

# Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y el manejo de fuego en la región chaqueña occidental (Argentina) I: conceptos básicos

BIANCHI, L.<sup>1</sup>; DEFOSSÉ, G.<sup>1</sup>; DENTONI M.<sup>2</sup>; KUNST, C.<sup>3</sup>; LEDESMA, R.<sup>3</sup>; BRAVO, S.<sup>4</sup>

## RESUMEN

El fuego es un modelador de la mayoría de los ecosistemas vegetales del mundo, entre ellos, los correspondientes a la región chaqueña argentina donde asimismo ha sido usado ampliamente como una herramienta de manejo de la vegetación. Dada una fuente de ignición, para que un fuego pueda prosperar deben existir ciertas condiciones. Entre ellas, el contenido de humedad del combustible (CH) juega un rol fundamental ya que su magnitud influirá en la probabilidad de ignición, en el posterior comportamiento del fuego y en el impacto que éste tendrá sobre el ecosistema afectado. Existen diferencias entre el contenido de humedad de los combustibles vivos (CHCV) y el de los muertos (CHCM), debido a que el contenido del agua en cada uno de ellos responde a procesos distintos. Mientras que el CHCV responde a características propias de las especies como su fisiología y fenología, el CHCM varía de acuerdo a leyes físicas universales que regulan el intercambio de humedad entre ese combustible y el ambiente que lo rodea. Dada la relevancia que tiene CH, se han desarrollado diversos métodos y sistemas para medirlo, estimarlo, y/o poder predecirlo. Conocer su dinámica a lo largo del tiempo permite, además, determinar los períodos en los que el fuego es más propenso a ocurrir en cada ecosistema. Al presente, se han realizado estudios preliminares para algunas especies de la región chaqueña. Para el desarrollo de indicadores de peligro y modelos de comportamiento que permitan llevar a cabo quemas prescriptas con un mayor grado de seguridad y mejor cumplimiento de los objetivos, es necesario incrementar este conocimiento a un mayor número de especies. El objetivo de este trabajo fue, por lo tanto, ampliar la información existente, cuantificando la dinámica estacional del CH en diferentes especies nativas de gramíneas, arbustos y árboles de la región chaqueña. Además analizamos los efectos de la estación climática, el sitio ecológico y las características del combustible sobre el CH. En esta primera parte, presentamos las bases conceptuales sobre la combustión de los vegetales y su relación con el CH, las características que hacen a las diferencias entre combustibles vivos y muertos, los factores que inciden en sus respectivas dinámicas, y las metodologías que existen para su determinación. En los siguientes aportes se darán a conocer estas determinaciones en las principales especies de la región chaqueña argentina.

**Palabras clave:** combustión, tipo de combustible, incendios forestales, quemas prescriptas.

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico, (CIEFAP) y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Sede Esquel, Esquel, Chubut. Correo electrónico: gdefosse@ciefap.org.ar

<sup>2</sup>Plan Nacional de Manejo de Fuego.

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Jujuy 850, Santiago del Estero, G4200CQR, Argentina. Correos electrónicos: kunst.carlos@inta.gob.ar; Ledesma.roxana@inta.gob.ar

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Santiago del Estero, Cátedra de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales, Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina.

## ABSTRACT

Fire is one of the main natural disturbances that have shaped most of the world's terrestrial ecosystems. In the Chaco region of Argentina, fire has also been used as a management tool for pastures improvement. Given an ignition source, for a fire to develop certain conditions must occur. Among them, the fuel moisture content (FMC) plays a very important role, since its values will affect the behavior of the fire and the consequences on the disturbed ecosystem. There are differences between live (LFMC) and dead (DFMC) fuel moisture content, mainly because the water content is governed by different processes. The LFMC depends on the species' physiological and phenological characteristics, while DFMC varies according to universal physical laws that regulate the moisture content exchange between the fuels and their environment. Given its relevance, several methods have been proposed to measure and predict FMC. Also, the knowledge of their dynamics along the seasons allows to determine the most critical periods for fire occurrence. Up to the present, preliminary studies of FMC have been determined for some species of the Chaco region. However, for developing protocols for the implementation of prescribed burning, it is necessary to broaden this knowledge to comprise a wider number of species. For the accomplishment of these objectives, we analyzed the influence of the climatic seasons, the ecological site, and the characteristics of the fuel on the FMC. In this first part, we present the conceptual bases dealing with vegetation combustion and its relations with FMC, the characterization of the differences between LFMC and DFMC, the factors controlling their respective dynamics, and the main methodologies used in their determination. In the following chapters, we will present the dynamics of FMC of the different key species of the Chaco region of Argentina.

**Keywords:** combustion, vegetable fuels, wildfires, prescribed burning.

## INTRODUCCIÓN

El fuego es un disturbio natural que ha modelado la estructura y dinámica de la vegetación en la mayoría de los ecosistemas terrestres por milenios (Komarek, 1965). El fuego selecciona a las especies vegetales de acuerdo a su sensibilidad/resistencia al fenómeno y, en conjunto con su época de ocurrencia, intensidad, severidad y frecuencia, es uno de los factores determinantes de la composición botánica de los ecosistemas actuales (Pausas y Moreira, 2012). Para que un foco de fuego prospere, la energía disponible debe ser suficiente como para elevar la temperatura del combustible hasta niveles de ignición para que luego se produzca la combustión. Este proceso y el posterior comportamiento del fuego están condicionados por el contenido de humedad (CH) y la inflamabilidad de los combustibles (Agee *et al.*, 2002). En general, la intensidad del fuego, su velocidad de propagación y las dificultades en su manejo (ej. control) se incrementan cuando el CH disminuye (Pellizzaro *et al.*, 2007).

En la Argentina, se han encontrado valores característicos de CH para las hojas verdes y el mantillo de distintas especies arbóreas del bosque andino-patagónico (Bianchi, 2009). En otros lugares del mundo, en general, se han encontrado pocas variaciones en la dinámica de CH de combustibles vivos (CHCV) de árboles, con disminución del mismo en la primavera en las coníferas (Alexander, 2010), e incrementos durante la brotación en latifoliadas (Valette, 1992; Pellizzaro *et al.*, 2007). En cuanto al CHCV de los

arbustos, se encontraron en general dos grupos de especies: por un lado, aquellas que presentan una dinámica del CH variable y relacionada con los cambios en las condiciones meteorológicas y la humedad en el suelo; y por otro, aquellas que se ven poco influenciadas por estos cambios (Viegas *et al.*, 2001; Pellizzaro *et al.*, 2007; Alessio *et al.*, 2008). Las especies del primer grupo presentan menores valores de humedad durante la temporada más seca y luego la recuperan, alcanzando el máximo cuando ocurren las precipitaciones. En cuanto a los pastizales, se considera clave el porcentaje de material que se encuentra vivo o muerto, siendo esta proporción una de los principales componentes que definen la carga de combustible disponible (Fire & Emergency Services Authority of Western Australia 2008; Cheney y Sullivan 2008). Al mismo tiempo, tanto en pastizales como en el mantillo de arbustales y bosques, el CH de los combustibles muertos (CHCM), es crucial en la ignición y propagación del fuego (Aguado *et al.*, 2007). Se han encontrado distintos valores umbrales de CHCM que permiten la propagación inicial del fuego de acuerdo a la composición de especies, tipo de combustible, etc. Estos umbrales se han descrito para pastizales (De Groot *et al.*, 2005), y en el mantillo superficial de bosques (Blackmarr, 1972; Tanskanen *et al.*, 2005; Fernandes *et al.*, 2008) y arbustales (Plucinski y Anderson, 2008).

