

GEOTECNOLOGÍAS Y MODELOS DE COMBUSTIBLE EN LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN URUGUAY

Virginia Fernández¹, Yuri Resnichenko¹, Andrés Caffaro¹, Bruno Guigou¹

1. El riesgo en Uruguay

En riesgo en Uruguay fue un tema escasamente considerado hasta hace relativamente poco tiempo. Seguramente, las características de un país sin terremotos, volcanes y grandes deslizamientos de tierra hicieron que esta temática quedara en un plano de poca importancia. Pero este escenario, con ausencia de amenazas en zonas vulnerables, no se corresponde con la realidad. Este país cuenta con un importante listado de fenómenos que han desencadenado daños, tanto en el aspecto humano, como en el ambiental y el económico. Eventos como: las sequías de 1999 y 2008 – 2009; el tornado de 2005; las inundaciones de 1959, 2007, 2009 – 2010 y los incendios forestales de 2004, 2005, 2008, son algunos ejemplos de los riesgos a los que se enfrenta el país con cierta regularidad. Pero lejos de considerarlos eventos esporádicos, y teniendo en cuenta los anuncios, a nivel global, sobre los efectos del cambio climático, estas situaciones se presentarán con mayor asiduidad. Por ello, es necesario poder pronosticar a tiempo estas situaciones a los efectos de estar preparados para que sus secuelas sean lo menos nocivas posibles y no lleguen a transformarse en desastres.

Un indicio que evidencia una mayor preocupación y un cambio a nivel de gestión institucional es la creación del Sistema Nacional de Emergencia (SNE), mediante decreto del Poder Ejecutivo N°. 103/95, del 24 de febrero de 1995, con el fin de atender las emergencias, de carácter excepcional, que pudieran afectar en forma significativa al país. En su comienzo, el SNE realizaba las tareas de coordinación necesarias, para brindar las ayudas en una determinada situación, una vez desencadenado el evento. Si bien sus cometidos han evolucionado en el tiempo, es recién en 2009 que se produce un cambio sustancial en su institucionalidad. Por medio de la aprobación de la ley N°. 18.621, del 12 de octubre de 2009, el SNE pasa a ser un sistema público de carácter permanente. En este nuevo marco se brinda derechos y responsabilidades a los ciudadanos e instituciones y sus acciones son de orden público con cumplimiento obligatorio. Asimismo define su propósito enfocado a la protección de las personas, bienes de significación y el medio ambiente ante eventuales o reales situaciones de desastres. La misión de este sistema es definir una estrategia que coordine integralmente los recursos existentes ante un determinado problema y se le encomienda a actuar preventivamente. Es decir, ya no opera una vez sucedido el evento sino que su trabajo comienza desde la prevención. Otro elemento novedoso, que recoge la normativa, es considerar el principio de la responsabilidad compartida y diferenciada en la generación de riesgos, promoviéndose una gestión integral de los mismos y estableciendo a la planificación como un importante instrumento. Por último se establece una estructura descentralizada, pero coordinada centralmente.

2. Nuevas herramientas para la gestión del riesgo

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. Cuando se consideran los eventos de incendios forestales, estos pueden ser analizados de diversas

¹ Laboratorio de Técnicas Aplicadas al Análisis del Territorio, Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

perspectivas del conocimiento, pero en sí mismos se tratan de fenómenos geográficos ya que sus orígenes se basan en factores territoriales y sus efectos tienen incidencia sobre el paisaje (Salas y Chuvieco, 1995).

Las diferentes disciplinas utilizan sus diversas herramientas para abordar esta problemática, una de las que más ha incrementado su uso es la Tecnología de la Información Geográfica (TIG). Se puede considerar a las TIG como *“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)”* (Chuvieco et al., 2005:37). Esta definición incluye, muy particularmente, a los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección. Estas tecnologías permiten capturar información espacial, realizar análisis avanzados y desarrollar aplicaciones para la gestión sobre el territorio. Utilizando las TIG es posible combinar informaciones de diversas fuentes y analizar las interacciones entre distintas variables y elaborar modelos preventivos; así como producir información casi en tiempo real y con relativo bajo costo. Otro beneficio que aporta este tipo de herramientas es que presentan cierta facilidad para la generación y producción de datos e informaciones apropiadas para estudios de riesgos, ya que éstos son fenómenos que poseen una gran dinámica, como por ejemplo los incendios forestales.

