. Para la implementación de la generación del índice se utilizó el software Quantum Gis versión 3.12.

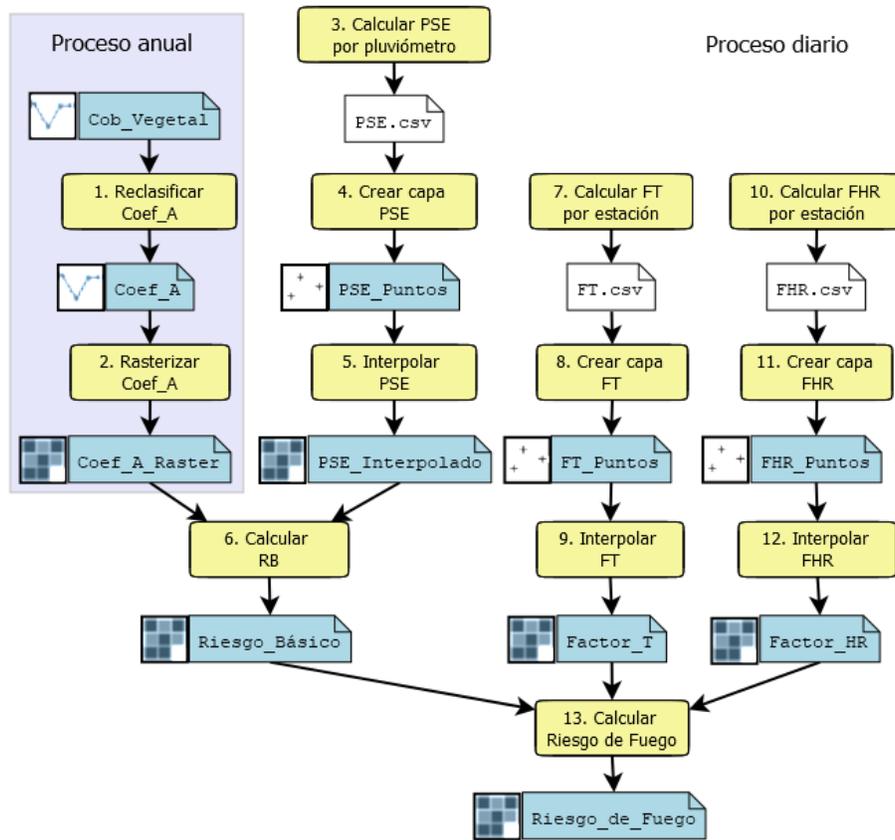


Figura 11: Diagrama de flujo del proceso. Elaboración propia

A continuación se describen brevemente las actividades de la Figura 11:

1. *Reclasificar Coef\_A*: Se reclasificó una capa de cobertura vegetal agregando clases en función de su combustibilidad. Como el objetivo de esta capa es ser utilizada como el coeficiente A de la fórmula del Cuadro 33, se nombró el resultado **Coef\_A**.
2. *Rasterizar Coef\_A*: Se rasterizó la capa vectorial **Coef\_A** y se llamó al resultado **Coef\_A\_Raster**.
3. *Calcular PSE por pluviómetro*: Esta actividad se implementó en una hoja de cálculo siguiendo las fórmulas de los Cuadros 30, 31 y 32 de la Subsección 6.23. Al final de este proceso se exportaron las coordenadas de cada pluviómetro con el PSE calculado en un archivo con formato *Comma Separated Values* (CSV) llamado **PSE.csv**.

4. *Crear capa PSE*: Se creó dentro del SIG una capa de puntos a partir del archivo PSE.csv. Esta capa se nombró PSE\_Puntos
5. *Interpolar PSE*: Se interpolaron los valores del PSE utilizando un Kriging ordinario, y se generó la capa raster PSE\_interpolado
6. *Calcular RB*: Se generó la capa del Riesgo Básico mediante la fórmula del Cuadro 33. En la calculadora de campos del SIG, la fórmula utilizada fue  $0,9 * (1 + \sin(("Coef\_A\_Raster@1" * 1,72 * "PSE\_interpolado@1" - 90) * (3,14/180)))/2$ . El resultado es la capa raster llamada Riesgo\_Básico
7. *Calcular FT por estación*: Se calculó en una hoja de cálculo el Factor Temperatura (FT) para cada punto de estación meteorológica, utilizando la fórmula del Cuadro 35. Al final de este proceso se exportaron las coordenadas de cada estación con el FT calculado en un archivo CSV llamado FT.csv
8. *Crear capa FT*: Se creó dentro del SIG una capa de puntos a partir del archivo FT.csv. Esta capa se nombró FT\_Puntos
9. *Interpolar FT*: Se interpolaron los valores del FT utilizando un Kriging ordinario, y se generó la capa raster Factor\_T.
10. *Calcular FHR por estación*: Se calculó en una hoja de cálculo el Factor Humedad Relativa (FHR) para cada punto de estación meteorológica, utilizando la fórmula del Cuadro 34. Al final de este proceso se exportaron las coordenadas de cada estación con el FHR calculado en un archivo CSV llamado FHR.csv
11. *Crear capa FHR*: Se creó dentro del SIG una capa de puntos a partir del archivo FHR.csv. Esta capa se nombró FHR\_Puntos
12. *Interpolar FHR*: Se interpolaron los valores del FHR utilizando un Kriging ordinario, y se generó la capa raster Factor\_HR.
13. *Calcular Riesgo de Fuego*: Se generó la capa del Riesgo de Fuego mediante la fórmula del Cuadro 36. En la calculadora de campos del SIG, la fórmula utilizada fue  $"Riesgo\_Basico@1" * "Factor\_T@1" * "Factor\_HR@1"$ . El resultado es la capa raster llamada Riesgo\_de\_Fuego

Vale mencionar que en las interpolaciones de los puntos 5, 9 y 12 existen una multiplicidad de parámetros de interpolación que inciden en el resultado final.

## 8.5. Pruebas

La capa Cob\_Vegetal, que se utilizó como entrada de la actividad 1 de la Figura 11, es una capa de polígonos elaborada por la Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial (DINOT), la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) y la Dirección General de Recursos Naturales, que se clasifican

bajo la metodología *Land Cover Classification System* (LCCS) de la *Global Land Cover Network* (GLCN) de la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) a partir de imágenes Landsat 5TM 2007/2008 para todo el país. Esta capa muestra la cobertura del suelo (e.g. cursos de agua, monte nativo, forestación, cultivos agrícolas, campo natural, arenas) para Uruguay a escala 1:100.000.

El LCCS es un método de clasificación exhaustivo, estandarizado y apriorístico, que puede ser aplicado para cualquier iniciativa de clasificación de coberturas de la tierra en cualquier parte del mundo. Utiliza un conjunto de criterios de diagnóstico independientes que permiten una correlación con leyendas y clasificaciones ya existentes. Este sistema representa la cobertura de la tierra mediante objetos básicos en lugar de categorías, que son denominados clasificadores, los que son elegidos mediante simples criterios fisionómicos (e.g. árboles, arbustos, construcciones). La leyenda final del Uruguay está compuesta por 46 clases agregables en 17 clases que integran los 17 tipos de cobertura de la tierra, y es representada en una base de datos por estos clasificadores u objetos básicos, formando un sistema complejo con una descripción completa de la cubierta del suelo [15].

La Figura 12 muestra el mapa con las mencionadas clases de cobertura vegetal.