En la región chaqueña argentina, además de cumplir con un rol ecológico, el fuego ha sido usado como herramienta de manejo de la vegetación (Morello y Saravia Toledo,

1959; Bravo *et al.*, 2001; Fischer *et al.*, 2012). El régimen de fuego de esta región se caracteriza en general por su marcada estacionalidad, iniciándose en junio al comienzo de la estación fría y seca, y finalizando en octubre, con la llegada de las primeras lluvias (Bravo *et al.*, 2001). Observaciones empíricas permiten deducir que la estación seca es la más propensa al fuego, probablemente por la desecación del combustible vegetal. Este proceso, que sólo fue estudiado para algunas especies, permitió determinar que existen variaciones significativas del CH y su dinámica entre estas especies (Kunst *et al.*, 2006). Por ese motivo, se destaca la necesidad de estudiar exhaustivamente la dinámica del CH en un número mayor de especies chaqueñas. La información obtenida generará no sólo conocimiento desde el punto de vista ecológico, sino también de utilidad para la prevención y el manejo del fuego, permitiendo comprender mejor el régimen de fuego de cada una de las especies de la región.

El objetivo general de este trabajo fue cuantificar la dinámica estacional del CH en diferentes especies nativas de gramíneas, arbustos y árboles de la región chaqueña, y analizar los efectos de la estación climática, el sitio ecológico y las características del combustible sobre el CH y su relación con la humedad del suelo y la precipitación. Esta información servirá de base para la elaboración de protocolos y ejecución de quemas prescriptas y también para implementar índices de peligro y comportamiento del fuego.

El objetivo de esta contribución es proveer el marco teórico general sobre el proceso de combustión de la vegetación, similitudes y diferencias del CH entre combustibles vivos y muertos, los factores que inciden en su dinámica temporal, y las metodologías que existen para su determinación según la estructura y características propias de cada uno. La información generada servirá de base para aumentar el conocimiento sobre la determinación y dinámica de CH, y sobre cómo influye en los procesos de probabilidad de ignición, propagación inicial, velocidad de avance, intensidad, y severidad del fuego. Estos datos son cruciales para comprender el funcionamiento del mismo y sus posibilidades de gestión (quemas prescriptas, actividades de supresión, etc.) en los distintos ecosistemas del país.

## 1. La combustión vegetal

El fuego es el resultado del proceso de combustión del tejido vegetal vivo (biomasa) o muerto (fitomasa). Este "combustible" está compuesto por celulosa, hemi-celulosa y lignina, y se lo representa como un carbohidrato sin estructura definida:  $(\text{CH}_2\text{O})$  (Sullivan y Ball, 2012). Existen además otros componentes que participan en la combustión, tales como minerales, sales, proteínas, almidones, ácidos, aceites, resinas, flavonoides, ceras y terpenos. La presencia de compuestos de carbono complejos aumenta la inflamabilidad y la combustibilidad debido a que entran en combustión a temperaturas más bajas que la celulosa y la lignina (Rundel, 1981). La combustión es un proceso de oxidación, dominado por la termo-conversión de la celulosa y es una reacción en cadena que ocurre rápidamente

y a altas temperaturas (Byram, 1959; Sullivan y Ball, 2012). Aunque las moléculas que conforman el tejido vegetal son complejas, la oxidación se considera como una reacción inversa a la fotosíntesis. La oxidación de una molécula de glucosa se representa como (fórmula 1, Sullivan y Ball, 2012):



donde Q representa el calor de combustión liberado. La magnitud de Q depende de la especie y del tipo de tejido vegetal involucrado en la combustión, variando entre 12 y 22 MJ.kg<sup>-1</sup> (Alexander, 1982).

La combustión posee tres fases: 1. *Pre calentamiento*: los combustibles delante del frente de llama comienzan a secarse y calentarse, eliminando gases; 2. *Combustión*: la pérdida de gases continúa, y éstos comienzan a arder. La unión de estas dos fases es la parte de la combustión donde comienza la oxidación y es lo que se denomina "ignición"; y 3. *Llama*: en esta última fase, el combustible se quema como un sólido y la oxidación ocurre en su superficie (Byram, 1959). En un fuego activo, las tres fases se superponen y ocurren en forma simultánea.

## 2. El contenido de humedad de los combustibles (CH)

El CH se expresa como un porcentaje del peso de la materia seca del combustible (Canadian Interagency Forest Fire Centre 2002, fórmula 2).

$$\text{CH} = 100 * [\text{Ph} - \text{Ps}] / \text{Ps} \quad (2)$$

Donde: Ph = peso húmedo (g) y Ps = peso seco, (g) del combustible, respectivamente. El cálculo de CH empleando peso seco implica que algunas especies y órganos pueden presentar CH ≥ 100% (Countryman y Dean, 1979). Si CH = 100%, significa que por 1 gr de peso seco hay un equivalente de 1 gr de agua (Agee *et al.*, 2002). El CH juega un rol fundamental dentro de las 'características' de los combustibles (tamaño, distribución espacial, contenidos químicos, etc.) relacionadas con el comportamiento del fuego (probabilidad de ignición, propagación inicial, velocidad de avance, intensidad, etc. (Rothermel, 1972; Van Wagner, 1977; Nelson, 2001; Trollope y Trollope, 2002; Fernandes *et al.*, 2012). El agua tiene la capacidad de impedir/retardar la combustión debido a su alto calor específico. Para desplazar el agua, secar el combustible y llegar a la temperatura de ignición, se requiere una elevada cantidad de energía (Byram, 1959; Alexander, 1982). El agua eliminada reduce la tasa de transferencia de energía radiante de las llamas a las partículas de combustible adyacentes (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001). Se produce la combustión si la energía requerida para elevar la temperatura del combustible hasta la temperatura de combustión es menor a la energía disponible a través de la convección y la radiación provenientes de las llamas adyacentes.

En el momento del pasaje del frente de fuego, el CH determina la proporción de los combustibles disponibles para la combustión, y si estos contribuirán o retardarán el avance del fuego (Agee *et al.*, 2002). Debido a ello, se considera

