

Modelización de la variabilidad horaria de los contenidos de humedad en hojarasca de *Eucalyptus globulus*

A. Ruiz^{1*}, J. A. Vega² y J. G. Álvarez¹

¹ Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior. Campus Universitario s/n. 27002 Lugo. España.

² Centro de Investigación Forestal de Lourizán. Apdo 127. 36080 Pontevedra. España.

Resumen

La humedad de los combustibles es variable fundamental de los sistemas de predicción del riesgo meteorológico de incendio forestal y de simulación del comportamiento de fuego actuales. En este trabajo se muestran patrones de variación de la humedad de la hojarasca de *Eucalyptus globulus* a lo largo del día en períodos libres de lluvia. Se analizan situaciones diversas en cuanto a exposición al sol, viento y condensación nocturna sobre los restos orgánicos vegetales, y se evalúa la capacidad de modelos de estimación disponibles en la literatura para seguir las tendencias. Se concluye resaltando el buen funcionamiento de un modelo de base física en las distintas condiciones planteadas así como la adecuación de determinados modelos empíricos a situaciones concretas. Se resalta la importancia de la condensación de humedad sobre el combustible así como el rápido efecto desecante del sol que permite pasar, en un brevísimo intervalo de tiempo, de un combustible no inflamable a una situación claramente favorecedora de la propagación.

Palabras clave: Intercambio de vapor, humedad de equilibrio, riesgo de incendio, comportamiento del fuego.

Abstract

Modelling hourly variability in *Eucalyptus globulus* litter moisture content

Fuel moisture content is a basic parameter of the present fire danger rating systems and fire behaviour simulation programs. Diurnal *Eucalyptus globulus* litter fuel moisture content variation patterns in rain free periods are shown in this document. Several situations in relation to sun exposition, wind and nocturnal dead organic fuels dew are considered and the capacity of prediction models which are available in literature in order to follows the patterns is evaluated. It is concluded by emphasizing the good behaviour of a physically based model in the different conditions considered and the appropriate behaviour of particular empirical models to specific situations. Fuel moisture nocturnal latent heat effect is remarked together with the fast sun effect drying up litter which make possible to pass, in a very short time step, from a non inflammable fuel to a situation clearly well-disposed to fire propagation.

Key words: Vapour exchange, equilibrium moisture content, fire danger, fire behaviour.

Introducción

La inflamabilidad de las partículas vegetales que arden en el monte está condicionada por su humedad pues controla la probabilidad de ignición (Blackmarr, 1972; Wilson, 1985; de Groot *et al.*, 2005) y el tiempo necesario para la misma (Trabaud, 1976; Valette, 1992; Albini y Reinhard, 1995; Dimitrakopoulos y Papaioannou, 2001). La humedad de los elementos del complejo repercute en la facilidad de propagación y en el compor-

tamiento del fuego (Rothermel, 1972; Albini, 1985; Cheney *et al.*, 1998). Determinar el contenido en agua de los combustibles, fundamentalmente de los finos, es muy importante desde un punto de vista práctico. Permite valorar, en cada momento, el riesgo de incendio así como su comportamiento potencial. Su conocimiento también es prioritario durante la ejecución de trabajos preventivos de reducción de cargas con fuego prescrito, no solo por su relación con la propagación del fuego, sino también por los posibles efectos sobre el suelo y la

* Corresponding author:

Received: 10-02-09. Accepted: 13-07-09.

regeneración de la vegetación. La humedad del mantillo y de los restos gruesos es entonces la que cobra un mayor interés.

La determinación de la humedad de forma directa, bien por secado en estufa (Norum y Miller, 1984) o por métodos químicos (Dexter y Williams, 1976; Hartley y Marchant, 1995) presenta inconvenientes que imposibilitan su uso en la práctica (Chatto y Tolhurst, 1997). Hay que recurrir a métodos indirectos, más sencillos. Entre ellos destaca por su gran operatividad, ya que no precisa de la toma de muestras en campo, la estimación de la humedad a partir de variables ambientales (Marsden-Smedley y Catchpole, 2001).

Trabajos pioneros sobre modelización de humedad en partículas muertas son, entre otros, los de Gisborne (1928), Jemison (1935), Hayes (1941 y 1944), Byram (1940) y Byram y Jemison (1943). Sin embargo, a pesar que ya se lleva casi un siglo trabajando sobre el mismo tema aún se considera que no es tarea fácil. Son dos los motivos que dificultan esta modelización: las partículas no son homogéneas (Chandler *et al.*, 1991) y los mecanismos y procesos físicos implicados en la dinámica de la humedad son complejos y variados (Nelson, 2001; Kunkel, 2001; Matthews, 2006). Los combustibles muertos, ya sean leñosos o herbáceos, están inmersos en un proceso continuo de variación de humedad en el que se alternan ciclos de humedecimiento y de secado (Simard y Main, 1982). Hatton *et al.* (1988) indican que a lo largo de un solo día los combustibles finos y muertos de la superficie pueden recorrer todo el rango de humedades acontecidas a lo largo de una estación completa, y es que la humedad a lo largo del ciclo diario responde a los cambios que se van produciendo en el tiempo atmosférico. El contenido en agua se incrementa por adsorción de vapor de agua de la atmósfera puesto que las partículas celulósicas muertas son higroscópicas (Simard, 1968). También se incrementa cuando agua libre, de precipitación o condensación, se deposita sobre la superficie de las partículas y se introduce a través de poros hacia cavidades internas (Hatton y Viney, 1988). Por último, se humedecen directa o indirectamente a partir de la humedad del suelo cuando están en contacto con el mismo (Hatton *et al.*, 1988; Pook y Gill, 1993). En sentido opuesto, se secan por drenaje, evaporación y desorción de vapor. Adsorción y desorción son procesos complementarios gobernados por la velocidad de difusión del agua a través de la partícula, la humedad relativa y la temperatura (Anderson, 1990; Nelson, 2001). El viento y el calentamiento solar son otros factores atmosféricos que afectan de forma importante a

la humedad (Byram, 1940; Rothermel *et al.*, 1986; Viney, 1991). La dinámica de la humedad también depende de propiedades físicas particulares de cada elemento, por ejemplo del grosor o el grado de descomposición (Anderson, 1990) y de las características del estrato donde se ubica, por ejemplo de la compactación (Pyne *et al.*, 1996). La localización en la masa así como la gestión selvícola de la misma también influyen en la humedad (Pook y Gill, 1993).

Frente a este panorama de fuentes y de procesos de variación se pueden encontrar en la literatura gran diversidad de modelos, muchos de ellos de reconocida operatividad y ampliamente utilizados con fines preventivos y de manejo del fuego. Los modelos se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios como pueden ser su naturaleza o la fuente de humedad que consideran (Ruiz y Vega, 2007). En este sentido hay que decir que la mayor parte son incompletos pues no contemplan todas las fuentes de humedad posibles ni todos los procesos implicados. Los trabajos de McArthur (1962, 1966 y 1967) son el punto de referencia de la modelización empírica limitada al intercambio de vapor entre la atmósfera y el combustible. Sus modelos, muy sencillos de aplicar, permiten estimar la humedad de la hojarasca de eucalipto y de la vegetación herbácea seca, a partir de la temperatura y de la humedad relativa del aire tal y como se medirían con un psicrómetro portátil. En la misma línea podemos citar modelos posteriores como los de Vega y Casal (1986) para *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus*, Pook (1993) para *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.*, o el de Marsden-Smedley y Catchpole (2001) basado en la humedad relativa y el punto de rocío para vegetación herbácea característica de Tasmania (Australia). Otros modelos empíricos son más completos al incluir un término de precipitación. Ejemplos de estos últimos son los modelos iterativos de Sneeuwjagt y Peet (1998) para hojarasca y mantillo en masas de *Eucalyptus sp.* en Australia; los de Ruiz (2005) para los mismos combustibles en masas de *Pinus pinaster* y *P. radiata*; los de Saglam *et al.* (2006) también para hojarasca y mantillo en rodales de *Pinus nigra* y *P. brutia* en Turquía, o los de Kwiatkowski y Ubysz (2006) para hojarasca de *Pinus sylvestris* en Polonia. Otros modelos, conocidos como de humedad de equilibrio (equilibrium moisture content, EMC), basan sus estimaciones en observaciones de temperatura y humedad relativa del aire en contacto con la partícula (Viney, 1991; Marsden-Smedley y Catchpole, 2001). Esto implica que para predecir la

humedad de partículas de la superficie sea necesario recurrir a metodologías de estimación de las variables a dicha altura como son las de Byram y Jemison (1943), Van Wagner (1969) o el método de Haltiner incluido en Bradshaw *et al.* (1983). Modelos de humedad de equilibrio disponibles en la literatura y utilizados a su vez por diferentes autores son los empíricos de Simard (1968) para madera en condiciones de desorción, Van Wagner (1972), Van Wagner y Pickett (1985) y Anderson *et al.* (1978) para hojarasca de coníferas. En la línea de una aproximación semifísica al proceso de modelización hay que destacar el modelo de equilibrio genérico de Nelson (1984) que plantea una relación lineal entre la humedad de equilibrio y la variación en el logaritmo de la energía libre de Gibbs. Esta relación ha sido particularizada por Anderson (1990) para hojarasca de distintas especies arbóreas de Norte América y por Marsden-Smedley y Catchpole (2001) para vegetación herbácea. También ha sido utilizada por Slijepcevic y Anderson (2006) para ajustar ecuaciones de estimación de la humedad de equilibrio de adsorción y de desorción en hojarasca de eucalipto a partir de los datos de equilibrio de King y Linton (1963). Un siguiente paso lo constituyen los modelos semifísicos de estimación de la humedad que se basan en la teoría de Byram sobre la difusión del agua en la madera, y por tanto en la velocidad con la que la humedad se aproxima a la de equilibrio. En su mayor parte son iterativos (bookkeeping) y se asocian a alguno de los modelos de equilibrio anteriormente expuestos. El máximo representante de este grupo es el Canadian Fine Fuel Moisture Code (Standard FFMC) del Canadian Forest Fire Weather Index system (FWI), estimador de la humedad mínima diaria de la hojarasca de coníferas en masas umbrosas de Canadá y documentado en Van Wagner y Pickett (1985), Van Wagner (1987) ó Canadian Forestry Service (1987). Otros importantes modelos de estimación diaria como el de Rothermel *et al.* (1986) incluido en el Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System (BEHAVE -Andrews, 1986) para combustibles más expuestos que los canadienses, o el Reindeer Lichen Moisture Code (Pech, 1989) para combustibles con gran capacidad de pérdida y ganancia de humedad, mantienen la misma estructura que el Standard FFMC. En la mayor parte de estos modelos semifísicos e iterativos, que en general también cuentan con versiones horarias para poder estimar la humedad en cualquier momento a lo largo del día, tiene un gran peso la precipitación sobre la humedad de los restos.