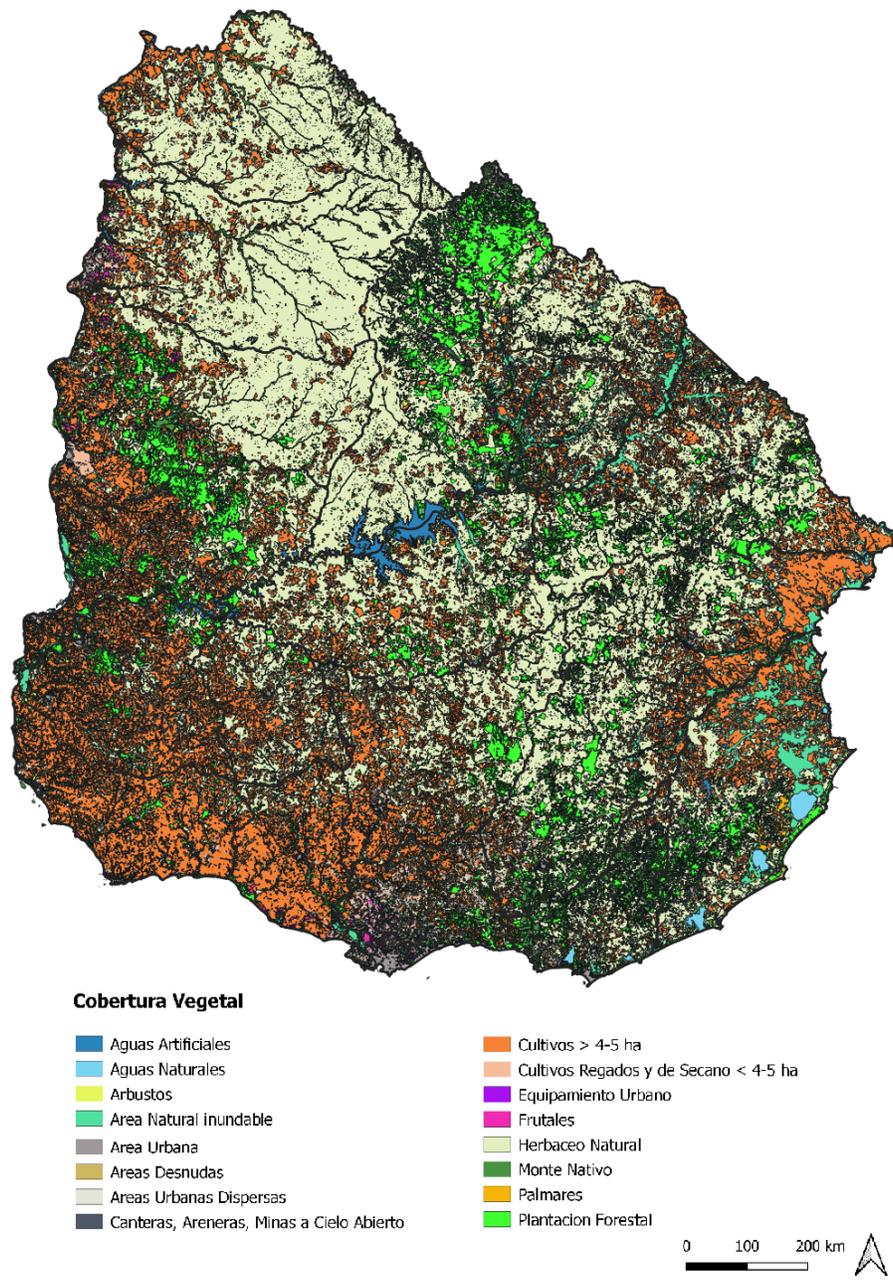


Figura 12: Cobertura Vegetal

Usando como base esta clasificación, se reagruparon las clases de naturaleza

similar a los efectos de generar un listado menor de clases, y se le asignaron un valor de inflamabilidad a cada una de ellas, basado en la metodología de los modelos de combustibles de Rothermel [65] y Albini [4]. Este modelo describen 13 modelos diferentes clasificados en 4 grupos, como se presentó en el Cuadro 3 de la Subsubsección 4.3.1.

La reagrupación de clases y la asignación de un valor de inflamabilidad para el Uruguay quedaron conformadas de la siguiente forma:

Clase	Modelo	Coef
1. Cuerpos de Agua <i>Aguas superficiales</i> <i>Aguas naturales</i>	No aplica	0.0
2. Áreas Desnudas e Inundables <i>Área desnuda</i> <i>Área natural inundable</i>	No aplica	0.1
3. Área Urbana <i>Área urbana</i> <i>Equipamiento urbano</i> <i>Canteras, areneras, minas a cielo abierto</i>	No aplica	0.2
4. Áreas Cultivadas y Manejadas <i>Cultivos &gt; 4-5 ha</i> <i>Cultivos regados y de secano &lt; 4-5 ha</i> <i>Frutales</i> <i>Palmares</i>	1	0.4
5. Áreas Urbanas Dispersas	3	0.6
6. Vegetación Natural <i>Arbustos</i> <i>Herbáceo natural</i> <i>Monte nativo</i>	4 al 6	0.8
7. Plantación Forestal	7	1.0

*Referencias:*

*Coef: coeficiente de inflamabilidad*

*Modelo: Asignación de los modelos de Rothermel.*

Figura 13: Clases de vegetación y coeficientes de inflamabilidad. Elaboración propia

No se debe esperar que un modelo de combustible estándar coincida perfectamente con las observaciones del comportamiento del fuego, ya que han sido diseñados para una aplicación general. Crear un modelo de combustible personalizado es una tarea difícil. En la mayoría de los casos, la necesidad de un modelo de combustible personalizado se identifica solo después de descubrir diferencias significativas entre las observaciones de comportamiento del fuego y las predicciones realizadas con uno o más modelos de combustible estándar.

Estos coeficientes de inflamabilidad pretenden constituir una base razonable para el cálculo del índice, pero podrían revisarse y mejorarse en un trabajo

futuro.

La Figura 14 muestra los coeficientes de inflamabilidad definidos en la Figura 13 sobre el territorio.

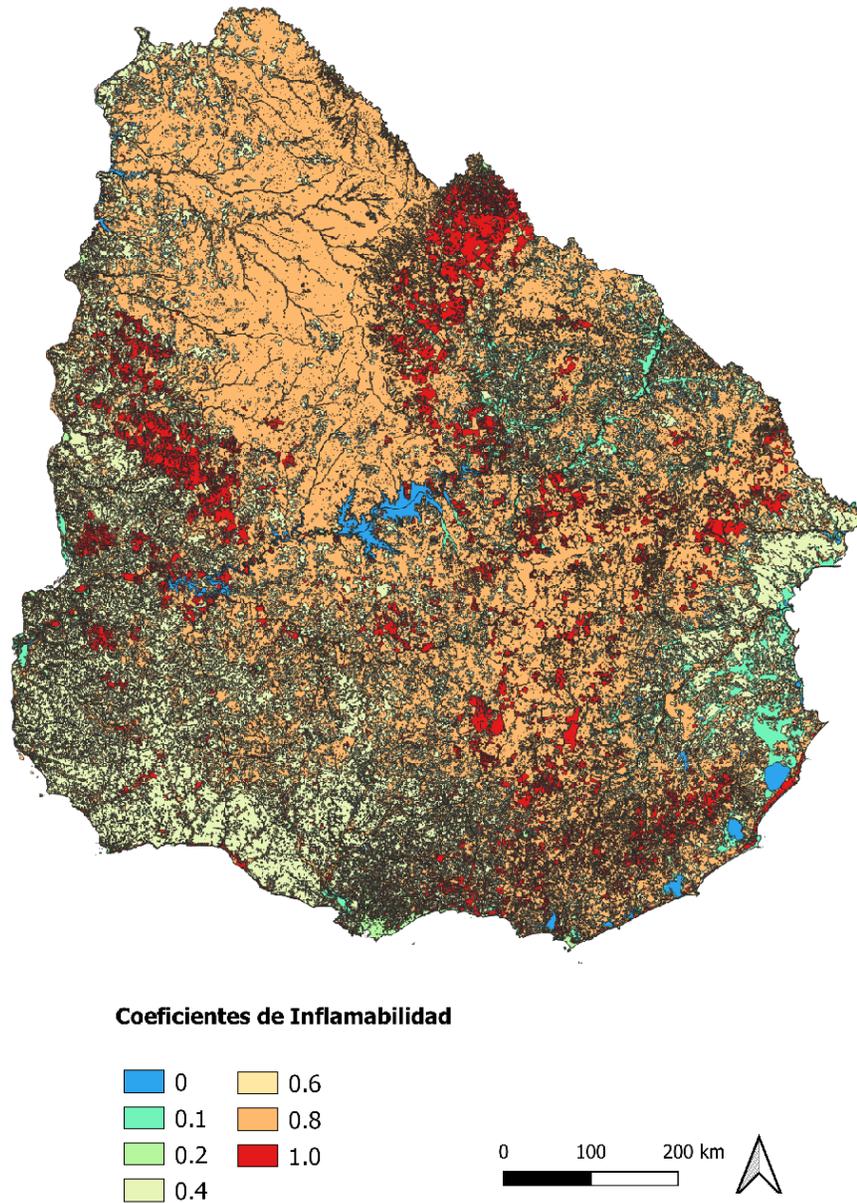


Figura 14: Mapa de coeficientes de inflamabilidad. Elaboración propia

Como se aprecia en la Figura 11, la generación de la capa Coef\_A\_Raster se

realiza por única vez y después se utiliza como una entrada relativamente estable. Se debería validar de forma periódica (por ejemplo anualmente) la existencia de una capa actualizada de cobertura vegetal, para mantener la frescura de estos datos. El resto de las actividades se deben realizar de forma diaria.