El Laboratorio de Técnicas Aplicadas al Análisis del Territorio del Departamento de Geografía, de la Facultad de Ciencias (Universidad de la República, Uruguay), ha desarrollado una serie de investigaciones en este campo, sirviéndose para ello de las Tecnologías de la Información Geográfica. Estos estudios han involucrado no sólo indagar en los procesos que, actualmente, se utilizan en los países más adelantados en estas técnicas, sino, también generar conocimiento propio en base a la realidad nacional. Así pues se han investigado tanto en las diferentes respuestas electromagnéticas registradas por los diversos satélites, como en aplicativos factibles de ser incorporados a los Sistemas de Información Geográfica y en la generación de modelos de combustible forestal.

3. Contexto territorial

Si bien desde la segunda mitad del siglo pasado hubo varios intentos para desarrollar la forestación en Uruguay es en 1987 cuando realmente estos impulsos tienen impacto mediante: la sanción de la ley forestal, la formulación del Plan Nacional Forestal y el establecimiento de incentivos económicos. Estas políticas produjeron cambios drásticos en el campo uruguayo ya que se desarrolló un modelo forestal en un país, prácticamente, sin tradición en esta área. Las metas de siembra fijadas en el primer plan quinquenal fueron rápidamente superadas y el ritmo de plantación fue en aumento hasta fines de la década de 1990. Actualmente, la superficie forestada cubre unas 800 000 ha, lo que representa 25% de los suelos de prioridad forestal (aquellos que poseen estímulos para esta producción) y 5% de la superficie agropecuaria nacional (Alvarado, 2009).

No obstante, en estas áreas forestadas, si bien han habido algunos focos ígneos, no se han presentado las principales situaciones de emergencias en cuanto a incendios. Probablemente esto se deba al cuidado que se tiene sobre estos montes, no permitiendo la acumulación de material fino, principal elemento para el comienzo de los siniestros; y, a otros tipos de controles que se efectúan sobre las plantaciones.

En el caso de la forestación costera (no productiva), cuyos orígenes se remontan a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, la situación es diferente. Esta se trata de plantaciones sobre los médanos costeros con el objetivo de fijar las arenas, generando un

paisaje construido apto para las actividades turísticas de aquella época. Aquí no hay un control sobre los bosques, en particular de los materiales finos que ellos producen. Tampoco existen inspecciones regulares sobre estas áreas forestadas, en cuanto a otro tipo de residuos que puedan contribuir a generar situaciones críticas, ni tampoco referidas a las actividades humanas que puedan realizarse. La complejidad de esta situación se ve incrementada por las grandes cantidades de turistas que se desplazan a esta zona en época estival.



Foto 1: los incendios forestales en zonas turísticas

Los departamentos donde se han desarrollado los principales incendios forestales, de los últimos años, son los ubicados al sur-este del país: Canelones, Maldonado y Rocha. En esta zona, uno de los rubros económicos con mayor incidencia es el turismo. Según datos del Ministerio de Turismo, para el año 2008, estos departamentos son elegidos por más del 40% de los turistas que visitan Uruguay. Esta cifra asciende a más del 60% si se considera, solamente, los meses de verano. Por otro lado, si se analizan los ingresos económicos que esta actividad reporta para el país, la importancia de esta zona es aún mayor. Aquí se genera más del 57% de las divisas que se producen en el país por este concepto; y, si se considera, exclusivamente, la temporada estival esta cifra ronda el 80%.

Este marco hace que el área se presente como muy crítica en cuanto a los incendios forestales. Los factores generadores de un siniestro son múltiples y las secuelas, tanto en aspectos sociales, económicos como ambientales, serían significativas.



Foto 2: incendios forestales afectando viviendas



Foto 3: helicópteros utilizados en el combate a los incendios forestales

4. Nuevos abordajes

En Uruguay, el cálculo de riesgo actual de incendio forestal está basado en el Índice de Nesterov. Este fue desarrollado en la antigua Unión Soviética y aún es, frecuentemente, utilizado como un índice de ignición en el área de cobertura de una determinada estación meteorológica, que se generaliza para una zona aledaña. En su ecuación básica intervienen como variables el déficit de saturación del aire y la temperatura del aire.

Actualmente, el Laboratorio de Técnicas Aplicadas al Análisis del Territorio está investigando para generar un índice de riesgo de incendio forestal adecuando una relación de variables y apelando a herramientas que permitan integrar nuevas fuentes de información (imágenes satelitales, datos provenientes de modelos meteorológicos, datos topográficos y modelos de combustibles vegetales). El propósito es generar una metodología y un instrumento que brinde la posibilidad de conocer, con un detalle espacial mayor, el peligro de generación de un incendio.