Catchpole *et al.* (2001) conjugan la solución de la ecuación diferencial de Byram con el modelo de humedad de equilibrio genérico de Nelson (1984). Slijepcevic y Anderson (2006) particularizan el método de Catchpole *et al.* (2001) para eucalipto. Los modelos Fosberg incluidos en el National Fire-Danger Rating System (NFDRS) documentado en Bradshaw *et al.* (1983), Cohen y Deeming (1985) o Burgan (1988) también se basan en la teoría de Byram sobre la pérdida exponencial de humedad de los combustibles en su búsqueda del equilibrio pero están simplificados de forma que dejan de ser iterativos. Entre ellos, el de Fosberg y Deeming (1971), posteriormente modificado por Viney y Catchpole (1991), permite la estimación de la humedad mínima de los combustibles finos de la superficie. El Fire Behavior Officer model (FBO) de Rothermel (1983) es una adaptación del modelo diario de Fosberg y Deeming (1971) para poder estimar la humedad a lo largo del día. Por último están los modelos esencialmente físicos como el de Fosberg (1975); Viney y Hatton (1990) que incluye el efecto de la condensación sobre la humedad de los combustibles; Nelson (1991) y Matthews (2006). Este último es considerado como el primer modelo de proceso completo válido para estimar la humedad de la hojarasca de cualquier tipo y condición de humedad. Sin embargo su aplicación en la actualidad dista mucho de ser operativa debido al elevado número de parámetros incluidos en el modelo y a la información meteorológica precisa. Viney (1991), y posteriormente Ruiz y Vega (2007), efectuaron una revisión de los modelos de predicción de mayor operatividad relacionándolos además con los sistemas de predicción del riesgo de incendio y del comportamiento del fuego asociados.

En España el modelo más utilizado desde hace décadas por los Servicios de Defensa Contra Incendios Forestales es el FBO. Se emplea para estimar la Probabilidad de Ignición y el Índice de Propagación con el fin de disponer de información objetiva sobre la variación temporal y espacial del riesgo (Xunta de Galicia, 1992; Velez, 1999). En ocasiones también se utiliza para valorar la humedad antes de emprender una quema controlada o incluso para hacer predicciones del comportamiento del fuego potencial con fines de planificación. Las estimaciones, tanto de riesgo como de comportamiento, serán más acertadas cuanto más cercana a la realidad sea la estimación de la humedad del combustible. Sin embargo muchas veces el modelo FBO se utiliza por defecto, sin saber si realmente sus

estimaciones se ajustan a la humedad real. En este sentido, Rothermel *et al.* (1986) detectaron que, para diversas especies de Norte América, el FBO subestimaba la humedad de las hojas y ramillas finas de la superficie cuando están en sombra. Burgan (1987) observó que en combustibles expuestos al sol tiende a sobrestimar cuando las humedades son bajas y a subestimar durante la mañana, cuando las humedades son altas, pues no tiene en cuenta la condensación nocturna. Viney y Hatton (1989 y 1990) también apuntan que subestima la humedad de las hojas de *Eucalyptus globulus* durante la noche en masas de escasa cobertura mientras que sobrestima la de las ramillas. Ruiz (2005) indica que subestima la humedad de partículas finas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* en situaciones de sombra.

En Galicia, con aproximadamente 10.000 fuegos anuales (MIMAM, 2008), los incendios forestales constituyen un grave problema ecológico, económico y social. Bajo un panorama de clara y constante intencionalidad, son las condiciones meteorológicas, y por consiguiente, la humedad de los combustibles las que deciden los períodos y momentos de alta siniestrabilidad. Por tanto, es de utilidad contar con modelos de predicción fiables, y aplicables a complejos de combustible concretos y frecuentes como lo es la hojarasca de *Eucalyptus globulus*. Esta especie cubre en Galicia unas 400.000 ha entre masas monoespecíficas y mixtas en mezcla con *Pinus pinaster*, *Quercus robur*, o en menor medida con otras frondosas como *Betula alba* o *Castanea sativa* (Xunta de Galicia, 2001). De acuerdo con la estadística oficial de incendios (MIMAM, 2008), *Eucalyptus globulus* es la tercera especie arbórea más afectada por los incendios forestales en España y la primera de las frondosas, con más de 35.000 has quemadas en el decenio 1996-2005. En Galicia, donde arde en torno al 22,45% de la superficie arbolada nacional, y en dicho decenio, resultaron afectadas algo más de 21.000 ha de *Eucalyptus globulus*.

Son dos los objetivos planteados en este documento que a su vez permitirán avanzar en la mejora de las estimaciones de la humedad de la hojarasca de *Eucalyptus globulus* para su aplicación en la predicción del riesgo y del comportamiento del fuego: i) examinar la dinámica de la humedad de la hojarasca a lo largo del día en períodos libres de lluvia y bajo situaciones diversas de exposición al sol, viento y condensación nocturna; ii) evaluar la capacidad de modelos de predicción disponibles en la literatura para reproducir la dinámica de variación.

Material y métodos

Ubicación del ensayo, diseño y proceso de muestreo

La experiencia se llevó a cabo en una parcela de ensayos aledaña a la Escuela Politécnica Superior de Lugo de la Universidad de Santiago de Compostela. Se utilizó hojarasca traída en sacos desde una masa de *Eucalyptus globulus* de Palas de Rei (Lugo) que incluía los siguientes componentes y proporciones: hojas (64,6%), ramillas (16,7%), trozos de corteza (17,4%), herbáceas secas (0,7%), y otros materiales (0,6%). Las proporciones se expresan en porcentaje respecto a biomasa seca total y se obtuvieron tras clasificar un 15% de las muestras extraídas a lo largo del ensayo.

La hojarasca se dispuso en una zona protegida por un vallado metálico de tres formas distintas: i) directamente sobre el suelo, y al sol; ii) directamente sobre el suelo, y a la sombra; iii) en el interior de una caseta para ubicación de instrumentos meteorológicos de lectura manual. Las parcelas de sol y sombra ocupaban cada una 9 m² y el terreno sobre el que se ubicaron estaba cubierto de vegetación herbácea recién cortada y en su mayor parte seca. La sombra se creó artificialmente mediante una malla de polietileno (70% de protección frente al sol) colocada a 1,20 m del suelo que amortiguó la temperatura a nivel de superficie y redujo considerablemente la velocidad del viento con respecto a la parcela totalmente expuesta. En el interior de la caseta se dispusieron cuatro bandejas con hojarasca cuya humedad pasó a estar controlada únicamente por el intercambio de vapor con la atmósfera, libre de la influencia del rocío nocturno, humedad del suelo, viento o insolación. En esta situación, además, la temperatura en el entorno de la partícula coincide con la temperatura del aire. Técnicas similares han sido utilizadas por Hatton *et al.* (1988), Pook (1993), Ruiz y Vega (2006) y Ruiz *et al.* (2009) y serían asimilables a las tres situaciones reales siguientes: i) hojarasca expuesta al sol debido a la realización de una corta o por tratarse de masas abiertas; ii) hojarasca en masas cerradas; iii) hojarasca suspendida en masas cerradas y en el rango higroscópico de humedades. La experiencia transcurrió entre el 25 y el 29 de agosto de 2008 y consistió en tomar muestras cada hora entre las nueve de la mañana y las ocho tarde, con excepción del primer día en el que se comenzó a las diez de la mañana y el último en el que se finalizó a la una de la tarde. En cada momento de muestreo se llenaban dos botes (capacidad un litro) de la parcela en sombra y otros dos de la parce-

la al sol. Las muestras se iban cogiendo bien distribuidas por toda la superficie y se llevaban rápidamente al laboratorio para su pesado y secado. Cada bote contenía en torno a 50 gramos de hojarasca una vez seca. Adicionalmente se trasladaban dos de las bandejas de la caseta que eran devueltas rápidamente a su sitio tras pesarlas y sin secar. Las bandejas se iban alternando pues al ser el intervalo entre mediciones consecutivas muy corto (una hora), la dinámica de la humedad podría verse afectada por las condiciones atmosféricas del laboratorio. De cualquier forma en el proceso no se tardó nunca más de 15 minutos, valor inferior a los tiempos de respuesta dados por Slijepcevic y Anderson (2006) para hojarasca de eucalipto. La humedad de las muestras se determinó por gravimetría tras 24 horas de secado a 100°C (Norum y Miller, 1984).