A los efectos de validar el comportamiento del índice se eligió una fecha de implementación en la cual ocurrió un incendio forestal en la zona costera de Rocha. La fecha elegida fue el 9 de diciembre de 2011, día en que ocurrió un incendio de considerables dimensiones en la zona de Punta del Diablo sobre la ruta 9. Según datos de bomberos en distintos medios de prensa, el incendio estuvo circunscrito entre el km 286 y el 296 de la ruta 9, quemándose más de 1200 hectáreas. En Uruguay el mayor porcentaje de incendios forestales tiene lugar en zonas costeras, las cuales tienen gran valorización por su uso turístico y/o urbano [31].

El mapa de la Figura 15 muestra el PSE\_Interpolado, resultado de las actividades 3, 4 y 5 de la Figura 11, para el 09/12/2011. Los valores más altos de PSE se localizan sobre la región norte del país, mientras que al suroeste se encuentran los valores más bajos. Si bien para este caso se utilizó el método de interpolación Kriging Ordinario con una determinada combinación de parámetros, es recomendable que se prueben otras combinaciones de parámetros y otros interpoladores, a los efectos de poder comparar interpoladores, y elegir el que mejor predicción realice de los valores faltantes. Estas pruebas exceden el alcance del presente trabajo.

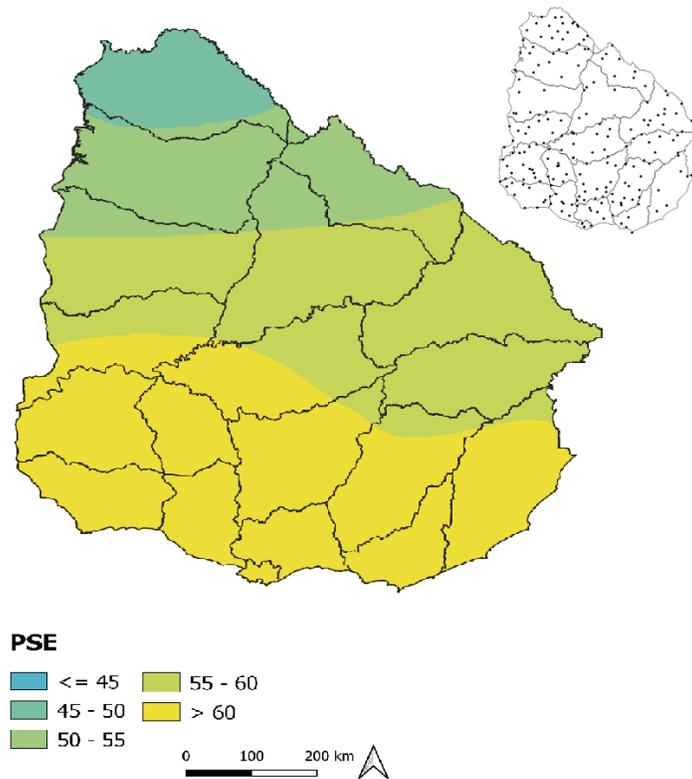


Figura 15: Interpolación del PSE para el 09/12/2011. Elaboración propia

Luego de obtener la capa de PSE y la cobertura vegetal con la asignación de los valores de inflamabilidad, se calculó el *Riesgo Básico* (RB), según la fórmula del Cuadro 42. Esta fórmula fue modificada respecto a la planteada por el *Risco do Fogo*, debido a que la fórmula de este índice no es monótona creciente. Una premisa debería ser que si el coeficiente A aumenta, el riesgo debe aumentar, por lo cual la fórmula debe ser monótona creciente. Una forma de cumplir con esto es que la parte de la fórmula a la cual se le aplica la función seno, debe variar en un intervalo creciente de la función seno, por ejemplo, dentro del intervalo de  $-90$  a  $90$ . Entonces, si se debe cumplir que  $-90 < A * PSE - 90 < 90$ , se tiene que se debe cumplir  $0 < A * PSE < 180$ . Tanto A como PSE son valores no negativos, por lo que no es necesario detenerse en la primera desigualdad. Y como el máximo PSE es 105, se debe cumplir que  $A < (180/105)$ , es decir  $A < 1.72$ . Es evidente que esto alguna vez lo tuvieron en cuenta en el *Risco do Fogo*, ya que tienen un A exactamente de 1.72, pero en algún momento decidieron tener valores superiores de A, lo que genera una función no monótona creciente y se da la paradoja de que con mayores valores de A se obtiene un riesgo menor. En resumen, el valor de A debe ir de 0 a 1.72, y para simplificar la clasificación, se tomó la convención de normalizar, generando clases con valores del 0 al 1, y dentro de la fórmula

multiplicar el A por 1.72.

Este procedimiento se logra mediante una operación de capas realizada en QGIS con la sintaxis presentada en el Cuadro 42.

$$RB = 0,9 * (1 + \sin(("Cofe\_A\_Raster@1" * 1,72 * "PSE\_Interpolado@1" - 90) * (3,14/180))) / 2$$

Cuadro 42: Cálculo del Riesgo Básico

En la Figura 42 se muestra el mapa de Riesgo Básico, correspondiente a la salida de la actividad 6 de la Figura 11.

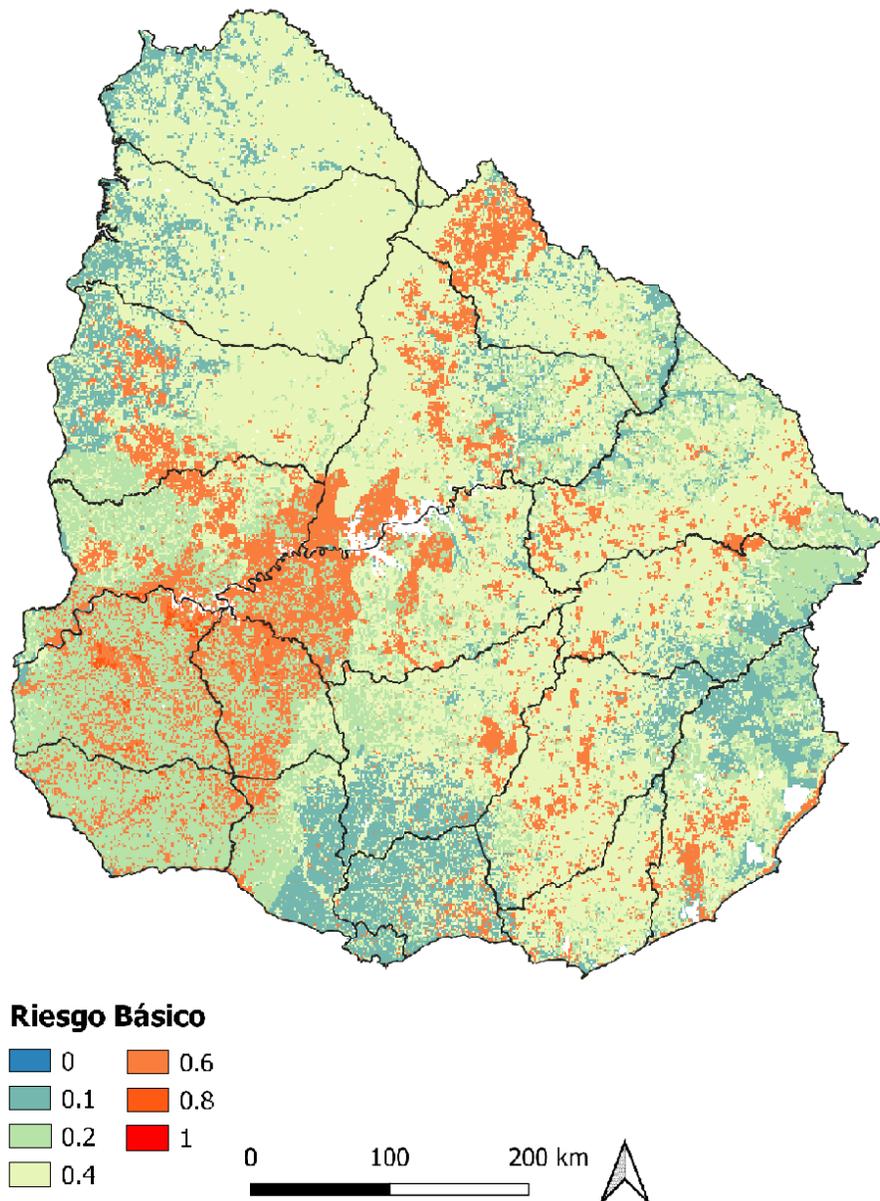


Figura 16: Mapa del Riesgo Básico. Elaboración propia

Para terminar el procedimiento es necesario corregir el mapa de riesgo por temperatura y humedad relativa.

El mapa de la Figura 17 muestra el factor de temperatura, calculado según la

fórmula del Cuadro 35, interpolado para esa fecha. El método de interpolación utilizado fue Kriging Ordinario.