Entre los desafíos que enfrenta la investigación, se puede señalar como altamente significativa la necesidad de definir y adecuar un nuevo índice más complejo y la creación de un mapa de combustibles vegetales para el territorio uruguayo. En este sentido se debe atender a los comentarios de Salas y Chuvieco (1995) cuando afirman, *“La Cartografía de los modelos de combustible entraña importantes problemas, ya que las características del material combustible son enormemente dinámicas y exigen un nivel de detalle difícilmente abordable con la periodicidad requerida. Por otro lado, la cobertura global y periódica facilitada por los satélites de observación de la tierra, ofrece las condiciones temporales adecuadas para este tipo de cartografía. Además la homogeneidad en la toma de datos, así como la información sobre regiones no visibles del espectro, (infrarrojos medio y térmico y microondas) suponen una importante ventaja de esta técnica sobre la fotografía aérea”*.

Entre los trabajos pioneros que han empleado la teledetección para la cartografía de modelos de combustible se destaca el realizado en la provincia de Quebec (Canadá), en los años 70 (Kourtz, 1977), el que corresponde al Crater Lake National Park de Oregon (Rabii, 1979); y, el proyecto AREScope, que constituyó un hito importante en esta línea de investigación, desarrollado por un equipo de investigadores de la Universidad de California en Santa Bárbara, bajo el patrocinio del U.S. Forest Service (Consentino y Estes, 1981; Yool et al., 1984).

Algunos trabajos se centran sobre pequeñas zonas, en cambio otros son de aplicación a nivel global ya que trabajan con imágenes de baja resolución espacial, (McKinley, et al., 1985), (Werth, et al., 1985), (Miller, et al., 1986), teniendo todos ellos distinto porcentaje de precisión para la prevención y control de incendios forestales.

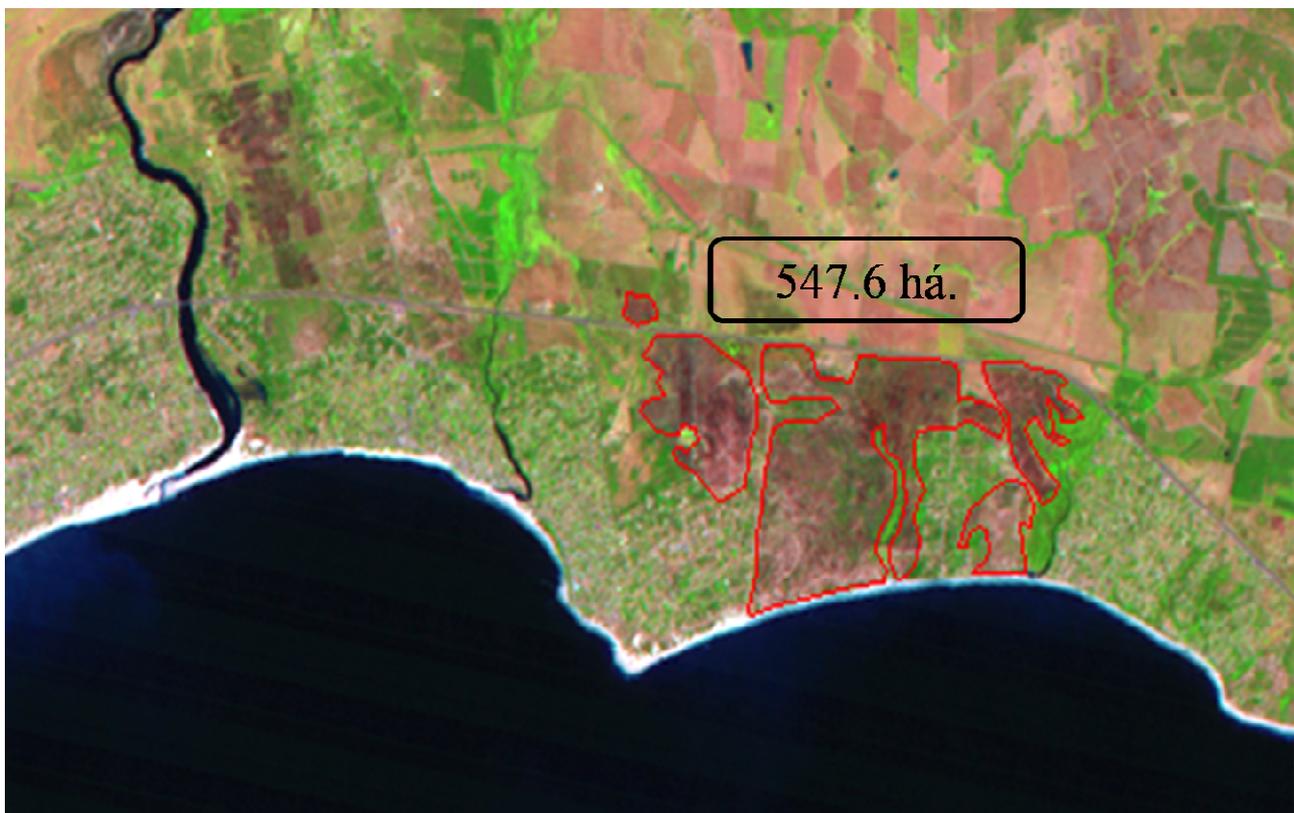
Es importante señalar las ventajas que ofrece la teledetección frente a otros medios de observación más convencionales. Se pueden recordar: cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre, observación multiescala, información sobre regiones no visibles del espectro (detección de tipos de energías que no son visibles al ojo humano y que proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales), cobertura repetitiva, transmisión inmediata de la información, adquisición en formato digital, costo accesible o imágenes gratuitas.