Información meteorológica

Se ubicó una estación meteorológica portátil HOBO dotada de diversos sensores en el mismo recinto del

ensayo. Además en cada una de las parcelas se colocó un sensor de temperatura a nivel del suelo, y en la caseta otro de temperatura y humedad relativa. La información atmosférica se complementó puntualmente con la suministrada por la Estación Campus de Lugo, situada a 200 metros del ensayo, y perteneciente a la red de estaciones automáticas de MeteoGalicia (Xunta de Galicia, 2008).

Modelos de predicción

En la tabla 1 se muestran los modelos de estimación cuyo potencial para reproducir los patrones de variación horaria de la humedad de la hojarasca de eucalipto se ha estudiado. En el texto los modelos aparecen nombrados por sus acrónimos o en su defecto por el nombre de los autores. Gran parte de los modelos están explicados con detalle en Ruiz y Vega (2007) de forma que únicamente se indicarán las consideraciones particulares que se haya hecho al aplicarlos. Por ejemplo, los modelos de EMC se han probado con la temperatura y la humedad relativa del aire pero también de forma más estricta con las varia-

Tabla 1. Modelos de estimación evaluados

Referencia/nombre en el texto	País	Tipo	Modelo de EMC intermedio
McArthur (1962)/CBEF ^(1,2)	AU	I*/e	
McArthur (1966)/GFDM ^(1,2)	AU	I	
McArthur (1967)/FFDM ⁽¹⁾	AU	I/e	
Simard (1968)/Simard	CA	II	
Van Wagner (1977)/Hourly FPMC ^(1,2)	CA	III*/b	Van Wagner y Pickett (1985)
Anderson <i>et al.</i> (1978)/Anderson <i>et al.</i>	USA	II*	
Rothermel (1983)/FBO ⁽²⁾	USA	III	Fosberg y Deeming (1971) ⁽²⁾
Nelson (1984); King y Linton (1963)/King y Linton	AU	II*/e	
Van Wagner y Pickett (1985)/Van Wagner y Pickett	CA	II*	
Vega y Casal (1986)/Vega y Casal	ES	I/e	
Pook (1993)/LITTER1	AU	I	
Pook (1993)/AERIAL	AU	I	
Pook (1993)/SCREEN	AU	I	
Lawson <i>et al.</i> (1996)/Diurnal FPMC	CA	III*/b	Van Wagner y Pickett (1985)
Sneeuwjagt y Peet (1998)/SMC ^(1,2)	AU	IV*/b/e	
Marsden-Smedley y Catchpole (2001)/Equation1 ⁽¹⁾	AU	I	
Marsden-Smedley y Catchpole (2001)/Equation2	AU	II	Nelson (1984)
Catchpole <i>et al.</i> (2001);Slijepcevic y Anderson (2006)/DE ⁽¹⁾	AU	III*/b/e	Nelson (1984) ajustado a los datos de King y Linton (1963)
Ruiz <i>et al.</i> (2009)/Ruiz <i>et al.</i>	ES	I	

I = Modelos empíricos de intercambio de vapor; II = Modelos de EMC; III = Modelos semifísicos basados en la ley de Byram; IV = Modelos empíricos de intercambio de vapor y precipitación.

* Modelos con ecuaciones diferentes para adsorción y desorción de vapor. El resto no distinguen entre las dos situaciones y en el caso concreto de Simard (1968) las ecuaciones solo reflejan la condición de desorción. b = Modelos bookkeeping. e = Modelos específicos para hojarasca de eucalipto. AU = Australia; CA = Canadá; USA = Estados Unidos; ES = España. ⁽¹⁾ Modelos evaluados por Slijepcevic y Anderson (2006); ⁽²⁾ modelos evaluados por Viney y Hatton (1989).

bles en el entorno de la partícula (en la caseta coinciden con las del aire pero en las experiencia al sol y a la sombra equivalen a las condiciones a nivel del suelo). Al no disponer de mediciones de humedad relativa a nivel del suelo se han estimado por el método de Byram y Jemison (1943). Lo mismo se puede decir del cálculo de la energía libre de Gibbs asociada a cada medición en Equation 2 y DE (tabla 1). Los modelos empíricos de intercambio de vapor se han probado con todos los datos de humedades observadas pero también teniendo en cuenta de forma estricta su dominio de aplicación. El modelo FFDM se ha aplicado con las correcciones sugeridas por McArthur (1967) para las observaciones de la mañana y los combustibles en sombra, y también sin ellas. En cuanto al modelo de Ruiz *et al.* (2009), se utilizó la versión reducida, más sencilla y además la única posible en las condiciones del estudio. Para el modelo Diurnal FFMC se calcularon los Standard Daily FFMC de cada día con la FF-scale a partir de las humedades observadas a las 16 horas UTC, y también a las 16 horas locales. Para iniciar las estimaciones es necesario contar con el valor del Standard Daily FFMC del día previo. En este estudio dicho valor se consideró igual al del primer día de mediciones pues el tiempo atmosférico fue similar en ambos. Las estimaciones con el modelo Hourly FFMC se inicializaron con la primera observación de cada día, mientras que el modelo SMC se inició asignado a la humedad mínima del día 24 la media de las mínimas de los días del ensayo, que fueron muy similares. Se hicieron los cálculos considerando dos valores para el índice de humedad nocturna: 50% y 100%. Para aplicar el método de Catchpole *et al.* (2001), que conjuga la solución de la ecuación diferencial (DE) de Byram con el modelo de equilibrio genérico de Nelson (1984), se ha seguido el mismo proceso de Slijepcevic y Anderson (2006). Se han probado además varios de los tiempos de respuesta deducidos por estos autores para partículas finas de eucalipto. Los cálculos se iniciaron cada día igualando la humedad de la hojarasca a la humedad de equilibrio estimada para ese momento. Para estimar la humedad de equilibrio se utilizó el modelo general de Nelson (1984) ajustado a los datos de equilibrio de King y Linton (1963) para hojas y ramillas de eucalipto (King y Linton en texto).

Tratamiento de la información

La capacidad de los modelos para reproducir los patrones de variación de la humedad a lo largo de la

mañana y de la tarde se analiza a partir de gráficos de evolución de las estimaciones frente a las observaciones. Con el mismo fin también se han calculado los coeficientes de correlación lineal de Pearson entre observaciones y predicciones. Para evaluar la capacidad de predicción de los modelos se calcula el error medio (E) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), estadísticos que indican respectivamente sesgo y precisión:

$$\text{Error medio } E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

Raíz cuadrada del error cuadrático medio

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

Donde y_i e \hat{y}_i son los valores de humedad observados y estimados, respectivamente y n es el número total de observaciones.

La información aportada por estos estadísticos se complementa con gráficos de dispersión en los que se enfrentan las humedades observadas frente a las predichas y se comparan con la recta 1:1. Gráficos de este tipo ayudan a analizar la tendencia a la subestimación o sobrestimación de los modelos. Debido al elevado número de modelos incluidos en el trabajo, así como las diferentes consideraciones efectuadas a la hora de su aplicación, el análisis gráfico presentado se reduce a unos pocos seleccionados por su menor valor de RMSE. Los estadísticos descriptivos de las observaciones, los coeficientes de correlación entre observaciones y predicciones, así como los empleados para comparar los modelos y evaluar su sesgo y precisión se han obtenido empleando el programa SAS/STAT (SAS Institute Inc. 2004).

Resultados

Tendencias de variación de la humedad y tiempo atmosférico

En la figura 1 se muestra la evolución de la humedad de la hojarasca a lo largo de la experiencia para las tres situaciones contempladas, y en la tabla 2 sus estadísticos descriptivos. Como era de esperar la humedad es máxima a primeras horas de la mañana (cuando la temperatura es menor) y alcanza, en los tres casos, un mínimo absoluto en torno a las 16 -17 horas locales (cuando

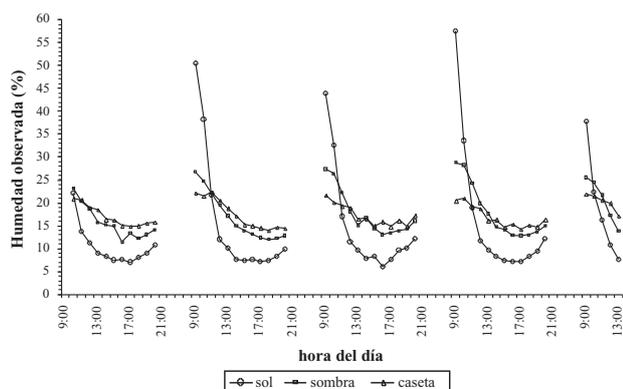


Figura 1. Evolución de la humedad de la hojarasca a lo largo de la mañana y la tarde de los días de ensayo. El último día solo se realizaron mediciones durante la mañana.

la temperatura es mayor). Sin embargo se puede definir una franja horaria más amplia, entre las 14 y las 18 horas, en la que la humedad se aproxima al mínimo. Destaca la elevada humedad por la mañana cuando la hojarasca está al descubierto así como su rápida velocidad de secado según va calentando el sol. Aunque el incremento nocturno de humedad es mayor en sombra que en caseta, a partir de las 11 de la mañana el patrón de variación de ambas situaciones es similar. En el entorno de las 10 -11 de la mañana la diferencia de humedad entre las tres situaciones es mínima, llegando incluso a igualarse (observar segundo día). Se intuye que en el entorno de las 21 - 22 horas las humedades de las tres situaciones se vuelven a aproximar.