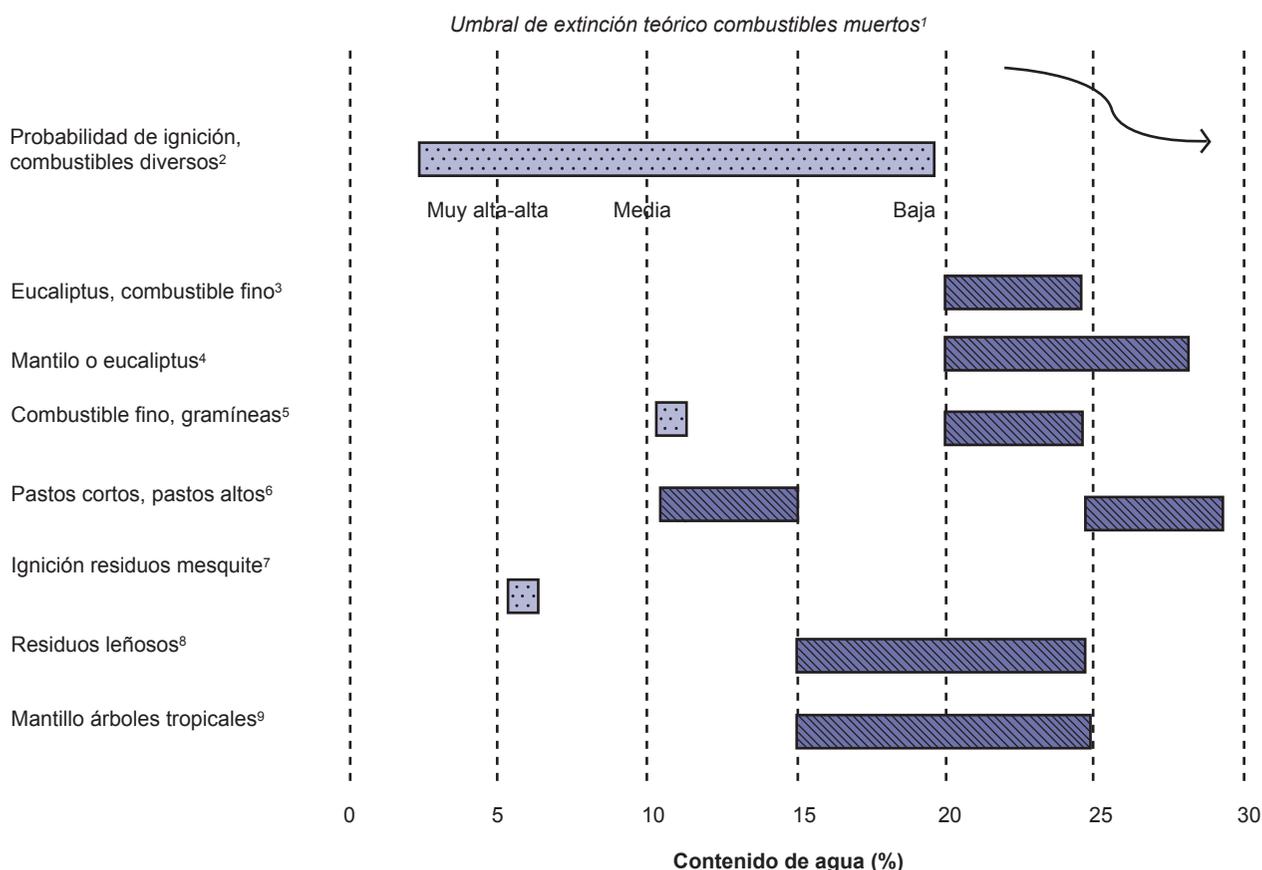
al CH como un indicador del peligro de ocurrencia de un incendio. La estimación correcta del CH es entonces un dilema técnico de gran importancia en el estudio de la ecología del fuego (Pook y Gill 1993; Beck y Armitage, 2004; Chuvieco *et al.*, 2004a; De Groot *et al.*, 2006; Alves *et al.*, 2009; Sharples y Mcrae 2011; Qi *et al.*, 2012).

Para abordar este dilema y estudiar correctamente el CH, se han clasificado a los combustibles en vivos y muertos, debido a que la variación de CH en cada uno responde a distintos procesos. En los combustibles vivos, compuestos principalmente de hojas y pequeñas ramitas, el CHCV depende en gran medida de procesos fisiológicos como apertura y cierre de estomas o del movimiento del agua y savia dentro de los tejidos fotosintéticamente activos, pudiendo variar a través del tiempo debido a cambios en la fenología y fisiología de las especies (Wittich, 2011). En los combustibles muertos, el CHCM varía en cambio de acuer-

do a leyes físicas universales que regulan el intercambio de humedad entre el combustible y el ambiente que lo rodea.

### 2.1. Combustibles muertos

Se denomina combustible muerto (CM) a todo tejido vegetal que ha perdido la capacidad fisiológica (actual o futura) de realizar fotosíntesis y/o de transportar o almacenar sustancias; y está compuesto generalmente por hojas de pastos, arbustos y árboles, troncos y ramas ubicadas sobre la superficie o subterráneas; o ubicadas en el dosel de árboles y arbustos. En la práctica, se considera al combustible como 'muerto' cuando su CH es menor al 30% (fig. 1). El CHCM depende principalmente de las condiciones meteorológicas (precipitación, viento, temperatura y humedad relativa del aire, insolación, etc.) ocurridas durante los meses y días previos al momento de su determinación (Pyne



**Figura 1.** Rangos de humedad en distintos combustibles y sus umbrales de CH de extinción (HE) y encendido informados en la bibliografía. Referencias: barras con puntos, umbral de encendido; barras con rayas, umbral de extinción.

<sup>1</sup>Rothermel, 1983.

<sup>2</sup>The Forest Foundation, 2012: Fire severity related to fuel moisture content <http://www.calforestfoundation.org/pdf/Fire+Severity+Related+to+Fuel+Moisture+Content.pdf>

<sup>3</sup>y <sup>4</sup> Fuel moisture content and bushfire behaviour, (<http://www.csiro.au/Outcomes/Safeguarding-Australia/FuelMoistureAndBushfires.aspx>, verificado 11 de diciembre de 2012).

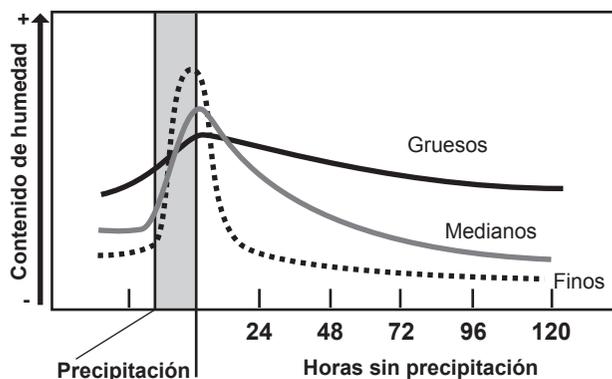
<sup>5</sup>Sullivan, 2010.

<sup>6</sup>Chuvieco *et al.*, 2004a.

<sup>7</sup>McPherson y Wright, 1987.

<sup>8</sup>Fernandes *et al.*, 2008, 2012; Pyne, 1984.

<sup>9</sup>Ray *et al.*, 2005.



**Figura 2.** Concepto de tiempo de retardo: luego de unos días de sequía, los combustibles muertos de menor diámetro estarán más secos que aquellos medianos o gruesos. Al ocurrir una lluvia, el CH de los combustibles se incrementará rápidamente en los combustibles finos, alcanzando valores superiores que en los medianos o en los gruesos. Del mismo modo, pasada la precipitación, los combustibles medianos y gruesos perderán humedad más lentamente y los más finos lo harán rápidamente, quedando disponibles para arder.

1984). Los CM ganan y pierden humedad hasta que logran el equilibrio con la atmósfera que los rodea: Esta 'humedad de equilibrio' depende de la temperatura y humedad iniciales, de la ganancia o pérdida de humedad (histéresis) y de características propias del CM (Blackmarr, 1971; Catchpole *et al.*, 2001).