5. El análisis utilizando imágenes satelitales

El trabajo con regiones no visibles del espectro es el aspecto más importante para detectar zonas quemadas. Estudios de laboratorio y trabajo en campo sobre la reflectividad de las hojas han demostrado cuales son los factores que explican tales comportamientos. Se puede afirmar que la reflectividad en el espectro visible se debe, mayormente, a la actividad de los pigmentos, mientras que en el rango del infrarrojo cercano los niveles de reflectividad están dados por la estructura celular; a partir de los 1.4 micrómetros en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR, Short-wavelength Infrared), el contenido de agua es el factor que más influye en la reflectividad de la hoja. Asumido el supuesto previo, se considera que el procesamiento de diferentes bandas de imágenes satelitales permite distinguir con precisión las áreas quemadas de su entorno.

El análisis digital de las imágenes, para este estudio, se realizó a través de dos procedimientos: composiciones de bandas y elaboración de índices.

En primera instancia, el trabajo incluyó una fase exploratoria con la elaboración de distintas composiciones de bandas del sensor, a los efectos de determinar cuál sería la más útil para una futura clasificación de la imagen, en función de los modelos de combustibles forestales. Posteriormente, se optó por una composición de bandas 345, que en la codificación Landsat corresponden a las bandas del rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, respectivamente. En conjunto estas tres bandas obtienen información de tres aspectos relevantes de la vegetación y en particular de la hoja: pigmentos, estructura celular y contenido de agua.



Identificación de áreas quemadas con imagen LANDSAT Composición de bandas 543
(fecha: 21/01/2009)

En el caso de los índices, se trabajó con el Índice infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII, Normalized Difference Infrared Index). Este índice evalúa el contenido de agua, ya que remarca el contraste entre el infrarrojo cercano y el del infrarrojo de onda corta

(SWIR, Short-wavelength Infrared). Por tanto, es considerado más adecuado que el más conocido Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) para estimar contenido de agua en vegetación y más eficaz para la detección de áreas quemadas.

Por último, en función de los comportamientos de la hoja detallados anteriormente, y considerando que el mismo no es suficiente para explicar una reflectividad, que es producto del conjunto, se seleccionó una composición de bandas que abarcaran las tres regiones que explican la reflectividad de las hojas, eligiendo por tanto una banda en el visible, una en el infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared) y otra en el infrarrojo de onda corta (SWIR, Short-Wavelength Infrared).

Finalmente, del trabajo comparado de estos dos productos se evidenció que el que mejor resalta las áreas quemadas es la composición de bandas, aunque, en zonas arenosas de menor densidad de vegetación la respuesta puede estar distorsionada por la reflectividad del suelo. En principio estos trabajos se han realizado con imágenes Landsat 5 TM, ya que la resolución espectral del sensor es apropiada para los objetivos de identificación de áreas quemadas y cartografía de combustibles vegetales. Si bien esta fuente de información posee una resolución adecuada para trabajos de media escala, a nivel de Uruguay, puede no ser la ideal para trabajos de mayor precisión o de mayor cobertura, por ejemplo nacional. En este sentido, el equipo de investigación se encuentra en la exploración del uso de otros satélites, como el MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para realizar estudios a nivel de todo el país.

6. Los índices de peligro de incendios

Otro aspecto de la investigación estuvo dirigido a conocer los diversos índices de peligro de incendio utilizados a nivel mundial, y evaluar la posibilidad de escoger uno que se pudiera adaptar mejor a las situaciones locales.