Estos patrones de variación de la humedad se han obtenido bajo unas condiciones atmosféricas que se pueden considerar características de periodos sin lluvia en los veranos de amplias zonas de Galicia. En la tabla 3 se incluye información sobre dichas condiciones, y en la figura 2 se muestra la evolución de la temperatura a nivel del suelo y a 1,7 m (temperatura del aire) desde las 0:00 horas del día de inicio del ensayo hasta el final de la experiencia. La radiación solar máxima se registró entre las 13:00 y las 15:20 horas y osciló entre los 807

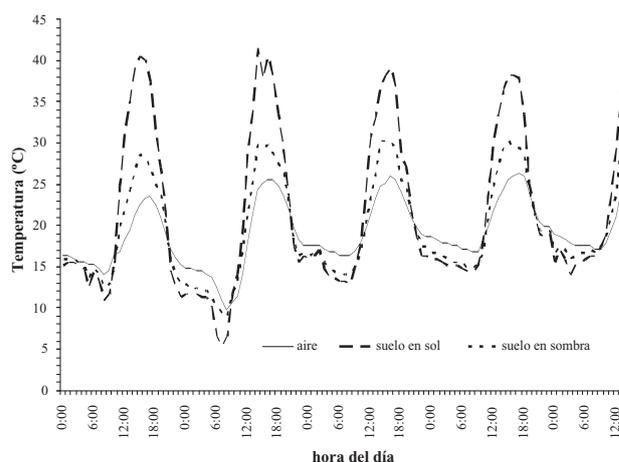


Figura 2. Evolución de la temperatura del aire y a nivel de partícula a partir de las 0 horas del día 25.

y los 893 W/m². El punto de rocío varió entre 8,7 y 18,6 °C. Aunque puntualmente se alcanzaron nubosidades de hasta el 50%, los días transcurrieron en su mayor parte despejados de nubes. El último día del ensayo, hacia las dos de la tarde, cayó una tormenta que puso fin a la experiencia.

La humedad de la hojarasca mostró una elevada correlación lineal (tabla 4) con la temperatura y la humedad relativa, tanto del aire como a nivel de partícula. Claramente la hojarasca se humedece al aumentar la humedad relativa y varía en sentido inverso a la temperatura. En la parcela en sombra y en la caseta el coeficiente de correlación aumenta ligeramente con las variables registradas la hora previa a la observación de la humedad, indicando la existencia de un ligero desfase entre humedad y situación atmosférica. Sorprendentemente la correlación con la velocidad del viento se reduce en la situación más expuesta. Respecto al punto de rocío la correlación es significativa y similar en las tres condiciones aunque de valor inferior a la mostrada con la temperatura y la humedad relativa. La correlación con la radiación solar es máxima en la situación más expuesta y mínima en la caseta, pero de cualquier forma significativa.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las humedades observadas

Situación	N	Mmedia (%)	Desv. est. (%)	Mmin (%)	Mmax (%)
Sol	52	14,7	11,9	6,1	57,5
Sombra	52	17,4	5,0	11,4	28,8
Caseta	52	17,5	2,6	14,0	22,4

M= humedad de la hojarasca; N = número de observaciones.

Evaluación de modelos

En la tabla 5 se presentan los estadísticos evaluadores del sesgo (E) y la precisión (RMSE) de los modelos cuando se aplican a las condiciones del estudio. También se muestran los coeficientes de correlación lineal entre estimaciones y observaciones de humedad. Marsden-Smedley y Catchpole (2001) indican que

Tabla 3. Tiempo atmosférico durante el desarrollo de la experiencia

Día	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Hmed (%)	Hmax (%)	Hmin (%)	hsol (h)	Ig (10kJ/m ²)	V (m/s)
25	17,6	24,1	14,1	74	90	51	10,9	2208	2,7
26	17,9	26,1	9,8	76	95	51	9,5	1951	2,2
27	20,0	25,8	16,4	78	87	59	9,1	1938	3,8
28	20,6	26,4	16,8	78	92	58	9,9	2035	3,3
29	21,0	30,4	17,0	75	94	34	6,2	1593	1,4

T = temperatura; H = humedad relativa; hsol = horas de sol; Ig = Irradiación global diaria; V = velocidad media diaria del viento.

cuando se pretende evaluar modelos que no tienen en cuenta la condensación de agua es conveniente eliminar los primeros datos de la mañana si es que superan el 30-35 % de humedad (punto de saturación de la fibra según Cheney (1981)). En este estudio se ha seguido esta recomendación. En casi todos los casos se incluye un sólo apunte por modelo. Así, en los modelos con ecuaciones distintas para desorción y adsorción sólo se muestran los estadísticos correspondientes al modelo completo, considerando que el paso entre ambas situaciones se produce entre las 16 y las 17 horas, momento en el que la humedad observada es mínima. En los modelos cuya aplicación se haya realizado de varias maneras, y claramente una de ellas sea más adecuada que las otras, sólo se muestran dichos resultados. Es el caso del modelo FFDM cuya utilización en el ensayo expuesto al sol resultó más precisa sin considerar las correcciones propuestas por McArthur (1967), mientras que en el ensayo a la sombra y en el de la caseta si se consideraron las correcciones. También es la situación de los modelos de Anderson *et al.*, Van Wagner y Pickett y Equation 2 que resultaron más precisos en sombra con la temperatura y la humedad relativa del aire mientras que en sol los mejores resultados se obtuvieron con las variables medidas al nivel del suelo, o el modelo de Simard que funcionó

mejor con las variables observadas en la estación meteorológica en las dos situaciones. El modelo SMC se ajustó mejor a la variación horaria de humedad con un valor del 50% para el índice nocturno. En otras ocasiones, como ocurre con el modelo Diurnal FFMC en sombra, aparecen dos apuntes que se corresponden con los cálculos para horas locales y solares respectivamente. Se incluyen ambos ya que contrasta la mayor precisión de los primeros frente a la mayor correlación lineal con las humedades observadas de los segundos. El modelo DE, así como el de equilibrio obtenido al aplicar la ecuación general de Nelson (1984) a los datos de King y Linton (1963) para hojarasca y ramillas funcionaron mejor en la parcela al sol con las variables medidas al nivel de la partícula mientras que en sombra admitió las dos formas de medición de las variables atmosféricas. Se probaron los tiempos de respuesta deducidos por Slijepcevic y Anderson (2006) para corteza y hojarasca, que oscilaron entre 0,48 y 0,62 minutos. Sin embargo, únicamente se muestran los resultados para los tiempos de respuesta de la hojarasca (0,48 minutos para temperatura y humedad relativa del aire y 0,57 para las variables al nivel de partícula) puesto que no hubo diferencias significativas con las estimaciones basadas en los tiempos de respuesta de la corteza.

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre las humedades observadas y diversas variables atmosféricas. Todos los valores son significativos al 99%

N = 52	T (°C)	T1h (°C)	T2h (°C)	H (%)	H1h (%)	H2h (%)	Dp (°C)	V (m/s)	Rd (W/m ²)	Ts (°C)
Sol	-0,79	-0,75	-0,64	0,83	0,78	0,66	-0,44	-0,61	-0,65	-0,80
Sombra	-0,80	-0,85	-0,81	0,86	0,92	0,88	-0,38	-0,71	-0,56	-0,85
Caseta	-0,87	-0,93	-0,91	0,87	0,96	0,95	-0,41	-0,84	-0,48	-0,87

T, T1h, T2h = temperatura del aire en el momento de la observación de la humedad, una hora y dos horas antes; H = humedad relativa en el momento de la observación de la humedad, una hora y dos horas antes; Dp = punto de rocío; Rd = radiación solar; Ts = temperatura al nivel de la partícula.

Tabla 5. Estadísticos evaluadores de los modelos aplicados y correlación lineal entre estimaciones y observaciones. Todos los valores son significativos al 99 %

Modelo	Sol			Sombra			Caseta		
	R	E	RMSE	R	E	RMSE	R	E	RMSE
CBEF	0,84	-2,30	3,38	0,92	3,38	4,76	0,93	3,99	4,11
GFDM	0,85	-1,74	2,67	0,82	4,06	4,94	0,81	4,14	4,81
FFDM	0,87	-0,54	1,70	0,86	0,49	3,09	0,85	0,60	4,06
LITTER1	0,84	-10,70	10,87	0,87	-4,90	5,51	0,84	-4,79	5,34
AERIAL	0,84	-5,75	6,24	0,87	0,41	3,00	0,84	0,53	1,60
SCREEN	0,84	-4,59	5,35	0,87	1,73	3,76	0,84	1,84	2,32
Ruiz <i>et al.</i>	0,70	-6,10	6,80	0,90	0,40	3,48	0,91	0,51	1,30
Vega y Casal	0,84	-0,92	2,76	0,86	5,33	6,21	0,84	5,44	5,62
FBO	0,88	-0,46	2,48	0,80	3,56	4,73	0,73	3,67	4,24
Diurnal FFMC hora local	0,90	0,70	1,98	0,91	0,82	2,23	0,80	-1,98	3,20
Diurnal FFMC hora UTC				0,97	-2,15	3,19			
Hourly FFMC	0,62	-19,45	21,04	0,87	-5,28	5,69	0,78	-2,65	3,03
SMC	0,73	-2,43	4,03	0,93	2,27	3,69	0,90	2,99	3,19
Simard	0,89	-1,62	2,64	0,87	4,17	4,89	0,82	4,28	4,79
Anderson <i>et al.</i>	0,96	1,13	1,99	0,88	2,46	3,43	0,85	2,57	3,64
Van Wagner y Pickett	0,92	0,77	2,22	0,89	0,45	2,26	0,88	0,57	2,30
Equation 1	0,87	-3,19	3,63	0,85	2,37	3,57	0,83	2,49	3,80
Equation 2	0,93	-4,46	4,87	0,90	0,94	2,87	0,80	0,99	3,01
DE (Ts y Hs)	0,94	-1,65	2,07	0,97	0,50	1,57			
DE (T y H)				0,90	-0,32	2,19	0,91	-0,21	2,03
King y Linton (Ts y Hs)	0,88	-1,10	2,20	0,92	1,10	2,32	0,84	0,17	2,23
King y Linton (T y H)				0,87	0,06	2,46	0,84	0,17	2,23

R = coeficiente de correlación lineal de Pearson; E = error medio; RMSE = raíz cuadrada del error cuadrático medio. T = temperatura del aire; H = humedad relativa del aire; Ts = temperatura medida al nivel de la partícula; Hs = humedad relativa estimada al nivel de la partícula. En caseta la temperatura y la humedad relativa del aire y al nivel de la partícula coinciden.