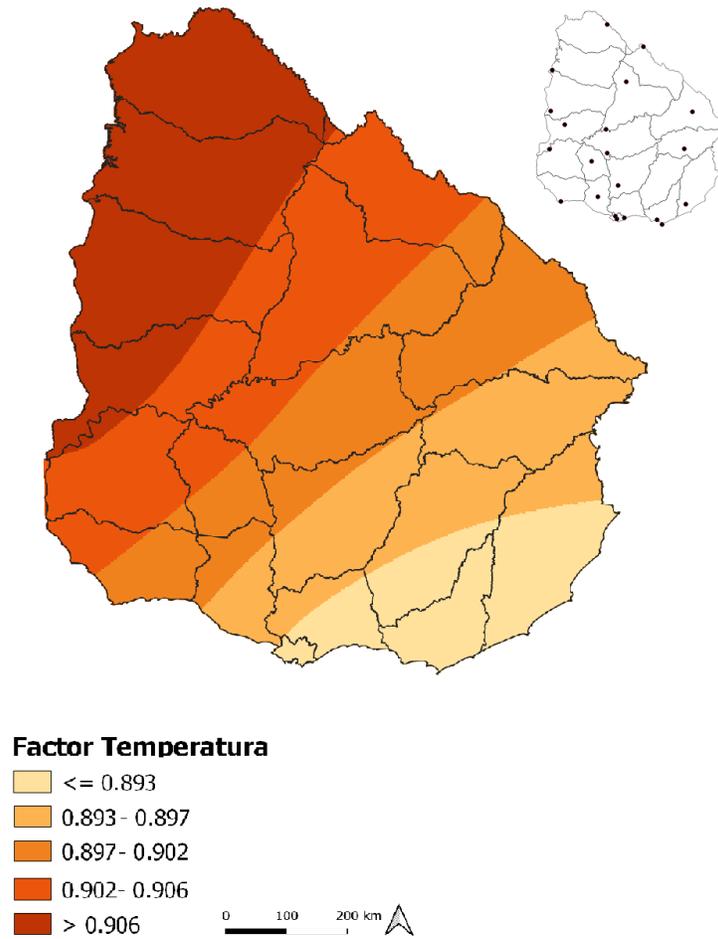


Figura 17: Factor de Temperatura. Elaboración propia

El mapa de la Figura 18 muestra el factor de humedad relativa, calculado según la fórmula del Cuadro 34, interpolado para esa fecha. El método de interpolación utilizado fue Kriging Ordinario.

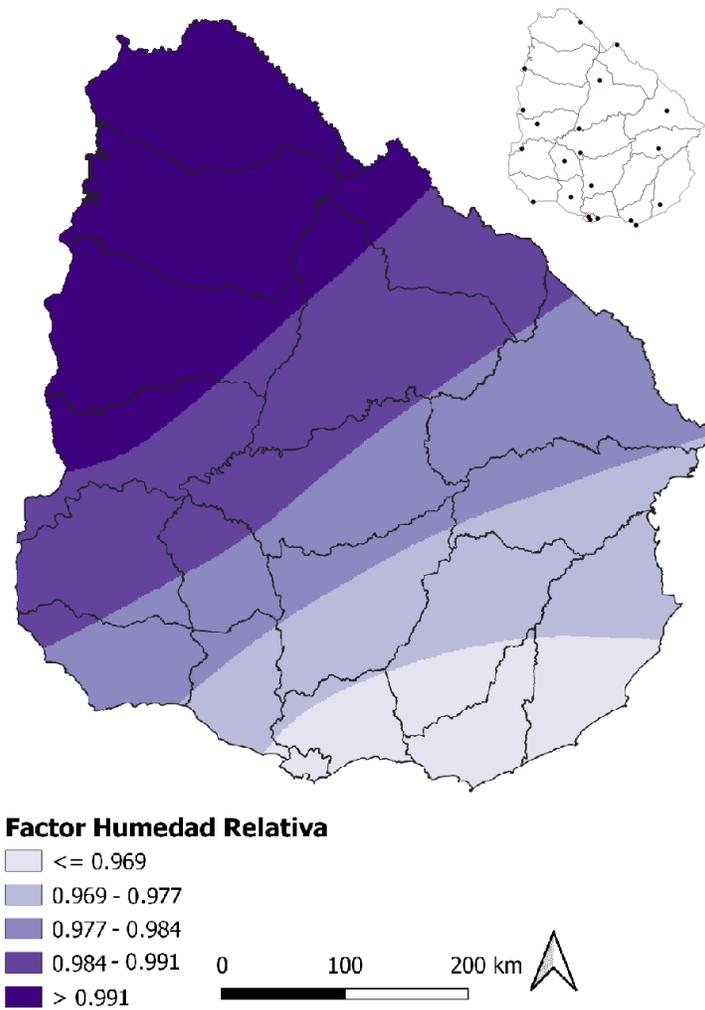


Figura 18: Factor de Humedad relativa. Elaboración propia

Finalmente, la Figura 19 muestra el mapa de Riesgo Final para la fecha 9 de diciembre de 2011. Este mapa es el producto del Riesgo Básico corregido por temperatura y por humedad relativa.

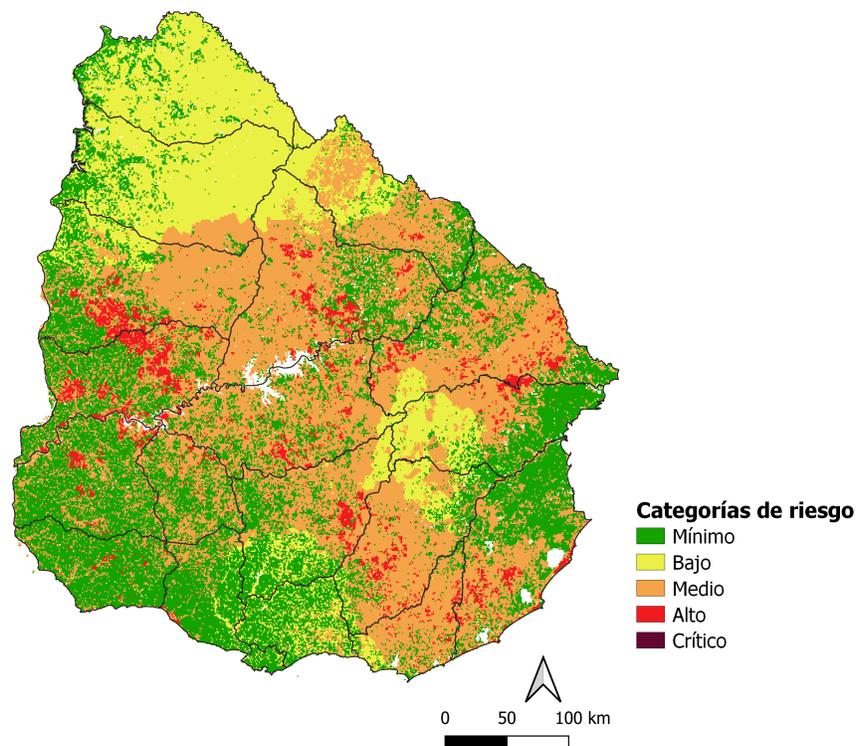


Figura 19: Mapa de Riesgo Final. Elaboración propia

## 8.6. Limitaciones y problemas

La calidad del producto final dependerá de decisiones de diseño, como las asignaciones de coeficientes de inflamabilidad, las fórmulas de los cálculos y los interpoladores a utilizar, pero también de la calidad de las variables de entrada. Existen limitaciones de tiempo que impiden la realización de pruebas exhaustivas para optimizar las decisiones de diseño. Existen también limitaciones de calidad de las variables meteorológicas que se utilizan como datos de entrada: precipitación, temperatura y humedad relativa. Se detectaron problemas de cobertura espacial, cobertura temporal, precisión y correctitud. Estos problemas se describen a continuación variable por variable.

En el caso de la precipitación, se utilizaron algunas de las estaciones pertenecientes a INUMET. Como se ilustra en la Figura 15, distribuidas sobre todo el país, en algunas zonas con mayor densidad que en otras. Se consideraron las estaciones cuyas series de información estaban «suficientemente completas» en el período de interés de 120 días. La decisión de cuándo una serie de datos está «suficientemente completa» es más compleja de lo que parece a simple vista. Al tratarse de una prueba manual, el criterio de aceptación de cada serie puede

estar implícito en un proceso humano de deliberación caso a caso, pero si la generación del índice fuera a automatizarse, se debe explicitar un criterio de aceptación de cada serie. Es interesante observar que el establecimiento de un criterio de aceptación muy estricto para asegurar una alta cobertura temporal, podría descartar una fracción importante de las series, resultando en una baja cobertura espacial. A la inversa, es posible que para poder lograr una alta cobertura espacial, se deba relajar bastante el criterio de aceptación de cada serie, resultando en una baja cobertura temporal. En resumen, hay un balance entre las coberturas espacial y temporal que se debería tener en cuenta, y los criterios de aceptación podrían suponer la resolución de problemas no triviales de optimización.