La dinámica temporal del CHCM presenta el fenómeno de histéresis. Debido al mismo, la humedad de equilibrio a la que llega el CM al perder agua es mayor que a la que se llega a través del proceso inverso de captar agua (Blackmarr, 1971; Catchpole *et al.*, 2001). El proceso de perder/captar agua en CM está influido por: (a) el tamaño del CM (Viney 1991; Catchpole *et al.*, 2001), y (b) la densidad, forma y tipo de superficie que lo recubre (Anderson, 1990). La velocidad a la que el CM tiende hacia la humedad de equilibrio determina el tiempo de retardo (denominado también tiempo de respuesta, o 'time-lag' en idioma inglés, (Viney, 1991). El tiempo de retardo es entonces el tiempo

que tarda el combustible en alcanzar alrededor del 63% del cambio desde su contenido de humedad original hasta la humedad de equilibrio (Catchpole, 2001). Este "tiempo de respuesta" aumenta con el tamaño de los combustibles. Ante cambios en las condiciones ambientales, como por ejemplo, la ocurrencia de una precipitación o la entrada de una masa de aire relativamente más cálido y seco, el CHCM de los combustibles de menor tamaño puede alcanzar la humedad de equilibrio en poco tiempo. En los combustibles más grandes alcanzar el equilibrio de CH con el ambiente requiere en cambio de muchas horas, o incluso días. Por lo tanto, este tipo de combustibles difícilmente alcancen el equilibrio de CH, ya que las condiciones ambientales no permanecen constantes el tiempo suficiente como para alcanzarlo (fig. 2).

La pérdida y/o ganancia de humedad por parte de los combustibles se realiza a través de su superficie, ocurriendo a una tasa directamente asociada con la relación área por unidad de volumen. Por ejemplo, en un cilindro, la relación área-volumen está inversamente relacionada con el radio (Bradshaw *et al.*, 1984). Por tal motivo y a los fines prácticos, los CM se clasifican de acuerdo a su tamaño (= diámetro) y al tiempo de retardo asociado. Para determinar el tiempo de retardo, se utilizan dos clasificaciones difundidas hoy en todo el mundo, una de ellas desarrollada en Canadá, y la otra en los Estados Unidos. Ambas tienen en cuenta el tamaño de los combustibles y el estado de la materia orgánica presente en el suelo a la que pueden asociarse las distintas clases (tabla 1; Lawson y Armitage, 2008; Mölders, 2010; National Wildfire Coordinating Group, 2011). La canadiense divide a los CM en tres categorías (Lawson y Armitage, 2008), mientras que la estadounidense lo hace en cuatro (Anderson 1982; tabla 1). En la práctica, las categorías de las dos clasificaciones se consideran comparables, aunque no son exactamente iguales (Van Nest y Alexander, 1999).

Cuando ocurre un fuego de superficie (es decir que se propaga a través de combustibles ubicados en el suelo), el CHCM influye de manera significativa en la velocidad de propagación, en la intensidad de línea y en la posibilidad de

País						Materia orgánica en el suelo
Canadá			Estados Unidos			
Clase	Diámetro (cm)	Tiempo de retardo	Clase	Diámetro (cm)	Tiempo de retardo	
Finos	<0,6	16 horas	Finos	<0,6	1 hora	Hojarasca y otros combustibles finos sobre la superficie, profundidad <2cm
			Regulares	0,6-2,5	10 horas	
Medianos	0,6-5,0	15 días	Medianos	2,5-7,5	100 horas	Suelta, poco compacta y profundidad moderada (~10cm)
Gruesos	>5,0	53 días	Gruesos	>7,5	1000 horas	Compactada y a mayor profundidad (>10cm)

**Tabla 1.** Clases diamétricas utilizadas en Canadá y Estados Unidos para clasificar combustibles muertos de acuerdo a su tamaño y al tiempo de retardo asociado. Aunque el desarrollo teórico de cada clasificación fue diferente, en la práctica las clases similares de cada sistema pueden considerarse como análogas (Van Nest y Alexander, 1999; Lawson y Armitage, 2008; Mölders, 2010; National Wildfire Coordinating Group, 2011).

coronamiento (Byram 1959; Rothermel 1972; Aguado *et al.*, 2007). Los combustibles finos muertos se encienden más rápidamente que los de mayor diámetro y están relacionados directamente con la ignición y propagación inicial del fuego (Rothermel, 1972). Los CM medianos y gruesos influyen en la intensidad de la línea de fuego, en el tiempo de residencia de las llamas en un punto, y en la severidad o impactos del fuego, fundamentalmente en el suelo (Ryan, 2002).

Existe un umbral del CH denominado 'humedad de extinción' (HE), a partir del cual el fuego no puede propagarse, especialmente a través de los CM finos (Rothermel, 1972, fig. 1). La magnitud de HE de los CM finos varía dependiendo de las especies, del tipo de combustible (pequeñas ramas, hojas, acículas de pino, etc.) y de la compactación del mantillo, entre otros factores (Blackmarr, 1972; de Groot *et al.*, 2005).

## 2.2. Combustibles vivos

En este tipo de combustibles, la influencia de las condiciones meteorológicas sobre el CH es significativamente menor que en el caso de los combustibles muertos. Los combustibles vivos (CV) son más ricos en extractivos (aceites esenciales, terpenos, etc.), que también pueden influenciar y/o modificar su inflamabilidad. El CHCV y el contenido de extractivos varían entre especies, de acuerdo a sus distintas estrategias morfológicas y fisiológicas para adaptarse a las condiciones del entorno (ej. forma de las hojas, compuestos antiherbívoros, momento de apertura y cierre de estomas, profundidad explorada por las raíces, etc.). A los fines prácticos, para que un combustible sea considerado "vivo", debe poseer un CH  $\geq 30\%$  (Jolly, 2007).

El CHCV es un parámetro clave en la probabilidad de que un fuego de superficie se traslade a las copas de los árboles o arbustos (evento llamado "coronamiento") y en su posterior propagación (Van Wagner, 1977; Agee *et al.*, 2002). Si ocurre coronamiento, el fuego se torna difícil de controlar por la intensa radiación liberada, por su alta velocidad de propagación, y porque puede independizarse del control atmosférico, generando 'tormentas de fuego' (Alexander y Cruz, 2012).

La dinámica temporal del CHCV y su relación con la inflamabilidad de diversas especies ha sido estudiada en distintos ecosistemas alrededor del mundo para prever períodos de mayor peligro de incendios (Trabaud, 1976; Burgan, 1979; Valette, 1992; Pellizzaro *et al.*, 2007; Bianchi, 2009; Ganteaume *et al.*, 2011; Blackhall *et al.*, 2012; Qi *et al.*, 2012).

## 3. Estimación del CH

Debido a la importancia del CH de los combustibles vegetales vivos y muertos en el comportamiento del fuego, se requieren metodologías factibles para su medición o estimaciones precisas de manera de contar con esta información en el momento de manejar y controlar el fuego. Existen a tal fin métodos directos e indirectos, cada uno con sus ventajas y desventajas.

### 3.1 Métodos directos.

Los métodos directos requieren de la recolección de muestras de cada combustible para poder estimar su CH.