Los índices analizados se pueden agrupar en tres categorías, según las fuentes de datos que utilizan:

- I. Índices que utilizan mayoritariamente variables meteorológicas,
- II. Índices que combinan datos meteorológicos e imágenes satelitales; e,
- III. Índices que consideran, además, variables humanas.

I. Índices que utilizan mayoritariamente variables meteorológicas

Estos índices utilizan datos meteorológicos diarios para estimar la posibilidad de incendio. Algunos sólo estiman el peligro de iniciarse un incendio, mientras que otros más complejos, estiman no solo la posibilidad de ignición sino también la de propagación. Algunos son relativamente simples, tienen en cuenta ciertas variables físicas, en relación a la humedad y su difusión en los combustibles. Entre los más conocidos se encuentran, en este grupo, al ya mencionado Índice de Nesterov y también el de Telicyn, el cual fue desarrollado en la antigua Unión Soviética, y es un índice logarítmico.

Otros índices más complejos relacionan modelos teóricos y desarrollos empíricos, variables meteorológicas, tipos de combustible y comportamiento del fuego. Entre ellos se pueden mencionar:

Sistema Nacional de Clasificación de Peligro de Incendios (NFDRS): desarrollado en EEUU, a partir de una fuerte fundamentación teórica de matemáticas y física, para

analizar la humedad de los combustibles, y la utilización de experimentos de laboratorio, para estudiar el comportamiento del fuego en relación con los tipos de combustible y los factores meteorológicos. Estima tanto la posibilidad de ignición como la de propagación del fuego.

Sistema Canadiense, FWI (Índice Meteorológico de Incendios Forestales): este sistema integra variables de manera compleja, siendo uno de los índices de mayor desarrollo. Es utilizado en todo el territorio canadiense y estima tanto la posibilidad de ignición como la de propagación del fuego. Utiliza los datos meteorológicos diarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y lluvias. El índice está integrado por seis componentes que estiman, por un lado el contenido de humedad en el combustible (en la hojarasca y otros combustibles finos, de las capas orgánicas poco profundas y combustible de tamaño medio, de las capas orgánicas profundas y grandes troncos), y por otro lado componentes asociados al comportamiento del fuego. Estos son: Índice de Propagación Inicial; el Índice de Acumulación, que estima la cantidad de combustible disponible para la combustión; y, el Índice Meteorológico de Incendios, que considera la intensidad del fuego.

II. Índices que combinan datos de imágenes satelitales y meteorológicos

Algunos índices de riesgo de incendio incorporan el resultado del análisis de imágenes satelitales. Tal es el caso del Índice de Potencial de Incendios (FPI, Fire Potential Index). Este índice fue desarrollado por Burgan para la región mediterránea de los Estados Unidos y, posteriormente ha sido adaptado para las regiones bioclimáticas del sur de Europa. Es un índice que considera el estado del combustible fino muerto y el contenido de vegetación viva; además, utiliza variables meteorológicas como la temperatura y humedad relativa, a la vez que estima el vigor de la vegetación a partir del análisis de imágenes satelitales asociado con los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) y del Índice infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII, Normalized Difference Infrared Index).

III. Índices de peligro de incendios por condiciones humanas

El análisis de la probabilidad de ocurrencia de incendios vinculado a la acción humana resulta trascendente, desde el momento en que en la mayoría de los países, con larga trayectoria en estudios sobre incendios, han comprobado el alto porcentaje de correlación entre los incendios y la causalidad humana. Desde esta óptica autores como Vilar del Hoyo et al. (2008), resaltan, para el caso europeo, cinco grupos de factores de riesgo: accidentes o negligencias, transformaciones socioeconómicas, actividades tradicionales en áreas rurales, conflictos y factores de disuasión de la ignición.

7. Adecuación de un índice al territorio uruguayo

Atendiendo a la necesidad de seleccionar un índice que integre nuevos datos y con distribución espacial; que se pueda calcular con una alta frecuencia, a partir de información accesible, se está trabajando con el Índice de Potencial de Incendios (FPI, Fire Potential Index)

Los componentes del Índice de Potencial de Incendios (FPI) son:

- *un mapa de combustible* – información relativamente estática, factible de ser actualizada una o dos veces al año y del cual se puede obtener un mapa de humedad de extinción;
- un mapa del estado de la vegetación viva; éste puede ser actualizado diariamente ó para períodos más largos (por ejemplo semanal), el cual indica el vigor actual de

- la vegetación, comparándolo con los valores máximos y mínimos históricos; y,
- un mapa de la humedad de los combustibles finos muertos.