Las estaciones pluviométricas consideradas son todas convencionales, es decir, no automáticas, y miden la precipitación acumulada de las últimas 24 horas que se debe registrar a las 7 AM. Existen problemas de precisión debido a que muchas veces no se registran los decimales, y también problemas de correctitud debido a que muchas veces los registros no se realizan a las 7 AM. Una estrategia para mitigar este problema podría ser incorporar datos de sensores a bordo de satélites, estrategia de la que existen antecedentes debido a que la precipitación es una variable compleja de medir adecuadamente con instrumentos desde la superficie terrestre, debido a su gran variabilidad de pequeña escala en el espacio y el tiempo [40].

En el caso de la temperatura y la humedad relativa, las estaciones utilizadas son menos que las disponibles para la precipitación y esto es problema que impacta en la interpolación de la variable. Son muy pocos puntos para construir campos espaciales tanto de temperatura como de humedad relativa.

Las dos variables temperatura y humedad relativa tienen problemáticas similares. En primer lugar, la densidad de estaciones a priori parece ser insuficiente, ya que si bien la temperatura y la humedad relativa son variables «más suaves» que la precipitación, las 21 estaciones meteorológicas ubicadas la mayoría de ellas al sur del Río Negro, dejan amplias zonas del territorio a más de 100km de cualquier estación.

Los datos de la humedad relativa son obtenidos de la mismas estaciones que los de temperatura. La humedad relativa no es una variable de medida directa sino que es calculada, se define la humedad relativa como el cociente expresado en porcentaje, entre la tensión de vapor observada y la tensión saturante del vapor con respecto al agua a la misma temperatura y presión. El aire está saturado cuando la humedad relativa es del 100 % [55].

Para una implementación periódica de este índice sería necesario fijar controles de calidad a escala diaria de las variables meteorológicas, incluyendo métodos estadísticos para realizar tests de homogeneidad. Esto es un desafío en sí mismo ya que, al contrario de lo que ocurre a escala mensual y anual, no existe consenso en la comunidad científica sobre qué metodologías emplear a escala diaria. Existen trabajos que ofrecen algunas propuestas para este tipo de tratamientos [62].

Una alternativa que parece viable para dar solución a la escasez de información en superficie, podría ser considerar la tecnología de sensoramiento remoto,

e incluso trabajar de forma combinada los datos obtenidos de sensores remotos con los obtenidos en superficie [30].

Como se mencionó, la realización de pruebas exhaustivas para optimizar las decisiones de diseño requerirían de un tiempo considerable del que no se dispone. Sin embargo, a los efectos de visualizar al alcance del problema, se realizó el interpolado del PSE con tres métodos, en dos casos utilizando Kriging Ordinario, cambiando parámetros entre ellos, y en el tercer caso utilizando el Ponderado por el Inverso de la Distancia. En la Figura 20 se presentan los mapas que resultan de estos tres métodos de interpolado del PSE.

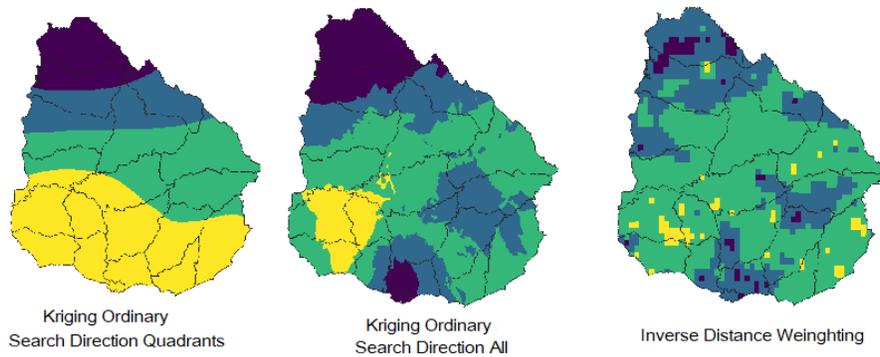


Figura 20: Distintos Interpolados del PSE. Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 20, un cambio en el algoritmo de interpolado, o aún en algún parámetro, genera diferencias significativas en los valores de la superficie.

En el caso de la cobertura vegetal, la complejidad radicó en la asignación de un coeficiente de inflamabilidad a la distintas clases de vegetación. La materia vegetal es siempre combustible, pero no siempre es inflamable. La inflamabilidad varía según la especie y el contenido de humedad [9]. En otras partes del mundo esto no es un problema ya que disponen de laboratorios de fuego como por ejemplo el que existe en España en el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria o el Laboratorio de Incendios Forestales del Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Federal de Paraná, donde realizan pruebas del comportamiento del fuego y de inflamabilidad. Para este trabajo, la única opción fue realizar esa asignación de forma teórica, con base en el trabajo de Rothermel y Albini como se describió en la Figura 7.

### 8.7. Análisis de resultados

El objetivo de este trabajo era construir un índice que predijera el riesgo de incendio. La prueba mínima consistió en generar el índice con su predicción para el 9 de diciembre de 2011, fecha en la cual ocurrió un incendio en la zona de Punta del Diablo. Vale mencionar que si la predicción asigna un valor de riesgo

«Mínimo» o «Bajo» donde ocurrió un incendio, la capacidad de predicción del índice se refuta de forma categórica; pero la capacidad de predicción del índice no se confirma de forma categórica aún en el caso de que la predicción hubiera asignado un valor «Crítico». Esto es especialmente importante debido a que se realizaron pocas pruebas, y la confianza en la efectividad del índice se debe construir de forma incremental a través de numerosas pruebas.

La Figura 21 presenta un acercamiento de la Figura 19 para la zona de Punta del Diablo. Los valores del índice en esa zona alcanzaron en general las categorías de riesgo «Alto».

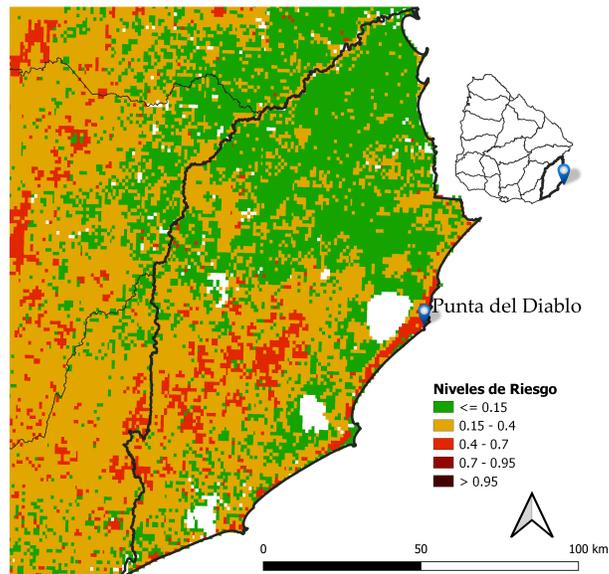


Figura 21: Riesgo de Fuego para la zona de Punta del Diablo el 09/12/2011. Elaboración propia

En Uruguay el mayor porcentaje de incendios forestales tiene lugar en zonas costeras, las cuales tienen gran valorización por su uso turístico y/o urbano. Si bien aquí no hay grandes áreas con explotaciones forestales de producción, la misma puede ser considerada como un área piloto para extrapolar la experiencia y mejorar sus resultados en trabajos futuros. En esta zona predominan los bosques de recreo que son los de más alto riesgo considerando su uso, falta de limpieza de la hojarasca y de control [30]. Justamente esta zona de ejemplo de Punta del Diablo, ubicado en el departamento de Rocha, presenta algunas características que a priori confieren a la zona mayor vulnerabilidad ante los incendios forestales, por ser una de las playas con gran interés turístico y frecuentado en temporada estival por gran cantidad de visitantes. En esta zona existen implantaciones forestales como el pino y *Acacia Trinervis*, la que se naturalizó y extendió rápidamente por toda la costa atlántica [57].