- **Método gravimétrico.** Requiere de la recolección y pesado en húmedo de las muestras y su posterior secado durante 24-48 hs a temperaturas entre 60 y 105° C, hasta llegar a un peso constante. El CH se determina mediante la fórmula 2 (ver sección 2; Jolly y Hadlow, 2012). Este método es muy preciso, pero laborioso y costoso. Es utilizado en trabajos de investigación, pero es poco práctico para tareas operativas que requieran mediciones rápidas, dado el tiempo que transcurre entre la recolección de las muestras y la obtención del CH (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001; Jolly y Hadlow, 2012). Este método es ineficaz, por ejemplo, cuando se necesita conocer el CH en el momento de ocurrencia de un incendio para tomar las medidas inmediatas de control o gestión. En el caso de la planificación de una quema prescrita, resulta muy útil como referencia previa. Sin embargo, es preciso remarcar que dado el tiempo que lleva su determinación, el CH de las especies ubicadas en el área a tratar puede sufrir modificaciones hasta momento de realizar la quema.

- **Medidores portátiles.** Son instrumentos que permiten determinar el CH casi al instante. Se destacan:

- **Varillas de madera (hazard sticks):** son un instrumento tradicional, que consiste en colocar en el terreno varillas ( $n > 2$ ) de un tipo de combustible y de peso seco conocidos. El CH se calcula mediante la diferencia entre el peso seco y el peso húmedo de la varilla en el terreno (Péché, 1969; Jolly y Hadlow, 2012). El método se basa en la misma teoría que el método gravimétrico, obteniendo resultados de igual precisión. La ventaja de este método es que la varilla está sometida a las mismas condiciones ambientales que el resto de los combustibles e integra, de esta manera las condiciones actuales como las que prevalecieron recientemente. Las principales desventajas son que la estimación de la humedad es particular de la especie vegetal con la que fue confeccionado la varilla, y que se requiere de un tiempo considerable (10-14 días) para que la misma se equilibre con el ambiente antes de que pueda utilizarse. La vida útil de la varilla es de alrededor de 12 semanas debido a la descomposición bajo condiciones de campo (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001).

- **Rapid Moisture Analyser:** combina un calentador radiante con una balanza de precisión, permitiendo obtener resultados en menos de 15 minutos. La determinación del CH se realiza calentando la muestra hasta que la tasa de pérdida de masa sea inferior a un valor determinado (Jolly y Hadlow, 2012). Existen también dispositivos que relacionan la capacitancia eléctrica de una muestra de combustible con su CH y permiten obtener un resultado rápidamente (Chatto y Tolhurst, 1997). Estudios previos encontraron una alta correlación de los valores de CH obtenidos con este instru-

mento y aquellos obtenidos con el método gravimétrico ( $R^2 = 0,99$ ; Jolly y Hadlow, 2012).

- *Speedy moisture meter*: es un método químico que mide los cambios de presión resultantes de la oxidación de carburo de calcio al introducirse partículas de combustible dentro de una cámara sellada (Dexter y Williams, 1976). Brinda resultados similares a los obtenidos con el método directo, pero su desventaja radica en que para que las mediciones sean precisas, las muestras deben ser preparadas con meticulosidad y la cantidad de combustible y de carburo de calcio cuidadosamente medidas (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001). El rango de medición está limitado entre el 7 y el 50% de humedad (Chatto y Tolhurst, 1997).

Otros métodos químicos son la destilación con Xileno, muy sencillo de aplicar pero sólo en laboratorio por lo que no es útil en el campo y el empleo de yodo, piridina y metanol, es muy preciso, pero muy complejo y requiere de profundos conocimientos de química para aplicarlo correctamente (Chatto y Tolhurst, 1997).

Los dispositivos descriptos brindan resultados precisos del CH (Chatto y Tolhurst, 1997; Catchpole *et al.*, 2001; Jolly y Hadlow, 2012). Aunque el resultado está disponible en pocos minutos, la desventaja es que requieren calibración para cada tipo de combustible y una re-calibración frecuente. Además, suelen ser mucho más caros que el equipo requerido para aplicar el método gravimétrico (Jolly y Hadlow, 2012).

En cuanto a su nivel de precisión, los trabajos que utilizan los métodos descriptos en los párrafos anteriores presentan pequeñas variaciones (en más o en menos) al ser comparados con el método gravimétrico, que es el utilizado como el método directo, patrón o estándar para la determinación del CH de los distintos combustibles.

### 3.2 Métodos indirectos

La utilidad de los métodos directos es limitada al no poder emplearse en sitios lejanos o de difícil acceso (Catchpole *et al.*, 2001). Por ello, resulta más útil estimar el CH con métodos indirectos a partir de parámetros ambientales (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001) o que puedan conocerse a la distancia. La determinación indirecta del CH se puede realizar a través de índices, derivados de imágenes satelitales (Chuvienco *et al.*, 2004a; Todone, 2009; Nieto *et al.*, 2010) o a partir de variables ambientales más fáciles de medir, generalmente meteorológicas (Van Wagner, 1987; Marsden-Smedley y Catchpole, 2001; Viegas *et al.*, 2001; Dimitrakopoulos y Bemmerzouk, 2003).

Los índices obtenidos mediante sensores remotos se utilizan para estimar el CHCV, siendo muy útiles para grandes superficies con vegetación uniforme. Estudios en laboratorio demostraron que el CH de las hojas está muy relacionado con la información de onda corta infrarroja (SWIR) registrada por algunos sensores (Chuvienco *et al.*, 1991). Se han encontrado buenas correlaciones entre el CH e índices derivados de imágenes satelitales como el 'índice de

vegetación de diferencia normalizada' (NDVI) para pastizales y otras herbáceas, pero los resultados al aplicarlo para bosques no han sido buenos (Chuvienco *et al.*, 2004b). Las correlaciones más altas comparando datos obtenidos con el método gravimétrico y datos obtenidos por medio de sensores remotos se observaron para aquellas bandas en el infrarrojo medio o de onda corta (SWIR) para pastizales y en el infrarrojo cercano (NIR) para arbustales. Las correlaciones para los arbustales, fueron generalmente más bajas que para pastizales (Yebra *et al.*, 2008). El uso de imágenes térmicas, para registrar la temperatura del dosel (T) también ha sido muy utilizado, ya que la temperatura del dosel es afectada por los cambios en el CH al estar muy relacionada la disponibilidad de agua con la evapotranspiración (Chuvienco *et al.*, 2004b). En general, la relación NDVI/T brinda el mejor indicador de CH mediante el uso de sensores remotos. Sin embargo, en áreas con vegetación compuesta por especies con distintas características fisiológicas y estructurales, el método directo es más exacto (Viegas *et al.*, 1992; Matthews, 2010). Incluso, algunos autores afirman que la contribución del CH de todo el dosel arbóreo a la reflectancia registrada por los sensores remotos es mucho más débil en comparación con otros factores como geometría de la hoja, sombras, estado del suelo, etc. (Chuvienco *et al.*, 1991). El empleo de metodologías relacionadas con la inversión de modelos de transferencia radiativa parecen ser promisorios para incrementar la precisión de medición de CH en grandes superficies (Yebra *et al.*, 2008, 2010).

Los índices derivados de variables ambientales, aunque desarrollados para evaluar las condiciones de sequía o el CHCM, son útiles para estimar el CHCV de algunas especies (Viegas *et al.*, 2001; Dimitrakopoulos y Bemmerzouk, 2003).