La aplicación del índice permite obtener un mapa final con valores que están en el rango de 0 a 100. La fórmula matemática que propone el índice es:

$$\text{FPI} = 100 \times (1 - \text{FMC10HRfrac}) \times (1 - \text{VC})$$

Donde, FMC10HRfrac es la división entre la humedad del combustible fino muerto y el contenido de humedad para la extinción; y, VC es el porcentaje del contenido de vegetación que depende del máximo porcentaje de vegetación viva y el verdor relativo. El Verdor Relativo (VR) se obtiene de los Índices de Diferencias de Vegetación Normalizados (NDVI en inglés), los cuales pueden ser calculados a partir de los datos obtenidos de un sensor como el MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua. La base para calcular el VR son los datos históricos de los NDVI, los cuales definen los valores máximo y mínimo observados en cada píxel. El VR indica que tan vigorosa es la vegetación actual en cada píxel con relación a su rango histórico.

A su vez, es necesario conocer la proporción de vegetación viva, ésta permite establecer una relación del estado de la vegetación de cada píxel con los de toda el área de estudio. Al comparar los niveles máximos de NDVI, en un píxel, para un período con el máximo valor para toda el área, se rectifican los valores en función de criterios espaciales. Tanto para estimar el verdor relativo como para la proporción de vegetación viva, se puede utilizar el NDVI como el NDII.

En cuanto a los combustibles finos, se debe atender a que los sistemas de índices de riesgo de incendio clasifican los combustibles forestales muertos en tiempos de retardo de 1, 10, 100 y 1 000 horas. Esto significa que su contenido de humedad puede cambiar en un 66% de su condición inicial al estado final durante el lapso de tiempo correspondiente, teniendo esto relación con el diámetro del material. Considerando que los comienzos de los incendios, en su mayoría, son derivados de los combustibles finos, para la aplicación del FPI se toma en cuenta los combustibles de hasta 10 horas. La humedad de los combustibles se calcula considerando los datos diarios del día anterior de temperatura máxima y de mínima humedad relativa.

En este punto es necesario definir y adecuar modelos de combustibles para la generación de un mapa del territorio involucrado. Los modelos de combustible describen características físicas de la vegetación en su conjunto y no el tipo de especie que se encuentra presente. Las tipologías están integradas por distintas características de la vegetación: carga de biomasa, la altura de la vegetación o de los diferentes estratos que la componen, la humedad promedio, etc. Es a partir de los modelos de combustible y su identificación en el territorio que se produce una cartografía de combustibles para su mejor utilización en las aplicaciones ya comentadas.

La clasificación más difundida es la desarrollada por Albini en 1976, basada en la propuesta por Rothermel en 1972, utilizada en el programa de simulación del comportamiento del fuego Behave. Esta clasificación está basada en cuatro grupos de combustible, dependiendo de cuál es el elemento por donde se propaga el fuego, que luego se subdividen en trece categorías. Tres del subgrupo de pastos, cuatro del de matorral, tres de hojarasca bajo el arbolado y tres de residuos de corta (Ver tabla 1).

En cada categoría se detallan: la carga de combustible muerto (expresado en kg/m^2), de 1, 10 y 100 horas de retardo; la carga de combustible vivo; el espesor del estrato combustible; y, la humedad de extinción. Entre las características más importantes que se tiene en cuenta a la hora de decidir su elección, es la de detallar la humedad de extinción de cada una de las categorías que presenta, imprescindible para la instrumentación Índice de Potencial de Incendios (FPI, Fire Potential Index).

Modelo 1 (grupo pastos): pasto fino, seco y bajo (por debajo de la rodilla, hasta 30 cm), que recubre totalmente el suelo. El matorral o arbolado, si hay, se encuentra disperso cubriendo menos de un tercio de la superficie. Humedad de extinción = 12%.

Modelo 2 (grupo pastos): similar al modelo 1, pero donde el matorral o arbolado cubre de uno a dos tercios de la superficie. Humedad de extinción = 15%.

Modelo 3 (grupo pastos): pasto grueso, espeso, seco y alto (alrededor de un metro). Los campos de cereales son representativos de este modelo. Humedad de extinción = 25%.

Modelo 4 (grupo matorral): matorral o arbolado joven muy denso (de unos 2 metros de altura). Continuidad horizontal y vertical del combustible. La humedad del combustible vivo tiene gran influencia en el comportamiento del fuego. Humedad de extinción = 20%

Modelo 5 (grupo matorral): matorral denso y joven, pero bajo (según algunos artículos hasta un metro de altura y según otros hasta 0,6 m). Poca presencia de material leñoso muerto. Humedad de extinción = 20%.