## 9. Conclusiones y trabajo futuro

Según Pausas, es necesario cambiar una visión estática, antropocéntrica y poco precisa de los incendios forestales, según la cual éstos serían un fenómeno humano que destruye la naturaleza. En este sentido debe comprenderse su afirmación de que la relación entre nuestra sociedad y los incendios forestales es «precaria». Los incendios están y seguirán estando presentes en nuestros sistemas ecológicos y forestales, por lo cual se requiere de un cambio de paradigma para tender hacia una gestión sostenible. Parte de este cambio de paradigma consiste en dejar de percibir los incendios como un problema externo que se debe eliminar. Integrando la historia natural de nuestros ecosistemas con las necesidades de la sociedad se pueden conseguir paisajes con regímenes de incendios ecológica y socialmente sostenibles. El cambio de paradigma se hace más urgente con el cambio global, ya los cambios en el régimen de incendios sólo se pueden abordar si se integran los incendios y el fuego dentro de nuestros sistemas socio-ecológicos. A una escala temporal más reciente (humana), los regímenes de incendios se han ido modificando según el uso del fuego, los cambios antropogénicos del paisaje, de la ganadería/pastoreo, de las políticas de gestión, y finalmente, los cambios climáticos recientes (antropogénicos). Todos estos cambios han ido modificando el régimen de incendios en diferentes direcciones, a veces de manera abrupta. Por ejemplo, el aumento de la población está asociado a un mayor número de igniciones; el incremento de la agricultura está asociado a la disminución de los incendios; y el reciente abandono rural conllevó un incremento de éstos, especialmente de su tamaño. De manera que la dinámica del régimen de incendios está fuertemente ligada a cambios socio-económicos. Estudiar la variabilidad histórica en el régimen de incendios es importante para entender nuestros paisajes actuales y sus posibles dinámicas futuras [59].

El fuego es un componente integral de la estructura y funcionamiento de muchos ecosistemas del mundo. El fuego inicia y finaliza procesos sucesionales, controla la estructura de edades, la composición y estructura de la vegetación, el ciclado de nutrientes, y la productividad, entre otros muchos procesos. El inicio y propagación de un incendio depende fuertemente de la estructura e inflamabilidad de la vegetación que es una característica dinámica en el tiempo que puede variar a características propias de la dinámica de regeneración y sucesión. A lo largo de la sucesión post-incendio, las comunidades sufren cambios composicionales y estructurales que cambian su inflamabilidad en el tiempo. Este cambio tiene importantes implicancias a escala de paisaje ya que determina qué tipo de retroalimentación existe entre la inflamabilidad de la vegetación y el fuego. En las comunidades donde la inflamabilidad aumenta después de un incendio y luego disminuye a medida que el rodal envejece, se produce una retroalimentación positiva entre el fuego y la vegetación. Es decir que al poco tiempo de ocurrido un incendio la comunidad es lo suficientemente inflamable para sostener uno nuevo, y a medida que pasa el tiempo es menos inflamable. En otras palabras, el fuego provoca más fuego [74].

Los regímenes de incendios forestales son impulsados principalmente por el clima, los combustibles y las personas. Todos estos factores son dinámicos y sus

interacciones variables crean un mosaico de regímenes de incendios alrededor del mundo. El cambio climático tendrá un impacto sustancial sobre los regímenes de incendios futuros en muchas regiones del planeta. Las investigaciones actuales sugieren un aumento general en superficie afectada y ocurrencia de incendios, pero hay una gran variabilidad global [25].

Un índice de riesgo de incendio es un instrumento que aporta en el manejo del riesgo, en este caso concretamente del riesgo de incendios forestales. En Uruguay el riesgo es un tema escasamente considerado hasta hace muy poco tiempo, si bien legislativamente en el año 1995 se creó el Sistema Nacional de Emergencias (SNE), mediante el decreto N°103/95<sup>6</sup>, con el cometido principal de atender las grandes emergencias que pudieran afectar al país, coordinando acciones para brindar ayuda una vez desencadenada una emergencia. Sus cometidos han evolucionado en el tiempo y en el año 2009 se crea por ley el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE) por medio de la Ley N° 18.621<sup>7</sup>. Éste pasa a ser un sistema público de carácter permanente, y define su propósito enfocado en la protección de las personas, bienes de significación y el medio ambiente ante eventos de desastre. Esto significa que además de brindar ayuda post evento debe de actuar preventivamente [32].

Uruguay en los últimos años ha venido trabajando en el monitoreo de algunas de las mayores amenazas que nos afectan, como las inundaciones, y desde los gobiernos municipales, así como desde la Universidad de la República (UdelAR) están trabajando en el monitoreo de estos eventos [60]. Incluso se está trabajando en el desarrollo y la implementación de Sistemas de Alerta Temprana para distintas regiones del país, como ocurre en la ciudad de Durazno [19]. Por otro lado nuestro país también se ve afectado por fenómenos meteorológicos adversos como por ejemplo las olas de calor, estos eventos extremos generan grandes pérdidas en la producción agropecuaria, inciden fuertemente en el consumo de energía eléctrica, afectan la salud de la población e impactan en los ecosistemas [26]. En lo que respecta a los incendios forestales, Uruguay no es ajeno a ellos, ocurren mayoritariamente en la zona costera del país y en temporada estival, donde se concentra la población por motivos turísticos. Paisajísticamente la vegetación de estas zonas es forestación costera no productiva, con escasos o nulos controles sobre la misma, lo que la posiciona como una zona muy vulnerable frente a la amenaza de un incendio. Los departamentos en donde se han dado los principales incendios en los últimos años son Canelones, Maldonado y Rocha [32]. En nuestro país, hasta el momento se utiliza únicamente el índice Nesterov para calcular el riesgo de ignición, implementado por INUMET. Este producto se disponibiliza en el verano, entre los meses de diciembre y marzo. Esta es una herramienta que presenta ventajas como por ejemplo su facilidad de cálculo, pero también desventajas ya que se trata de una interpolación de variables puramente meteorológicas, y no incorpora ninguna variable del territorio. Debido a esto resulta muy poco precisa espacialmente, lo que podría limitar las posibilidades de planificación y gestión territorial. Disponer de más y mejores

---

<sup>6</sup> Disponible en <https://www.imp.o.com.uy/bases/decretos-originales/103-1995>

<sup>7</sup> Disponible en <https://www.imp.o.com.uy/bases/leyes/18621-2009>

instrumentos de gestión del riesgo de incendios forestales, le aportaría al país en este sentido.

Por otra parte, desde distintas disciplinas se proyectan escenarios para Uruguay que lo posicionan en un nivel de vulnerabilidad por lo menos mayor al que hoy se encuentra, por ejemplo los cambios en los usos del suelo. Durante las últimas décadas, se ha acelerado la conversión de pastizales en tierras de cultivo entre las que están las plantaciones forestales exóticas, principalmente eucaliptos. El sector forestal, se ha visto alentado entre otros motivos por las reducciones de impuestos durante las últimas décadas, en determinadas zonas y tipos de suelos, promovidas por la Ley N° 15.939<sup>8</sup> promulgada en el año 1987. Esta política desencadenó un pronunciado desarrollo de plantaciones forestales exóticas, que se traduce en mayor combustibilidad en el espacio [14].

En Uruguay, el principal sector económico que impulsa el cambio de uso de la tierra es la agricultura (cultivos y plantaciones forestales exóticas), que explica el 93 % de la cubierta terrestre modificada de Uruguay; el restante 7 % son áreas urbanas, infraestructuras y cuerpos de agua artificiales. Estos cambios en los usos de la tierra no es una dinámica que sólo ocurra en territorio uruguayo, es compartida en la región mostrando un crecimiento lento y gradual de las tierras agrícolas durante la década de 1990, y con una expansión acelerada desde la década del 2000. Y justamente es el sector forestal con plantaciones exóticas, básicamente de eucaliptos y pinos, uno de los grandes impulsores en esta aceleración. También la soja, pero en este contexto de incendios no afectaría, por lo menos no directamente, en la combustibilidad del territorio. Algunas investigaciones proyectan un escenario para el 2030 en el uso de la tierra, con incrementos de los cultivos y de las plantaciones forestales, las áreas de cultivos cubrirían alrededor del 32,7 % del territorio y las plantaciones forestales exóticas alrededor del 15,2 % [14]. En resumen, bajo este escenario se está aumentando la combustibilidad del país, en la ecuación del riesgo, se aumentaría la vulnerabilidad del territorio.

Como los impactos que pueden tener los incendios forestales no se contienen dentro de límites políticos, podría llegar a ser útil definir un sistema de monitoreo regional de estos fenómenos, así como lo maneja por ejemplo Europa, a través del Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales. También podría pensarse a nivel nacional en el desarrollo de uno o varios índices de riesgo de incendios forestales, por ejemplo enmarcarlo dentro de un proyecto de participación interinstitucional e interdisciplinario. El disponer de más de un índice puede incluso ayudar a determinar que en diferentes regiones sean más efectivos diferentes índices.