Las investigaciones más recientes se han enfocado en el desarrollo de modelos matemáticos basados en los procesos físicos que gobiernan los cambios en el CH y brindan predicciones muy precisas (Nelson, 2000; Wittich, 2005; Matthews, 2006; Matthews *et al.*, 2010). Estos modelos están asociados a variables ambientales y requieren de cálculos matemáticos muy complejos, por ello y aunque sus estimaciones son acertadas, no resultan prácticos ni de fácil aplicación para fines operativos cuando los recursos en general (personal, tiempo, capacidad de cálculo, etc.) son escasos.

En general, los materiales disponibles en el campo son anemómetros y psicrómetros portátiles, lápiz, papel y calculadora de mano. En esas condiciones es preferible resignar algo de precisión del modelo a cambio de mayor simplicidad (Sharples y Mcrae, 2011). Existen modelos semi-físicos de cálculos sencillos y adaptables a un gran rango de condiciones y sitios. Estos modelos se basan en la teoría de Byram (1959) sobre la difusión del agua en la madera, y por lo tanto, en la velocidad con la que el CH se aproxima al de equilibrio (Ruiz *et al.*, 2009). Uno de los más difundidos es el Índice Meteorológico de Peligro de Incendios canadiense (*Canadian Forest Fire Weather Index System*, FWI; Van Wagner, 1987). El cálculo del FWI está relacionado con las variaciones de las condiciones atmosféricas de mediano y largo plazo, e incluye tres 'códigos': el FFMC (*Fine*

*Fuel Moisture Code*), el DMC (*Duff Moisture Code*) y el DC (*Drought Code*), que son indicadores relativos del contenido de humedad para combustibles finos, medianos y gruesos, respectivamente (Lawson y Armitage, 2008).

El FWI es utilizado en Canadá y también ha sido implementado en diversas regiones del mundo, por ejemplo, EEUU, Nueva Zelanda, Indonesia, Malasia, China, México, Portugal y sur de Europa (Vega-García *et al.*, 1999; Alexander y Cole, 2001; Rainha y Fernandes, 2002; Taylor y Alexander, 2006; de Groot *et al.*, 2006; Tian *et al.*, 2011). En la Argentina, este modelo ha sido evaluado con resultados satisfactorios en diversas regiones (Taylor, 2001; Dentoni *et al.*, 2006, 2007), pero es necesario continuar adaptándolo a las particularidades de los ecosistemas presentes en cada región para lograr su total implementación a nivel nacional.

Se debe tener en cuenta además que aunque la inflamabilidad de las especies vegetales (capacidad de un combustible de encenderse y mantenerse ardiendo) depende del CH, también influyen las características químicas del tejido de cada una, su fenología y el régimen de fuego del ecosistema en que se encuentran (Mutch, 1970). Si bien existe una relación entre el CHCV y su inflamabilidad, ésta no siempre es lineal (Trabaud, 1976).

#### 4. Consideraciones finales

Es necesario entender la relación entre el CH y las condiciones ambientales para su predicción diaria, o estimar sus características a lo largo de una temporada (Kreye y Varner, 2007). Los métodos analizados poseen ventajas y desventajas: los directos poseen gran precisión, pero consumen mucho tiempo y su empleo en grandes superficies es limitado. Por ello los métodos indirectos han presentado gran desarrollo en los últimos años, pero muchas veces falta un estudio de correlación entre los directos e indirectos, que permitiría obtener información precisa para grandes áreas.

En la Argentina como en otros países, la predicción del CH está limitada por la falta de conocimiento de su variabilidad espacio-temporal y de los muchos tipos de ambientes y combustibles presentes (Pook y Gill, 1993). El estudio del CH en ciertas especies clave, tanto árboles como arbustos y pastos de las distintas regiones del país, brindará información básica de utilidad tanto para el control de incendios como para la ejecución de quemas prescriptas y el manejo del fuego. El método gravimétrico es el más preciso y adecuado para estas investigaciones, debido a que no se requiere inmediatez en la obtención de los resultados o conocer el CH a la distancia, sino tener valores precisos de la dinámica del CH de un número importante de especies. El estudio de la dinámica del CH será una contribución básica que aporte al conocimiento de la dinámica del mismo que ya existe para otros ecosistemas del país (Bianchi, 2012). Esto permitirá asimismo contribuir gradualmente con la información necesaria para conformar el Sistema Nacional de Evaluación del Peligro de Incendios (SINEPI).

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Proyecto FP6-018505 FIRE PARADOX 'An innovative approach of integrated wildland fire management regulating the wildfire problem by the wise use of fire: solving the fire paradox', European Union, 6th Framework, y por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Área Estratégica Forrajes y Pasturas, Proyecto Específico 1503 'Incremento de la productividad de pastizales naturales' 2006-2009.

#### BIBLIOGRAFÍA

- AGEE, J.; WRIGHT, C.; WILLIAMSON, N.; HUFF, M. 2002. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management* 67: 57-66.
- AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; BORÉN, R.; NIETO, H. 2007. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *International Journal of Wildland Fire* 16: 390.
- ALESSIO, G.; PEÑUELAS, J.; LLUSIÀ, J.; OGAYA, R.; ESTIARTE, M.; DE LILLIS, M. 2008. Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. *International Journal of Wildland Fire* 17(2), 274-286.
- ALEXANDER, M. 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany* 60: 349-357.
- ALEXANDER, M. 2010. Foliar moisture content input in the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System for areas outside of Canada. En: VI International Conference on Forest Fire Research.
- ALEXANDER, M.; COLE, F. 2001. Rating fire danger in Alaska ecosystems: CFFDRS provides an invaluable guide to systematically evaluating burning conditions. *Fireline* 12: 2-3.
- ALEXANDER, M.; CRUZ, M. 2012. Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire* 21 95-113.
- ALVES, M.; BATISTA, A.; SOARES, R.; OTTAVIANO, M.; MARCHETTI, M. 2009. Fuel moisture sampling and modeling in *Pinus elliottii* Engelm. plantations based on weather conditions in Paraná - Brazil forest. *Biogeosciences and Forestry* 2: 99-103.
- ANDERSON, H. 1990. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 315-325.
- BECK, J.; ARMITAGE, O. 2004. Diurnal Fine Fuel Moisture Characteristics at a northern latitude. En: ENGSTROM, R.; GALLEY, K.; DE GROOT, W. (eds) "22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Temperate, Boreal and Montane Ecosystems," Tallahassee, FL. Pp 211-221. (Tall Timbers Research Station: Tallahassee, FL).
- BIANCHI, L. 2009. Moisture content dynamics of dead and live fuels of Patagonia, Argentina: its relationship with flammability and a meteorological fire danger index. Tesis de Maestría, Universidad de Lleida, España.
- BIANCHI, L.; DENTONI, M.; MUÑOZ, M.; DEFOSSÉ, G. 2012. Modelos de Combustibles en el ecotono bosque-estepa de la Patagonia andina: caracterización de las asociaciones arbustivas de acuerdo a su respuesta al fuego. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico Publicación Técnica N° 37. Esquel, Chubut. Argentina. 45pp.
- BLACKHALL, M.; RAFFAELE, E.; VELEN, T. 2012. Is foliar flammability of woody species related to time since fire and herbivory in northwest Patagonia, Argentina? (S Güsewell, Ed.). *Journal of Vegetation Science* 23: 931-941.