Las estimaciones de todos los modelos mostraron una elevada correlación lineal con las humedades observadas, con coeficientes superiores a 0,80 en la mayoría de los casos. Destacan las correlaciones (superiores a 0,90) mostradas por los modelos Anderson *et al.*, DE, Equation 2 y Van Wagner y Pickett en la experiencia al sol; Diurnal FFMC, DE, SMC, CBEF y el modelo de Nelson aplicado a los datos de equilibrio de King y Linton en la experiencia en sombra así como CBEF, Ruiz *et al.*, y DE en la caseta. Los siguientes modelos resultaron ser los más precisos para la estimación de la humedad de la hojarasca: i) en la experiencia en sol, FFDM, Diurnal FFMC hora local, Anderson *et al.*, DE, el modelo de Nelson aplicado a los datos de equilibrio de King y Linton y Van Wagner y Pickett, con valores de RMSE entre 1,7 y 2,2 expresados en humedad en %; ii) en la experiencia en sombra DE, Diurnal FFMC hora local, el modelo de Nelson aplicado a los datos de equilibrio de King y Linton y Van Wagner y Pickett, con RMSE entre 1,57 y 2,46 expresados en humedad en %; iii) en la experiencia en la caseta destacan Ruiz *et al.*, AERIAL, SCREEN y nuevamente DE, el modelo

de Nelson aplicado a los datos de King y Linton y Van Wagner y Pickett, con valores de RMSE entre 1,3 y 2,32 expresados en humedad en %. En la figura 3 se observa que todos estos modelos se ajustan relativamente bien a la evolución de la humedad observada a lo largo del día, resultando difícil decidir cual es el que mejor se adapta a cada situación. A partir de los gráficos de las figuras 4, 5 y 6 en los que se superponen las nubes de puntos observación-estimación sobre la recta 1:1 se puede analizar el sesgo de los modelos en todo su ámbito de aplicación mucho mejor que a partir del dato del error medio (E) incluido en la tabla 5.

Los modelos FFDM y King y Linton sobrestiman ligeramente la humedad de la hojarasca expuesta al sol para valores inferiores al 15% mientras que a partir de este valor la subestiman. El modelo Diurnal FFMC es insesgado hasta el 15% y de ahí en adelante tiende a subestimar. El modelo Anderson *et al.* subestima ligeramente mientras que el modelo DE sobrestima durante todo el rango de humedades. Por último, el modelo Van Wagner y Pickett no muestra una tendencia clara.

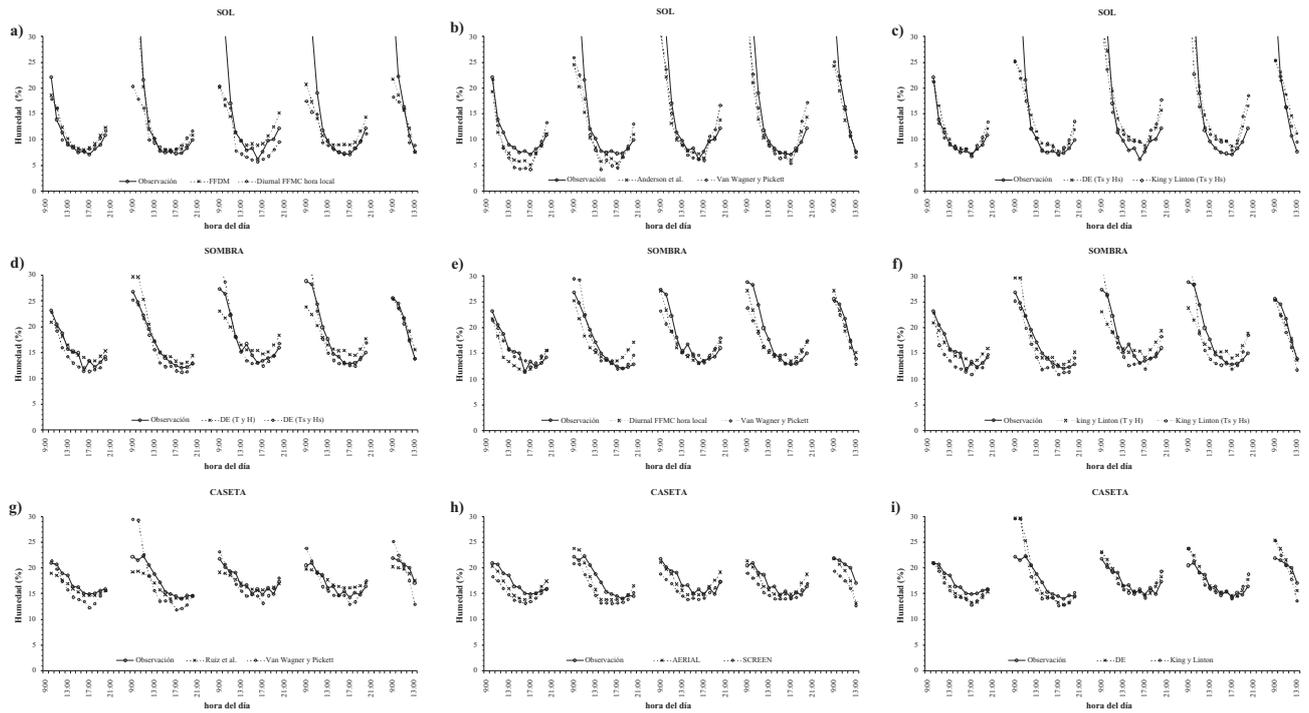


Figura 3. Evolución de la humedad observada y estimada por los modelos más precisos a lo largo de la experiencia y para las tres situaciones: ensayo expuesto al sol (fila superior); ensayo a la sombra (fila central) y ensayo en caseta (fila inferior). T y H = temperatura y humedad relativa del aire. Ts y Hs = temperatura y humedad relativa al nivel del suelo. En el ensayo en caseta ambas coinciden.

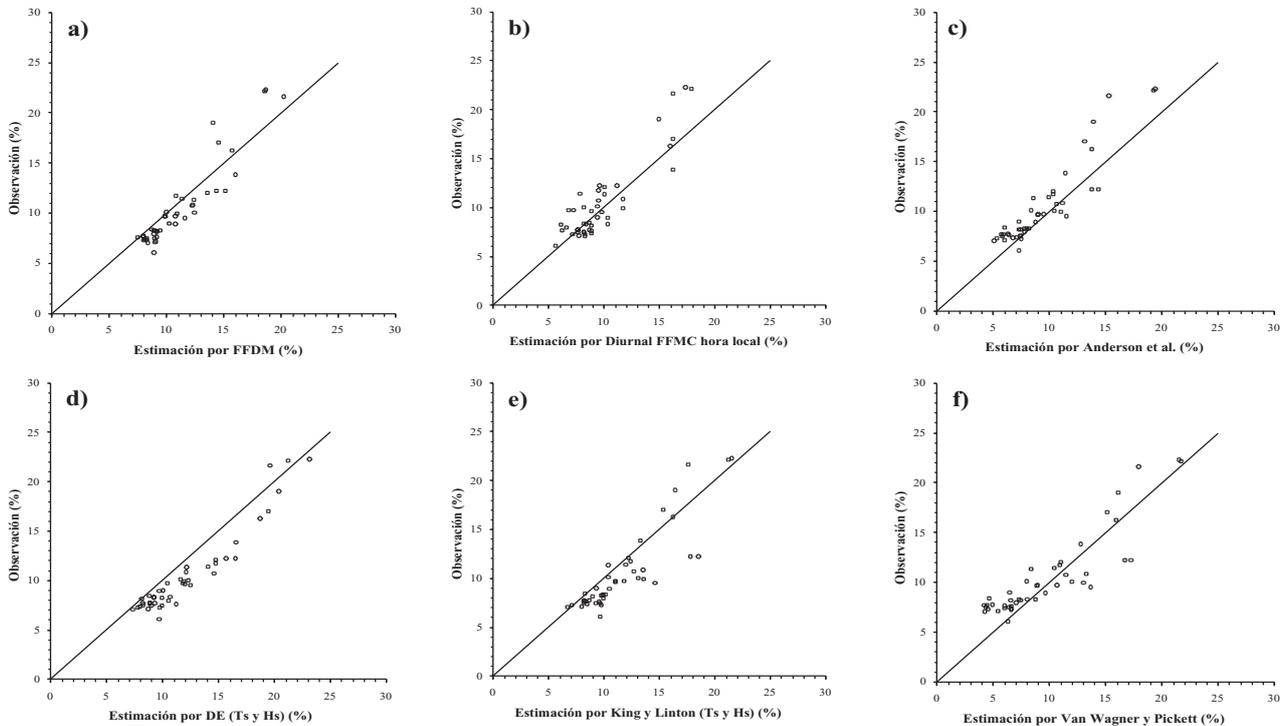


Figura 4. Humedad estimada por los modelos de menor RMSE - humedad observada en el ensayo expuesto al sol.