Modelo 6 (grupo matorral): matorral similar al modelo 5, pero más alto (según algunos artículos más de un metro de altura y según otros de 0,6 hasta 1,2 m). Con menos combustible vivo que en el modelo 5, el conjunto es más inflamable que dicho modelo. Humedad de extinción = 25%.

Modelo 7 (grupo matorral): matorral muy inflamable, de hasta 2 metros de altura, o pinares de sotobosque. El incendio se desarrolla con mayores contenidos de humedad del combustible muerto que en otros modelos. Humedad de extinción = 40%.

Modelo 8 (grupo hojarasca bajo el arbolado): la hojarasca forma una capa compacta, integrada por acículas cortas (5 cm o menos) o por hojas planas no muy grandes. Poca o nula presencia de matorral. Humedad de extinción = 30%.

Modelo 9 (grupo hojarasca bajo el arbolado): similar al modelo 8, pero la capa de hojarasca es menos compacta, más esponjosa y con mucho aire interpuesto. La capa está integrada por acículas largas o por hojas grandes y rizadas. Humedad de extinción = 25%.

Modelo 10 (grupo hojarasca bajo el arbolado): bosque con material leñoso, caído naturalmente como consecuencia de vientos, plagas, madurez de la masa vegetal, etc. Presencia de vegetación herbácea y matorral que crece entre los restos leñosos. Humedad de extinción = 25%.

Modelo 11 (grupo restos de corta): restos ligeros recientes (con diámetros menores a los 76 mm), restos de poda y zonas aclaradas con plantas herbáceas rebrotando. Los restos forman una capa poco compacta de hasta 30 cm de alto. Humedad de extinción = 15%.

Modelo 12 (grupo restos de corta): restos más pesados que en el modelo 11 (de diámetros menores a los 76 mm), predominan los restos sobre el arbolado, no hay combustibles vivos que influyan en el fuego. Los restos forman una capa poco compacta de hasta de 60 cm de alto. Humedad de extinción = 20%.

Modelo 13 (grupo restos de corta): grandes acumulaciones de restos gruesos (de diámetros mayores a los 76 mm), cubriendo todo el suelo. Humedad de extinción = 25%.

Tabla 1: Categorías de modelos de combustibles

8. Futuros aportes

Actualmente, los esfuerzos del grupo de investigación se orientan a desarrollar una aplicación informática que permita integrar diferentes variables para generar automáticamente el índice seleccionado. Conjuntamente con el Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República) se está creando una herramienta para el estudio del inicio y propagación de incendios forestales. Para esta tarea se seleccionó como Sistema de Información Geográfica (SIG) el programa gvSIG.

Dicha elección se basó en las capacidades que tiene este *software* y a su carácter de libre y gratuito. El aplicativo desarrollado, denominado "SIGNEO", se utiliza como parte del modulo Sextante de gvSIG. Actualmente, otros grupos del mismo instituto están mejorando el ingreso de los nuevos índices de riesgo, perfeccionando la interfase y adaptándolo a la nueva versión de gvSIG.

Esta herramienta tecnológica se orientará a conjugar *información estática*, la que corresponde a variables topográficas que provienen de un modelo numérico de elevación que permita conocer las pendientes, así como la orientación de la laderas; por otro lado, deberá considerar *variables más dinámicas*, que se vinculan al estado de la vegetación y su clasificación como modelo de combustible vegetal; y, por ultimo, *variables de alto dinamismo*, como son las meteorológicas, que deberán actualizarse con suma frecuencia. La aplicación integrará datos provenientes del Modelo Weather Research and Forecast (WRF), que es un modelo numérico de meso escala, construido para ser aplicado tanto en pronóstico operativo de tiempo, como también para la investigación de los fenómenos meteorológicos. El mismo fue desarrollado por el National Center of Atmospheric Research (NCAR) y se encuentra disponible de manera gratuita para la comunidad científica internacional.

El resultado de este estudio, producto de un análisis teórico, procura adaptar la experiencia y los parámetros internacionales a las realidades locales. Además se complementa con el desarrollo de una aplicación, que actualmente está en proceso de elaboración, para ser utilizado mediante los Sistemas de Información Geográfica. Se propone diseñar una herramienta flexible que permita incorporar los cambios en el uso del suelo, que pueda analizar mejor el peligro futuro y estudiar las interacciones que ocurren cuando se alteran los paisajes. Se visualiza como una herramienta de planificación, prevención y restauración.