- BLACKMARR, W. 1971. Equilibrium moisture content of common fine fuels found in Southeastern forests. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station., Research Paper SE-74 Research Paper SE-74. (Asheville, NC)
- BLACKMARR, W.H. 1972. Moisture content influences ignitability of slash pine litter. USDA Forest Service-Southern Forest Experiment Station, Research Note SE-173 (Asheville, NC).
- BRADSHAW, L.; DEEMING, J.; BURGAN, R.; COHEN, J. 1984. The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation. USDA, Forest Service. Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, UT. General Technical Report INT-169.
- BRAVO, S.; KUNST, C.; GIMÉNEZ, A.; MOGLIA, G. 2001. Fire regime of a *Elionorus muticus* Spreng. savanna, western Chaco region, Argentina. *International Journal of Wildland Fire* 10: 1-8.
- BURGAN, R. 1979. Estimating Live Fuel Moisture for the 1978 National Fire Danger Rating System. USDA For. Serv. - Intermt. For. and Range Exp. Stn., Res. Pap. INT-226 (Ogden, Utah). 16 pp.
- BYRAM, G. 1959. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire Control and Use*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- CANADIAN INTERAGENCY FOREST FIRE CENTRE. 2002. Glossary of forest fire management terms. Canadian Interagency Forest Fire Centre, (Winnipeg, Manitoba).
- CATCHPOLE, E.; CATCHPOLE, W.; VINEY, N.; McCAW, W.; MARSDEN-SMEDLEY, J. 2001. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire* 10: 215-222.
- CHENEY, P.; SULLIVAN, A. 2008. 'Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour.' De Krester A. (Ed). CSIRO Publishing: Collingwood VIC, Australia.
- CHUVIECO, E.; VAUGHAN, P.; RIAÑO, D.; COCERO D. 1991. Fire danger and fuel moisture content estimation from remotely sensed data. En: *The Joint Fire Science Conference and Workshop*. 7 pp.
- CHUVIECO, E.; COCERO, D.; RIAÑO, D.; MARTIN, P.; MARTÍNEZ-VEGA, J.; DE LA RIVA, J.; PÉREZ, F. 2004a. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment* 92: 322 - 331.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; DIMITRAKOPOULUS, P. 2004b. Conversion of fuel moisture values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2284-2293.
- CHATTO, K.; TOLHURST, K.G. 1997. Development and testing of the Wiltronics T-H moisture meter. Research Report 46, Department of Natural Resources and Environment, Fire Management Branch, Victoria, Australia.
- COUNTRYMAN, C.; DEAN, W. 1979. Measuring Moisture Content in Living Chaparral: a field user's manual. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station. General Technical Report PSW-36. 28 pp.
- DE GROOT, W.; WARDATI, C.; WANG, Y. 2005. Calibrating the fine fuel moisture code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire* 14., 161-168.
- DE GROOT, W.; FIELD, R.; BRADY, M.; ROSWINTIARTI, O.; MOHAMAD, M. 2006. Development of the Indonesian and Malaysian Fire Danger Rating Systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12: 165-180.
- DENTONI, M.; MAREK, D.; BIANCHI, L.; CIAMPOLI HALAMAN, M.; GUGLIELMIN, D.; MUÑOZ, M. 2006. Evaluación del peligro de Incendios en la región Andino Patagónica Norte. En "Ecofuego 2006," Esquel, Chubut. Argentina. P 13. (Esquel, Chubut. Argentina).
- DENTONI, M.; MUÑOZ, M.; EPELE, F. 2007. Implementación de un sistema nacional de evaluación de peligro de incendios: la experiencia argentina. En: *Organismo Autónomo de Parques Nacionales M. de MA (ed), P 12, 4th International Wildland Fire Conference*, Sevilla, España.
- DEXTER, B.; WILLIAMS, D. 1976. Direct field estimation of fine fuel moisture content. *Australian Forestry* 39: 140-144.
- DIMITRAKOPOULOS, A.; BEMMERZOUK, A. 2003. Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *International Journal of Biometeorology* 47: 73-79.
- FERNADES, P.; BOTELHO, H.; REGO F.; LOUREIRO C. 2008. Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1-19.
- FERNANDES, P.; LOUREIRO, C.; BOTELHO, H. 2012. PiroPInus: a spreadsheet application to guide prescribed burning operations in maritime pine forest. *Computer and Electronics in Agriculture* 81: 58-61.
- FIRE & EMERGENCY SERVICES AUTHORITY OF WESTERN AUSTRALIA. 2008. *Grass Curing Visual Guide for Western Australia*. 12pp.
- FISCHER, M.; DI BELLA, C.; JOBBAGY, E. 2012. Fire patterns in central semiarid Argentina. *Journal of Arid Environments* 78: 161-168.
- GANTEAUME, A.; MARIELLE, J.; CORINNE, L-M.; THOMAS, C.; LAURENT, B. 2011. Effects of vegetation type and fire regime on flammability of undisturbed litter in Southeastern France. *Forest Ecology and Management* 261: 2223-2231.
- HELLY, C.; ALLEAUME, S. 2006. Fire regimes in dryland landscapes. Cap. 16, pag. 283-301. En: D'ODORICO, P., PORPORATO, A.: *Dryland Ecohydrology*. Springer Verlag.
- JOLLY, W. 2007. Sensitivity of a surface fire spread model and associated fire behaviour fuel models to changes in live fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire* 16: 503-509.
- JOLLY, W.; HADLOW, A. 2012. A comparison of two methods for estimating conifer live foliar moisture content. *International Journal of Wildland Fire* 21: 180-185.
- KOMAREK, E. 1965. *Fire Ecology-Grasslands and man*. En: *Tall Timbres Fire Ecology Conference*, Pp 169-220.
- KREYE, J.; VARNER, J. 2007. *Moisture Dynamics in Masticated Fuelbeds: A Preliminary Analysis*. Proc. The fire environment—innovations, management, and policy, Destin, FL. pp. 173-186
- KUNST, C.; BRAVO, S.; MOSCOVICH, F.; HERRERA, J.; GODOY, J.; VÉLEZ S. 2001. Control de tusca (*Acacia aroma* Gill ap. H. et A.) mediante fuego prescripto. *Rev. Arg. Prod. Animal*. 20: 199-213.
- KUNST, C.; LEDESMA, R.; CASILLO, J.; GODOY, J. 2006. Rolados y residuos leñosos: Il Dinámica del contenido de humedad de combustibles de origen leñoso. *CIEFAP, Actas Ecofuego* 2006. 217-219.
- LAWSON, B.; ARMITAGE, O. 2008. *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*.
- MARSDEN-SMEDLEY, J.; CATCHPOLE, W. 2001. Fire modeling in Tasmanian buttongrass moorlands. III: Dead fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire* 10: 241-253.
- MATTHEWS, S. 2006. A process-based model of fine fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire* 15: 155-168.
- MATTHEWS, S.; McCAW, W.; NEAL, J.; SMITH, R. 2007. Testing a process-based fine fuel moisture model in two forest types. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 23-35.
- MATTHEWS, S. 2010. Effect of drying temperature on fuel moisture content measurements. *International Journal of Wildland Fire* 19: 800-802.