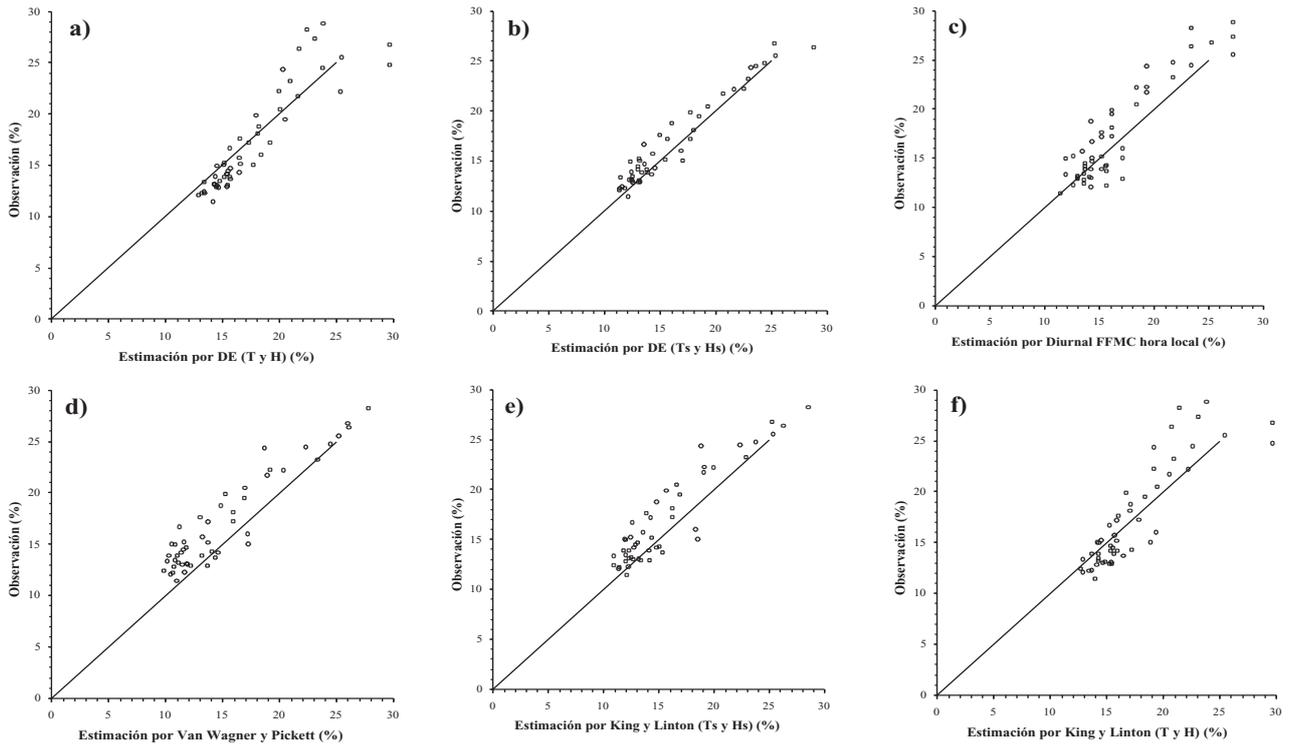


Figura 5. Humedad estimada por los modelos de menor RMSE - humedad observada en el ensayo a la sombra.

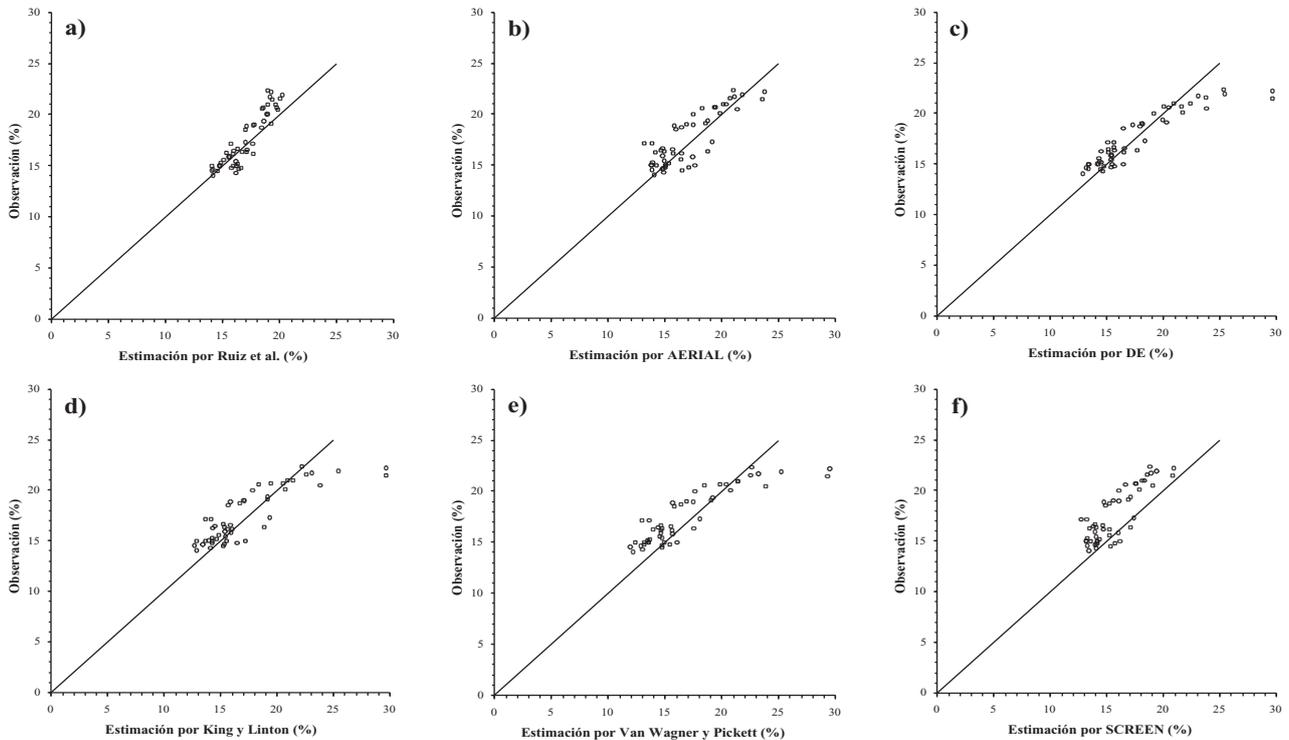


Figura 6. Humedad estimada por los modelos de menor RMSE - humedad observada en el ensayo en caseta.

En sombra, el modelo DE se muestra como insesgado a lo largo de todo el rango de humedades cuando se aplica con la temperatura y la humedad relativa del aire mientras que con las variables medidas al nivel del suelo subestima muy ligeramente. La distribución del modelo de Nelson aplicado a los datos de King y Linton es muy similar al anterior salvo en que los puntos están ligeramente más dispersos en torno a la recta 1:1 (menor precisión, ver tabla 5). El modelo Van Wagner y Pickett subestima a lo largo de todo el rango mientras que el modelo Diurnal FFMC es insesgado pero poco preciso para humedades inferiores al 20%, y sobrestima para valores altos.

En la experiencia en caseta claramente los modelos menos sesgados son Ruiz *et al.* y AERIAL. Los modelos DE, King y Linton y Van Wagner y Pickett sobrestiman para humedades altas mientras que SCREEN subestima a lo largo de todo el rango.

Discusión

Tendencias de variación de la humedad y tiempo atmosférico

Las elevadas humedades observadas en las primeras mediciones del día en el ensayo expuesto al sol se deben a la condensación nocturna de humedad puesto que el límite de agua retenida por higroscopia oscila entre 30-35% y no llovió a lo largo de la experiencia. Viney y Hatton (1990) observaron que sin aporte de agua de lluvia, la condensación podía incrementar la humedad de la hojarasca por encima del 110%. Se observó una clara relación entre el tiempo durante el cual la temperatura al nivel del suelo se mantuvo por debajo del punto de rocío a lo largo de cada noche y la humedad a primeras horas de la mañana. Así, durante las noches entre el primer y segundo día del ensayo, y entre el tercer y el cuarto día, este período superó en la parcela expuesta al sol 10 y 11 horas, respectivamente. Sin embargo, durante la noche previa al inicio de la experiencia únicamente rondó las tres horas. En cualquier caso, con los datos observados, hasta las 11 de la mañana no se puede decir que la adsorción y la desorción de vapor sean los mecanismos de variación de la humedad predominantes. En el ensayo en sombra también se observó condensación nocturna pero en mucha menor medida pues los períodos con temperatura inferior al punto de rocío fueron de menor duración e intensidad. La capacidad del sol para secar la hojarasca debido al incremento que provoca en la tem-