9. Bibliografía

- Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, Utah: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Alvarado, Raquel (2009). *La expansión forestal en el Cono Sur. Políticas públicas, intereses transnacionales y transformaciones territoriales*, en revista Nueva Sociedad Nº 223, septiembre-octubre de 2009, ISSN: 0251-3552. Disponible en: http://www.nuso.org/upload/articulos/3633_1.pdf. Accedido el 20 de enero de 2009.
- Castro, F Xavier; Tudela, Antoni; Montserrat, David; Canyameres; Esteve; Gabriel de Francisco, Eva (2007). *Aproximación a la modelización de la superficie afectada por los incendios forestales en Catalunya en función de variables meteorológicas e índices meteorológicos de riesgo*. Disponible en: <http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/SESIONES TEMATICAS/ST1/castro et al SPAIN Catalunya.pdf>. Accedido el 12 de abril de 2009
- Chuvieco, E.; Salas, F. J.; Aguado, I; Cocero, D.; Riaño, D. (2001): *Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución*, GeoFocus (Artículos), Nº1, p. 1-16
- Chuvieco, Emilio y Martín, María del Pilar (editores) (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Consejo Superior de Informaciones Científicas, Madrid.

- Chuvieco, Emilio; Bosque, Joaquín; Pons, Xavier; Conesa, Carmelo; Santos, José Miguel; Gutiérrez Puebla, Javier; Salado, María Jesús; Martín, María Pilar; de la Riva, Juan; Ojeda, José; Prados, María José (2005). *¿Son las tecnologías de la información geográfica (TIG) parte del núcleo de la geografía?* en Boletín de la A.G.E. N°. 40 -págs. 35-55. Disponible en: <http://www.ieg.csic.es/age/boletin/40/02-SON%20LAS%20TECNOLOGIAS.pdf>. Accedido el 18 de enero de 2007.
- Cosentino, M.J. y Estes, J.E. (1981). *Use of Landsat data to develop a fuels database for a wildland fire simulation model*. Pecora VII Symposium. Sioux Falls.
- Giglio, Louis (2007). MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Versión 2.3, Science Systems and Applications, Inc. 28 February. Disponible en: http://maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.3.pdf. Accedido el 8 de febrero de 2009.
- Huesca Martínez, Margarita; Palacios-Orueta, Alicia; Montes, Fernando; Sebastián, Ana; Escribano, Paula, (2007). Forest fire potencial index for Navarra autonomic community (Spain). Disponible en: [http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/SESIONES_TEMATICAS/ST4/Huesca et al SPAIN U PM.pdf](http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/SESIONES_TEMATICAS/ST4/Huesca_et_al_SPAIN_U_PM.pdf). Accedido el 13 de abril de 2009.
- Kourtz, P.H. (1977). *An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping*. 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor.
- McKinley, R.A., Chine, E.P. y Werth, L.F. (1985). *Operational fire fuels mapping with NOAA-AVHRR data* en: Pecora 10. Remote sensing in forest and range resource management Fort Collins.
- Miller, W.A., Howard, S.M. y Moore, D.G. (1986). *Use of AVHRR data in an information system for fire management in the Western United States*. 20th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Nairobi, Kenya.
- Ministerio de Turismo y Deporte (2009). *Encuesta de Turismo Receptivo - Año 2008*. Disponible en: <http://www.turismo.gub.uy>. Accedido el 22 de enero de 2009.
- Rabii, H.A. (1979). *An investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park*. Oregon State University.
- Rothermel, R.C. (1972). *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*: Research Paper INT-115. USDA, Forest Service. Ogden, Utah.
- Roy, David; Boschetti, Luigi. MODIS collection 5. Burned area product MCD45 - user's guide, version 1.1, Sept., 2008a. Disponible en: http://modisfire.umd.edu/documents/MODIS_Burned_Area_Users_Guide_1.1.pdf. Accedido el 6 de mayo de 2009
- Salas, Javier; Chuvieco, Emilio (1995). *Aplicación de imágenes Landsat TM a la cartografía de modelos de combustibles*. Revista de Teledetección, 5: 18-28
- Vilar del Hoyo, Lara; Martín Isabel; M^a. Pilar y Martínez Vega, Javier (2008). *Empleo de técnicas de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendio forestal a escala regional* en Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N°. 47
- Werth, L.F., McKinley, R.A. y Chine, E.P. (1985). *The use of wildland fire fuel maps produced with NOAA-AVHRR scanner data* en: Pecora X Symposium Fort Collins.
- Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Cosentino, M.J. y Estes, J.E. (1984). *A Geographic Information System approach to quantitative assessment of wildlife fuels*. ACSM-ASPRS Annual Convention. Washington DC.