- MATTHEWS, S.; GOULD, J.; McCAW, L. 2010. Simple models for predicting dead fuel moisture in eucalyptus forests. *International Journal of Wildland Fire* 19: 459–467.
- MCPHERSON, G.; WRIGHT, H. 1986. Threshold requirements for burning downed honey mesquite. *Journal of Range Management* 39: 327–330.
- MÖLDERS, N. 2010. Comparison of Canadian Forest Fire Danger Rating System and National Fire Danger Rating System fire indices derived from Weather Research and Forecasting (WRF) model data for the June 2005 Interior Alaska wildfires. *Atmospheric Research* 95: 290–306.
- MORELLO, J.; SARAVIA TOLEDO, C. 1959. El bosque chaqueño I y II. *Rev. Agronómica del Noroeste Argentino*, 3: 5-81/209-258.
- MUTCH, R. 1970. Wildland fires and ecosystems—a hypothesis. *Ecology* 51: 1046–1051.
- NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP. 2011. Glossary of Wildland Fire Terminology. National Wildfire Coordinating Group - USDA, PMS 205. 189 pp.
- NELSON, R. 2000. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1071–1087.
- NELSON, R. 2001. Water relations of forest fuels. Ch. 4, 79–149. En: JOHNSON, E.; K. MIYANISHI, K: Forest fires: behavior and ecological effects. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- NIETO, H.; AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; SANDHOLT, I. 2010. Dead fuel moisture estimation with MSG–SEVIRI data. Retrieval of meteorological data for the calculation of the equilibrium moisture content. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 861–870.
- PAUSAS, J.; MOREIRA, B. 2012. Flammability as a biological concept. *New Phytologist* 194: 610–613.
- PÉCH, G. 1969. The relevance of current hazard stick reading to the moisture content of logging slash. *The Forestry Chronicle* 45: 107–113.
- PELLIZZARO, G.; DUCE, P.; VENTURA, A.; ZARA, P. 2007. Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin. *International Journal of Wildland Fire* 16: 633 – 641.
- PLUCINSKI M., ANDERSON W. 2008. Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation. *International Journal of Wildland Fire* 17: 628–637.
- POOK, E.; GILL, A. 1993. Variation of live and dead fine fuel moisture in *Pinus radiata* plantations of the Australian-Capital-Territory. *International Journal of Wildland Fire* 3: 155–168.
- PYNE, S. 1984. Introduction to Wildland fire: Fire Management in the United States. John Wiley & Sons, Ed., New York.
- QI, Y.; DENNISON P.E.; SPENCER J.; RIAÑO D. 2012. Monitoring Live Fuel Moisture Using Soil Moisture and Remote Sensing Proxies. *Fire Ecology* 8: 71–87.
- RAÍNHA, M.; FERNANDES, P. 2002. Using the canadian fire weather index (FWI) in the Natural Park of Montesinho, NE Portugal: calibration and application to fire management. En: VIEGAS DX (ed) Forest fire research and wildland fire safety: IV International Conference on Forest Fire Research, Wildland Fire Safety Summit”, Luso, Coimbra, Portugal. P 6. Millpress, Rotterdam.
- RAY, D.; NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. 2005. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecological Applications* 15: 1664–1678.
- ROTHERMEL, R. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Intermountain Forest and Range Experiment Station - USDA Forest Service, Research Paper INT-115 Research Paper INT-115.
- ROTHERMEL, R. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-143
- RUIZ, A.; VEGA, J.; ÁLVAREZ J. 2009. Modelización de la variabilidad horaria de los contenidos de humedad en hojarasca de *Eucalyptus globulus*. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales* 18: 247–263.
- RUNDEL, P. 1981. Structural and chemical components of flammability. USDA Forest Service, General Technical Report WO-26: 183–207.
- RYAN, K. 2002. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica* 36: 13–39.
- SHARPLES, J.; McRAE R. 2011. Evaluation of a very simple model for predicting the moisture content of eucalypt litter. *International Journal of Wildland Fire* 20: 1000–1005.
- SULLIVAN, A.; BALL R. 2012. Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass. *Atmospheric Environment* 47: 133–141.
- SULLIVAN, A. 2010. Grassland fire management in future climate. Cap. 5, p. 173–208. *Advances in Agronomy* 106. Elsevier.
- TANSKANEN H., VENÄLÄINEN A., PUTTONEN P., GRANS-TRÖM A. 2005. Impact of stand structure on surface fire ignition potential in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 410–420.
- TAYLOR, S. 2001. Considerations for applying the Canadian Forest Fire Danger Rating System in Argentina. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Natural Resources Canada, BC Ministry of Forests Contract Ref. No. 14020-90/02 BC Ministry of Forests Contract Ref. No. 14020-90/02.
- TAYLOR, S.; ALEXANDER M. 2006. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. *International Journal of Wildland Fire* 15: 121–135.
- THE FOREST FOUNDATION, 2012: Fire severity related to fuel moisture content <http://www.calforestfoundation.org/pdf/Fire+Severity+Related+to+Fuel+Moisture+Content.pdf> (verificado: 11 de diciembre de 2012)
- TIAN, X.; McRAE, D.; JIN, J.; SHU, L.; ZHAO, F.; WANG, M. 2011. Wildfires and the Canadian Forest Fire Weather Index system for the Daxing'anling region of China. *International Journal Of Wildland Fire* 20: 963–973.
- TODONE, J. 2009. Live fuel moisture prediction in *Nothofagus antarctica* forests and its relation to wildfire occurrence in Patagonia, Argentina. Universidad de Lleida, España.
- TRABAUD, L. 1976. Inflammabilité et combustibilité des principales espèces de garrigues de la région méditerranéenne. *Oecologia Plantarum* 11, 117–136.
- VALETTE, J.; 1992 INFLAMMABILITIES OF MEDITERRANEAN SPECIES. In “Course on Forest Fire Risk and Management,” Porto Carras, Halkidiki, Greece. Pp 1–12. (Porto Carras, Halkidiki, Greece)
- VAN NEST, T.; ALEXANDER M. 1999. Systems for rating fire danger and predicting fire behavior used in Canada. *Actas de National Interagency Fire Behavior Workshop*. 1 al 5 de marzo. Phoenix, Arizona
- VAN WAGNER, C. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* 7: 23–34.
- VAN WAGNER, C. 1987. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Petawa National Forestry Institute - Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35 Forestry Technical Report 35. (Chalk River, Ontario)

VEGA-GARCÍA, C.; WOODARD, P.; TITUS, S.; ADAMOWICZ, W.; LEE, B. 1999. Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canadá. *Investigación Agraria: Sistemas y recursos forestales* 8: 5–23.

VIEGAS, D.; VIEGAS, M.; FERREIRA, A. 1992. Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in Central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 2: 69–86.

VIEGAS, D.; PIÑOL, J.; VIEGAS M.; OGAYA, R. 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal Of Wildland Fire* 10: 223–240.

VINEY, N. 1991. A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire* 1: 215–234.

WITTICH, K. 2005. A single-layer litter-moisture model for estimating forest-fire danger. *Meteorologische Zeitschrift* 14: 157–164.

WITTICH, K. 2011. Phenological observations of grass curing in Germany. *International Journal of Biometeorology* 55: 313–318.

YEBRA, M.; CHUVIECO, E.; RIAÑO, D. 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 523–536.

YEBRA, M.; BEGET, M.E.; ORICCHIO, P.; DI BELLA, C. 2010. Inversión de modelos de simulación de la reflectividad para la estimación del estado hídrico del combustible vivo en matorrales y pastizales de la argentina. *Serie Geográfica*, 16:51-59).