peratura de su superficie es muy importante (Rothermel *et al.*, 1986; Viney, 1991). En la experiencia se han observado pérdidas de humedad de hasta un 24% en una hora, un 46% en 3 horas o un 50% en 6 horas. Esto supone pasar en un breve período de tiempo de un combustible claramente no inflamable a otro con alta capacidad para la propagación del fuego. De acuerdo con Tolhurst y Cheney (1999), por encima del 28% la hojarasca de eucalipto es imposible de inflamar mientras que entre un 6 y un 9 % (rango en el que se sitúan las humedades mínimas observadas en el ensayo expuesto al sol) se puede considerar lo suficientemente seca como para ser muy fácil de inflamar, generar fuego salpicado y desarrollar fuegos muy intensos en combinación con vientos fuertes. En la misma línea McArthur (1967) indica que la velocidad de propagación se incrementa notablemente cuando la humedad de la hojarasca de eucalipto baja del 7%. Cheney (1981) apunta que la humedad de extinción para hojarasca de eucalipto oscila entre un 19 y un 20%. Viney y Hatton (1989) indican que el proceso de secado es especialmente rápido mientras se está evaporando el agua libre y que la velocidad de pérdida se va reduciendo conforme va quedando menos agua en las partículas, pero sobre todo cuando el mecanismo de secado pasa a ser la desorción de vapor. En nuestra experiencia se ha observado lo mismo. A la hora de valorar la humedad del combustible es importante ser conscientes de la variación temporal, pero también de la variación espacial (Hatton y Viney, 1988). Prueba de ello son las diferencias observadas entre las situaciones analizadas. Simard (1968) ya constató que los combustibles localizados en zonas expuestas directamente al sol alcanzaban durante el día humedades inferiores a los situados en zonas cercanas protegidos por el arbolado, y también que la amplitud del ciclo diario de variación a campo abierto es mayor que la de esos mismos combustibles bajo cubierta. De acuerdo con McArthur (1967) y Tolhurst y Cheney (1999) el efecto del sombreado puede provocar incrementos de humedad del 2% en la hojarasca de eucalipto con respecto a la situación a pleno sol. En este trabajo se han encontrado diferencias mayores, máximas de hasta un 7% en las horas centrales del día y medias diarias de un 2,7%. Ruiz y Vega (2006) observaron en hojarasca de pinaster diferencias de hasta un 9%. En cualquier caso es de esperar, en las zonas expuestas al sol y a igualdad del resto de factores que condicionan el desarrollo del incendio, mayores velocidades de propagación y longitudes de llama que bajo arbolado denso. A partir de media mañana la hojarasca ubicada en la caseta se man-

tuvo más húmeda que la de la parcela en sombra. La explicación está en la mayor temperatura en el entorno de la superficie en esta segunda situación. La elevada correlación lineal existente entre la humedad de la hojarasca y la velocidad del viento tiene fácil explicación debido a que durante los días de la experiencia el patrón de variación de dicha variable a lo largo del día fue muy similar a la forma de variar la temperatura, mostrando valores mínimos a primeras horas del día y máximos a media tarde para volver a reducirse al anochecer.

Evaluación de modelos

Las buenas correlaciones lineales existentes entre las humedades observadas y las estimaciones de los modelos indican que es posible recurrir a técnicas de regresión lineal como vía de obtención de modelos empíricos específicos para la hojarasca de eucalipto. El modelo de equilibrio obtenido al aplicar la ecuación general de Nelson (1984) a los datos de King y Linton (1963) para hojarasca y ramillas, así como el modelo DE de Catchpole *et al.* (2001) aplicado siguiendo los pasos de Slijepcevic y Anderson (2006) resultaron adecuados para las tres situaciones. Ambos modelos son específicos para eucalipto y si bien el segundo se mostró ligeramente más preciso que el primero también es bastante más complicado de aplicar. En relación con Diurnal FFMC (Lawson *et al.*, 1996), modelo que ha funcionado bien en las parcelas al sol y a la sombra, hay que tener en cuenta que para su cálculo se partió de los valores del Standard Daily FFMC (Canadian Forestry Service, 1987) de cada día determinados a partir de las humedades observadas a primeras horas de la tarde, es decir que se le obligó al modelo a pasar por un punto de humedad conocida. Esto no es posible en la realidad a no ser que recurramos a pronósticos meteorológicos. Por el contrario, hay que destacar el buen funcionamiento del modelo FFDM (McArthur, 1967) en situaciones soleadas por ser un modelo empírico de muy fácil aplicación y que no requiere ninguna suposición ni hipótesis de partida. Es, además, un modelo específico para hojarasca de eucalipto. Del resto de los modelos seleccionados por su precisión, resaltar también la facilidad de aplicación de AERIAL y SCREEN (Pook, 1993) así como de Ruiz *et al.* (2009). AERIAL y SCREEN son modelos empíricos específicos para acículas secas y suspendidas de *Pinus radiata*. AERIAL se construyó a partir de datos de humedades observados en masas de pino reales mientras que SCREEN y Ruiz *et al.* (2009)

proceden de experiencias similares a la de la caseta llevada a cabo en este estudio. Por tanto, se puede concluir que este tipo de experiencias son válidas para analizar la variación de la humedad de los combustibles muertos suspendidos, elemento de gran importancia en determinados complejos por su relación con la transición del fuego hacia las copas. Marsden-Smedley y Catchpole (2001) indican que a la hora de seleccionar un modelo hay que tener en cuenta que los empíricos de intercambio de vapor que se basan en mediciones de temperatura y humedad relativa como son AERIAL y SCREEN pueden no funcionar bien bajo condiciones atmosféricas diferentes a las del entorno de desarrollo del modelo ya que ambas variables habitualmente están muy correlacionadas. El modelo propuesto por Ruiz *et al.* (2009) se elaboró teniendo en cuenta la posible correlación lineal entre variables independientes del modelo de forma que desde este punto de vista sería preferible frente a los anteriores. La aplicación de los modelos de Anderson *et al.* (1978) y Van Wagner y Pickett (1985), modelos que también han dado lugar a errores aceptables, implica decidir en cada momento si el combustible está en condiciones de desorción o de adsorción, o fijar de antemano el momento del día en el que se produce el cambio. El modelo FBO, utilizado desde hace tiempo por los Servicios de Prevención y Extinción de Incendios en nuestro país ha funcionado relativamente bien para hojarasca expuesta al sol, mostrando un elevado coeficiente de correlación lineal (0,88) con las humedades observadas, tendencias de variación similares a estas (no mostradas en la figura 3), y valores de los estadísticos de comparación de modelos aceptables (-0,46 y 2,48 respectivamente para E y RMSE). Sin embargo, en las situaciones sombreadas la precisión del modelo se redujo bastante, subestimando en gran medida la humedad y alejándose de los patrones reales de variación, fundamentalmente en las horas centrales del día. Vega y Casal (1986) analizaron la aplicabilidad de los modelos FBO y CBEF para estimar la humedad de la hojarasca de *Eucalyptus globulus* en Galicia e indican que las humedades medias estimadas por estos modelos en días soleados y exposición de solana no difieren significativamente de las humedades observadas. Hatton *et al.* (1988), en Camberra (Australia) y con hojarasca de diversas especies de eucalipto, estudiaron la capacidad predictiva de los modelos FFDM (McArthur, 1967), Standard Daily FFMC (Canadian Forestry Service, 1987) y BEHAVE (Rothermel *et al.*, 1986) para estimar la humedad mínima diaria. Aunque los resultados no fueron muy buenos indican que el

modelo de McArthur (1967) es más apropiado cuando los suelos están secos y el de Rothermel para suelos húmedos tras la lluvia. En nuestro estudio el modelo FFDM ha resultado de los mejores en situaciones soleadas y para estimación a lo largo del día. Viney y Hatton (1989) evaluaron una serie de modelos entre los que se encuentran el Standard Daily FFMC, BEHAVE y los indicados en la tabla 1. Los autores proponen, aunque con mucha cautela, la mayor adecuación de los modelos de McArthur, FBO y Fosberg y Deeming (1971) frente al resto para estimar la humedad de la hojarasca de eucalipto en masas abiertas. En este trabajo también se analizan las tendencias de variación de los distintos componentes del estrato de hojarasca a lo largo del día indicando que durante la noche las hojas de eucalipto recogen más agua de condensación que las ramillas y los fragmentos de corteza debido a su forma. El predominio de hojas frente a los otros componentes en nuestra experiencia puede también explicar los altos valores alcanzados. Viney y Hatton (1990) indican que los modelos de intercambio de vapor no son adecuados cuando hay condensación de agua sobre las hojas de *Eucalyptus globulus* y proponen un modelo que contempla dicha fuente de humedad. Pook (1993) indica que dentro del rango higroscópico, los modelos sencillos de McArthur funcionan tan bien o mejor que otros modelos más complejos al aplicarlos a la hojarasca de eucalipto. Sin embargo, también añade que es conveniente calibrarlos teniendo en cuenta el tipo de combustible, localización y exposición al sol para alcanzar un mayor nivel de seguridad en la predicción de la humedad. En nuestro trabajo no hemos tenido en cuenta las posibles diferencias de humedad entre los distintos componentes de la hojarasca pues la hemos tratado en conjunto. En este sentido, Hatton y Viney (1988) resaltan la dificultad de obtener estimaciones razonables sobre las proporciones relativas de los distintos componentes del complejo de superficie. En consecuencia, a la hora de estimar la humedad en un determinado lugar es suficiente simplificar y agrupar los componentes del complejo únicamente por su tamaño. Slijepcevic y Anderson (2006) estudian las tendencias horarias de variación de la humedad de la hojarasca y otros combustibles secos generados en masas de *Eucalyptus* sp y la aplicabilidad de diversos modelos (ver tabla 1). Destacan las buenas estimaciones del método de Catchpole *et al.* (2001) así como del modelo de intercambio de vapor de Marsden-Smedley y Catchpole (2001) nombrado en este trabajo como Equation 1. En dicho estudio, ambos modelos

resultaron los más precisos (RMSE de 2,4 y 3,0 respectivamente, errores ligeramente superiores a los obtenidos en este trabajo para los mismos modelos). Los autores observaron que la versión horaria del FFMC no se adapta a los cambios de humedad experimentados por los combustibles de eucalipto a lo largo del día, sobrestimando continuamente la humedad de la hojarasca. Lo mismo se ha visto en nuestra experiencia donde incluso en las situaciones de sombra la sobrestimación es de gran magnitud. Marsden-Smedley y Catchpole (2001) indican que los modelos reproducen mejor las humedades observadas si al aplicarlos se incluye el desfase observado entre la humedad y el tiempo atmosférico. Esto se puede efectuar fácilmente sin más que utilizar los parámetros medidos previamente a la observación de la humedad. Es el caso del modelo de Ruiz *et al.* (2009) que tiene en cuenta el desfase entre la humedad y el tiempo atmosférico al utilizar como variable de entrada la humedad relativa medida dos horas previas al momento de estimación de la humedad.