Uruguay tiene un nivel de madurez muy inicial en cuanto al manejo del fuego. Por un lado podría avanzarse en las políticas y planes de manejo del fuego, y por otro podrían realizarse esfuerzos de concientización destinados a mitigar el riesgo reduciendo la amenaza antrópica. Un componente importante de un plan de manejo del fuego, y que a priori no sería costoso de implementar, sería un sistema de monitoreo post incendios que permita generar información histórica

---

<sup>8</sup>Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>

sobre el comportamiento del fuego. Sistematizar todas las variables relevantes de los eventos de incendios, incluyendo área quemada, variables meteorológicas, tipos de vegetación del lugar del incendio, descripciones del comportamiento del fuego, imágenes satelitales y fotografías aéreas, sería un insumo importante para diseñar y validar más y mejores instrumentos de prevención.

En lo que respecta a instrumentos legales, Uruguay tiene la Ley N° 15896<sup>9</sup>, promulgada el 15/09/1987, que regula las habilitaciones que otorga la Dirección Nacional de Bomberos y el Decreto N° 436/007<sup>10</sup> promulgado el 19/11/ 2007 y titulado «Plan general de Acción para la Prevención Alerta y respuesta a los incendios forestales», que en su artículo 4 establece que: «*Las autoridades públicas y la población en general tendrán en cuenta el ÍNDICE DE RIESGO DE INCENDIO FORESTAL para la programación y realización de cualquier actividad que directa o indirectamente implique riesgo de incendio. Dicho dato (I.R.I.F.) será establecido a diario por la Dirección Nacional de Meteorología.*».

La propuesta de la Sección 8 pretende representar un aporte desde el punto de vista teórico, que podría utilizarse como base para un nuevo índice de riesgo de incendio en el Uruguay. Una de sus principales ventajas es que incorpora la cobertura vegetal, con una reclasificación para asignar coeficientes de inflamabilidad. Como puede verse en la Figura 11 los requerimientos del índice son bastante simples, por un lado una capa de cobertura vegetal reclasificada que podría reprocesarse anualmente, y por otro lado variables de precipitación, temperatura y humedad relativa que deberían utilizarse de forma diaria. Por otro lado, los resultados preliminares muestran que el índice parece resultar efectivo, si bien en ningún caso de prueba se obtuvieron valores «Críticos».

Es necesario insistir en que la propuesta de este trabajo es simplemente un prototipo, que parece ser adecuado para Uruguay, pero que debe de ser testeado y optimizado.

También es necesario destacar que el desarrollo de un índice de riesgo de incendio real no es una tarea sencilla. Si bien la literatura muestra un consenso razonable sobre cuáles son las variables que inciden en los incendios forestales, no hay acuerdo sobre las ecuaciones que deberían emplearse para calcular una medida que permita estimar el riesgo de su ocurrencia. De esta situación deriva que existan tantas variantes de cálculo entre los índices. También se debe reconocer que algunas diferencias son explicables por la disponibilidad de variables.

Por otra parte la espacialización de medidas discretas en el espacio también presenta un gran desafío. Uno de los principales problemas es la selección de métodos de interpolación adecuados para cada variable y/o cálculo intermedio. También se debería tratar de determinar una resolución espacial mínima, de forma que cada punto del territorio tenga candidatos para interpolar en un determinado radio. Esta resolución espacial mínima se debería determinar para cada variable, y dependiendo de la variable quizá para cada estación del año. Por ejemplo, para que una interpolación de precipitación fuera representativa, podría necesitarse que todo punto del territorio tuviera una medida observada

<sup>9</sup> Disponible en <https://www.imp.o.com.uy/bases/leyes/15896-1987>

<sup>10</sup> Disponible en <https://www.imp.o.com.uy/bases/decretos/436-2007>

a menos de una determinada distancia  $D$ , y ésta distancia podría ser diferente en verano y en invierno. La decisión de incorporar variables a partir de estimaciones de imágenes satelitales, podría implicar ofrecer mayor cobertura espacial y temporal, al precio de sacrificar precisión en los valores.

Para el caso en que se desee implementar un índice diario se debe tomar en consideración la disponibilidad de todas las variables de entrada con anticipación al momento en que el índice debe ser calculado. Esto implica determinar si las variables observadas, estimadas o pronosticadas están disponibles en tiempo real, o si existen horas determinadas en las que se reportan los datos observados y estimados, y se generan los pronósticos.

Finalmente, este trabajo puede continuarse en varias líneas. Por un lado, podría realizarse un análisis más exhaustivo de los índices de inflamabilidad, lo que idealmente requeriría del trabajo conjunto de biólogos, agrónomos y geógrafos con perfil en geotecnologías. Por otro lado, podrían evaluarse otras formas de parametrizar el *Risco do Fogo* o incluso otros índices meteorológicos para combinar con la capa de inflamabilidad de la cubierta vegetal. También podría analizarse el problema de la interpolación, con el objetivo de determinar el mejor interpolador para cada variable, para cada cálculo intermedio y quizá para cada estación del año. Otra línea de trabajo interesante sería determinar umbrales mínimos de resolución espacial para cada variable observada. Incluso podría analizarse la factibilidad de utilizar estimaciones de imágenes satelitales o pronósticos, en lugar de datos observados. Otro problema no menor digno de ser analizado es el de la completitud de las series, ya que en índices como el *Risco do Fogo* donde se necesitan series de 120 días de precipitación, la falta de datos podría constituir un serio problema. En estos casos se debería analizar el balance entre tener pocas series «más completas», lo que podría generar una pérdida de cobertura espacial, y utilizar una mayor cantidad de series «menos completas», lo que podría generar una pérdida de calidad de datos.

Espero que este trabajo realice un pequeño aporte en el área de los índices de riesgo de incendios en general, y aplicados al Uruguay en particular, y que sirva para tomar como base de futuras y más profundas investigaciones.

## Referencias

- [1] Marcel Achkar, Ana Domínguez, and Fernando Pesce. El paisaje como objeto de enseñanza de la geografía. *Revista de la Educación del Pueblo*, page 3538, 2009.
- [2] Inmaculada Aguado, Ana M. Camarasa Belmonte, Emilio Chuvieco Salinero, M. Pilar Martín Isabel, and David Cocero Matesanz. Estudio comparativo de índices meteorológicos de peligro de incendio en la comunidad autónoma de andalucía. In *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*, pages 161–170, 1996.
- [3] Inmaculada Aguado and Andrea Camila. Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. 1998.
- [4] Frank A. Albini. *Estimating wildfire behavior and effects*, volume 30. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range, 1976.
- [5] Hal E. Anderson. Heat transfer and fire spread. *Res. Pap. INT-RP-69. Ogden, Utah: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 20 p.*, 69, 1969.
- [6] Hal E. Anderson. *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*, volume 122. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range, 1981.
- [7] Patricia L. Andrews. *BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system: BURN subsystem, Part 1*, volume 194. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1986.
- [8] Marcelo Barreiro, Fernando Arizmendi, and Romina Trinchin. Variabilidad observada del clima en Uruguay. 2019.
- [9] Antonio Carlos Batista, Daniela Biondi, Alexandre França Tetto, Rafaela de Assunção, Andressa Tres, and Raquel Costa Chiao. Evaluación de la inflamabilidad de árboles y arbustos utilizados en la implementación de barreras verdes en el sur del brasil. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station*, pages 256–264, 2012.
- [10] A. Baumgartner. *Waldbrände in Bayern 1950 bis 1959*. 1967.
- [11] Miguel Á. Bernabé-Poveda and Carlos M. López-Vázquez. *Fundamentos de las infraestructuras de datos espaciales (IDE)*. BibliotecaOnline SL, 2012.
- [12] A. Blum, A. Álvarez, and F. Gallego. Atlas de Cobertura del Suelo del Uruguay. Cobertura del Suelo y Detección de Cambios 2000–2011, 2015.

- [13] G. Bovio, A. Quaglino, and A. Nosenzo. Individuazione di un indice di previsione per il pericolo di incendi boschivi. 1984.
- [14] Alejandro Brazeiro, Marcel Achkar, Carolina Toranza, and Lucía Bartesaghi. Agricultural expansion in uruguayan grasslands and priority areas for vertebrate and woody plant conservation. *Ecology and Society*, 25(1), 2020.
- [15] A. Cal, A. Álvarez, C. Petraglia, M. DellAqua, N. López, and V.M. Fernandez. Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay. *Montevideo: OPP*, 2011.
- [16] P Carrega. Une formule améliorée pour l'estimation des risques d'incendie de forêt dans les alpes maritimes. *Revue D'Analyse Spatiale, quantitative appliquée, Nice*, (24), 1988.
- [17] Miguel Castillo, Patricio Pedernera, and Eduardo Pena. Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(3):44–53, 2003.
- [18] Ven Te Chow, David R. Maidment, and Larry W. Mays. *Hidrología aplicada*. McGRAW-HILL, 1994.
- [19] Christian Chreties, Luis Silveira, Guillermo López, and Magdalena Crisci. Sistema de alerta temprana para la ciudad de Durazno, Uruguay. In *Memorias del V Simposio regional sobre hidráulica de ríos-Ríos 2011*, 2011.
- [20] Emilio Chuvieco and Russell G. Congalton. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing of Environment*, 29(2):147–159, 1989.
- [21] Emilio Chuvieco, M. Pilar Martín, Jesús Martínez, and Francisco Javier Salas. Geografía e incendios forestales. 1998.
- [22] Emilio Chuvieco and Javier Salas. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3):333–345, 1996.
- [23] Emilio Chuvieco, Joaquín Bosque Sendra, Xavier Pons Fernández, Carmelo Conesa García, José Miguel Santos Preciado, Javier Gutiérrez Puebla, María Jesús Salado García, María Pilar Martín, Juan de la Riva, José Ojeda Zújar, et al. ¿son las tecnologías de la información geográfica (tig) parte del núcleo de la geografía? *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2005.
- [24] M. Dávila. Índices predictivos del riesgo de incendios para la cuenca alta del río caroní. *Trabajo de grado. Maestría en Modelado y Simulación de Sistemas*. Cesimo, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela, 2005.

- [25] William J. de Groot, Michael D. Flannigan, and Brian J. Stocks. El cambio climático y los incendios forestales1. In *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales*, pages 1–12, 2013.
- [26] Santiago De Mello, María L. Bettolli, Madeleine Renom, and Matilde Rusticucci. Patrones sinópticos asociados a las olas de calor en Uruguay.
- [27] John E. Deeming, Robert E. Burgan, and Jack D. Cohen. *The national fire-danger rating system–1978*, volume 39. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US, 1977.
- [28] María del Carmen Dentoni and Silvia Bibiana Cerne. *La atmósfera y los incendios. Plan Nacional de Manejo del Fuego*. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Argentina, 1999.
- [29] Santiago Domínguez Martín et al. La física de un índice predictivo de riesgo de incendios forestales. 2008.
- [30] V. Fernández and Y. Resnichenko. La forestación en áreas de riesgo de incendio y su análisis basándose en el tratamiento digital de imágenes satelitales y los sistemas de información geográfico. In *Memorias IX Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, pages 385–394, 2000.
- [31] Virginia Fernández. El tratamiento digital de imágenes satelitales para la gestión de la forestación en áreas de riesgo de incendio.
- [32] Virginia Fernández, Yuri Resnichenko, Andrés Caffaro, and Bruno Guigou. Geotecnologías y modelos de combustible en la prevención de incendios forestales en Uruguay.
- [33] Michael A. Fosberg. Weather in wildland fire management: the fire weather index. *US For Serv Reprints of articles by FS employees*, 1978.
- [34] Harry Thomas Gisborne. *Measuring forest-fire danger in northern Idaho*. Number 29. US Department of Agriculture, 1928.
- [35] Harry Thomas Gisborne. The principles of measuring forest fire danger. *Journal of Forestry*, 34(8):786–793, 1936.
- [36] Z.J. Goncalves and Luciano Lourenco. Meteorological index of forest fire risk in the portuguese mainland territory. In *Proc Internat Conf Frest Fire Res*, volume 7, pages 1–14, 1990.
- [37] Ana Daría Ruiz González. Introducción al comportamiento del fuego. *Recursos Rurais*, (5):15–19, 2009.
- [38] Scott L. Goodrick. Modification of the fosberg fire weather index to include drought. *International Journal of Wildland Fire*, 11(4):205–211, 2002.

- [39] Deryn Griffiths. Improved formula for the drought factor in McArthur's Forest Fire Danger Meter. *Australian Forestry*, 62(2):202–206, 1999.
- [40] María Paula Hobouchian, Yanina García Skabar, Daniel Barrera, Daniel Vila, Paola Salio, et al. Estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica hidroestimador en su versión para sudamérica. 2015.
- [41] INUMET. Clasificación climática.
- [42] María del Pilar Martín Isabel. *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*, volume 4. Editorial CSIC-CSIC Press, 2004.
- [43] Guillermo Julio. Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. *Bosque*, 11(2):59–72, 1990.
- [44] Guillermo Julio and Gerardo Giroz. Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. 1975.
- [45] Ali Karouni, Bassam Daya, and Samia Bahlak. A comparative study to find the most applicable fire weather index for lebanon allowing to predict a forest fire. *Journal of Communication and Computer*, 11:1403–1409, 2013.
- [46] Herbert Käse. *Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern*. Akademie-Verlag, 1969.
- [47] John J. Keetch and George M. Byram. A drought index for forest fire control. *Res. Pap. SE-38. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 35 p.*, 38, 1968.
- [48] Manuel Marey-Perez, Laura Ríos Pena, and L. Vazquez. Metodología para la validación de los diferentes índices meteorológicos de riesgo de incendio para Galicia. 06 2013.
- [49] Santiago Domingo Martín. *La física de un índice predictivo de riesgo de incendios forestales*, volume 237. Universidad de Salamanca, 2009.
- [50] Thornton T. Munger. Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Monthly Weather Review*, 44(11):642–643, 1916.
- [51] M.A. Díaz Muñoz and Concepción Díaz Castillo. El análisis de la vulnerabilidad en la cartografía de riesgos tecnológicos. algunas cuestiones conceptuales y metodológicas. *Série Geográfica, Madrid*, (10):27–41, 2002.
- [52] A.C. Neri-Pérez, D.A. Rodríguez-Trejo, and R. Contreras-Aguado. Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Universidad y ciencia*, 25(2):121–132, 2009.
- [53] V.G. Nesterov. The altitude of a forest and methods for its determination. 1949.

- [54] José Renato Soares Nunes, Ronaldo Viana Soares, and Antônio Carlos Batista. FMA+-um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná, Brasil. *Floresta*, 36(1), 2006.
- [55] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO-No. 8. 2018.
- [56] Adrien Orieux. Conditions météorologiques et incendies en région méditerranéenne. *Revue Forestière Française*, 1974.
- [57] Daniel H. Panario Ponce de León and Ofelia Gutiérrez de Marañón. La vegetación en la evolución de playas arenosas: el caso de la costa uruguaya. *Ecosistemas*, Vol. 14, n. 2 (mayo-ag. 2005); pp. 150-161, 2005.
- [58] Juli G Pausas. *Incendios forestales*. Los libros de la catarata, 2012.
- [59] Juli G. Pausas. Incendios forestales, encrucijada natural y social. 2018.
- [60] Adriana Piperno, Pablo Sierra, A. Varela, and N. Failache. Inundaciones urbanas en el Uruguay. 2009.
- [61] Gonzalo Rama, Felipe Lezama, and Santiago Baeza. Cambios recientes del uso del suelo en la cuesta basáltica del Uruguay.
- [62] Madeleine Renom Molina. *Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala*. PhD thesis, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2009.
- [63] Marcos Pedro Ramos Rodríguez. *Manejo del fuego*. Editorial Felix Varela Havana, 2010.
- [64] N.F. Rodriguez and A.E. Moretti. Índice de peligro de propagación de incendios forestales. In *6. Congreso Forestal Argentino. Santiago del Estero (Argentina). 16-20 Ago 1988.*, volume 3, pages 704–709, 1988.
- [65] Richard C. Rothermel. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, volume 115. Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US, 1972.
- [66] Richard C. Rothermel and Hal E. Anderson. *Fire spread characteristics determined in the laboratory*, volume 30. Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US, 1966.
- [67] Joe H. Scott. *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005.
- [68] A.W. Setzer and R.A. Sismanoglu. Risco de fogo: Metodologia do cálculo-descrição sucinta da versao 9. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)*, 2012.

- [69] Felix Rafael Segundo Sevilla and Luigi Vanfretti. Static stability indexes for classification of power system time-domain simulations. In *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [70] R.V. Soares. Determinação de um índice de perigo de incêndio para a região centro-paranaense, brasil. 1972.
- [71] B. Sol. Estimation du risque météorologique d’incendies de forêts dans le sud-est de la France. *Revue Forestière Française*, 1990.
- [72] Sergio Souto Suárez et al. Métodos estadísticos aplicados a la mejora del índice de incendios en asturias. 2013.
- [73] G.P. Telicyn et al. Logarithmic index of fire weather danger for forests. *Lesnoe Khozyaistvo*, (11):58–9, 1970.
- [74] Florencia Tiribelli. Cambios en la inflamabilidad con la edad post-fuego en bosques y matorrales del no de la patagonia: composición, estructura y combustibles finos. 2019.
- [75] C.E. Van Wagner. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest science*, 14(1):20–26, 1968.
- [76] C.E. Van Wagner, Petawawa Forest, et al. Development and structure of the canadian forest fireweather index system. In *Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.* Citeseer, 1987.
- [77] Luís Guadalupe Zárata López. *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.