A modo de conclusiones finales resaltar que la condensación nocturna de humedad es un aliado fundamental para el control del fuego durante la noche y las primeras horas de la mañana pero su efecto desaparece rápidamente en días soleados y localizaciones expuestas, pudiendo echar a perder el trabajo realizado en la extinción. La metodología de la ecuación diferencial de Catchpole *et al.* (2001) y aplicada por Slijepcevic y Anderson (2006) es capaz de reproducir la variación de la humedad de la hojarasca tanto en condiciones de sol como de sombra. Su base física, tanto en el planteamiento de partida como en la ecuación de equilibrio asociada, así como la particularización de dicha ecuación para la hojarasca de eucalipto pueden ser los responsables del éxito del modelo. En el otro extremo modelos empíricos extraordinariamente sencillos como FFDM (McArthur, 1967) en hojarasca expuesta al sol y Ruiz *et al.* (2009) o AERIAL (Pook, 1993) han resultado adecuados para situaciones de sombra y combustibles suspendidos. La repetición de la experiencia así como la obtención de datos de campo sería conveniente para disponer de información que abarque un rango de temperaturas y humedades relativas más amplio.

Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por FIRE PARADOX (proyecto integrado europeo de manejo del fuego del VI Programa Marco de Investigación de la Comisión Euro-

pea-018505) así como por el Programa de Consolidación y Estructuración de Unidades de Investigación competitivas (PGIDT-EDU-2006) de la Xunta de Galicia.

Agradecemos la valiosa ayuda proporcionada por Alen Slijepcevic en la aplicación de alguno de los modelos.

Referencias bibliográficas

- ALBINI F.A., 1985. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Sci. Technol.* Vol. 42, 229-258.
- ALBINI F.A., REINHARDT E.D., 1995. Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels. *Int. J. Wildland Fire.* Vol. 5(2), 81-91.
- ANDERSON H.E., 1990. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. *Can. J. For. Res.* Vol. 20, 315-325.
- ANDERSON H.E., SCHUETTE R.D., MUTCH R.W., 1978. Timelag and equilibrium moisture content of ponderosa pine needles. USDA Forest Service. Intermountain Research Station Res. Pap. INT-202, 28pp.
- ANDREWS P.L., 1986. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part 1. USDA Forest Service. Intermountain Research Station Gen. Tech. Rep. INT-194, 130 pp.
- BLACKMARR W.H., 1972. Moisture content influences ignitability of slash pine litter. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station Res. Note SE-173, 7 pp.
- BRADSHAW L.S., DEEMING J.E., BURGAN R.E., COHEN J.D., 1983. The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Gen. Tech. Rep. INT-169, 44 pp.
- BURGAN R.E., 1987. A comparison of procedures to estimate fine dead fuel moisture for fire behaviour predictions. *South African For. J.* Vol. 142, 34-40.
- BURGAN R.E., 1988. Revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station Res. Pap. SE-273, 39 pp.
- BYRAM G.M., 1940. Sun and wind and fuel moisture. *J. For.* Vol. 38, 639-640.
- BYRAM G.M., JEMISON G.M., 1943. Solar radiation and fuel moisture. *J. Agric. Res.* Vol. 67(4), 149-176.
- CANADIAN FORESTRY SERVICE, 1987. Tables for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Environment Canada. Canadian Forestry Service. For. Tech. Rep. 25, 48pp.
- CATCHPOLE E.A., CATCHPOLE W.R., VINEY N.R., McCAW W.L., MARSDEN-SMEDLEY J.B., 2001. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *Int. J. Wildland Fire.* Vol. 10, 215-222.
- CHANDLER C., CHENEY P., THOMAS P., TRABAUD L., WILLIAMS D., 1991. Fire in forestry. Volume I: Forest fire behavior and effects. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 431 pp.
- CHATTO K., TOLHURST K., 1997. The development and testing of the Wiltronics T-H Fine Fuel Moisture Meter. Department Natural Resources and Environment, Victoria. Fire Management Branch. Research Report No.46.
- CHENEY N.P., 1981. Fire behaviour. En: Fire and the Australian Biota, Australian Academy of Science (Gill A.M., Groves R.H. y Noble I.R., Eds). Capítulo 7.
- CHENEY N.P., GOULD J.S., CATCHPOLE W.R., 1998. Prediction of fire spread in grassland. *Int. J. Wildland Fire.* Vol. 8(1), 1-13.
- COHEN J.D., DEEMING J.E., 1985. The National Fire-Danger Rating System: basic equations. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station Gen. Tech. Rep. PSW-82, 16 pp.
- de GROOT W.J., WANG W., WANG Y., 2005. Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *Int. J. Wildland Fire.* Vol. 14, 161-168.
- DEXTER B.D., WILLIAMS D.F., 1976. Direct field estimation of fine fuel moisture content. *Aust. For.* Vol. 39(2), 140-144.
- DIMITRAKOPOULOS A., PAPAIOANNOU K.K., 2001. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire technol.* Vol. 37, 143-150.
- FOSBERG M.A., 1975. Heat and water vapour flux in conifer forest litter and duff: a theoretical model. USDA Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Research Paper RM-152.
- FOSBERG M.A., DEEMING J.E., 1971. Derivation of the 1- and 10- hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating. USDA Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station Res. Note RM-207, 8p.
- GISBORNE H.T., 1928. Measuring forest-fire danger in northern Idaho. USDA Misc. Pub. 29.
- HARTLEY J., MARCHANT J., 1995. Methods of determining the moisture content of wood. State Forests of New South Wales. Research Division. Tech.Pap. No. 41, 54 pp.
- HATTON T.J., VINEY N.R., 1988. Modelling fine, dead, surface fuel moisture. En: Cheney N.P. y Gill A.M (Eds). Conference on Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems. CSIRO, Canberra, Australia, 11-12 Julio. pp.119-125.
- HATTON T.J., VINEY N.R., CATCHPOLE E.A., de MESTRE N.J., 1988. The influence of soil moisture on *Eucalyptus* leaf litter moisture. *For. Sci.* Vol. 34(2), 292-301.

- HAYES G.L., 1941. Influence of altitude and aspect on daily variations in factors of forest-fire danger. USDA Circ. 591.
- HAYES G.L., 1944. Where and when to measure forest-fire danger. J. For. Vol. 42, 744-751.
- JEMISON G.M., 1935. Influence of weather factors on moisture content of light fuels in forests of the northern Rocky Mountains. J. Agric. Res. Vol. 51, 385-406.
- KING A.R., LINTON M., 1963. Report on moisture variation in forest fuels: equilibrium moisture content. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. División of Physical Chemistry.
- KUNKEL K.E., 2001. Surface energy budget and fuel moisture. En: Forest fires behavior and ecological effects (E.A. Johnson y K. Miyanishi Eds.). Academic Press, San Diego, USA, pp. 303-349.
- KWIATKOWSKI M., UBYSZ B., 2006. Mathematical modelling of variations in litter humidity. En: Viegas D.X. (ed). V International Conference on Forest Fire Research, Figueira da Foz, Portugal, 27-30 Noviembre.
- LAWSON B.D., ARMITAGE O.B., HOSKINS W.D., 1996. Diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code: tables and computer source code. Canada-British Columbia Partnership Agreement on Forest Resource Development: FRDA II.
- MARSDEN-SMEDLEY J.B., CATCHPOLE W., 2001. Fire modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. III Dead fuel moisture. Int. J. Wildland Fire. Vol. 10, 241-253.
- McARTHUR A.G., 1962. Control Burning in Eucalypt Forests. Commonwealth of Australia. Department of National Development. Forestry and Timber Bureau. Leaflet No. 80.
- McARTHUR A.G., 1966. Weather and grassland fire behavior. Commonwealth of Australia. Department of National Development. Forestry and Timber Bureau. Leaflet No. 100.
- McARTHUR A.G., 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. Commonwealth of Australia. Department of National Development. Forestry and Timber Bureau. Leaflet No. 107.
- MATTHEWS S., 2006. A process-based model of fine fuel moisture. Int. J. Wildland Fire. Vol. 15 (2), 155-168.
- MIMAM, 2008. Estadísticas de Incendios Forestales [en línea]. Disponible en http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios [Consulta: 1 Noviembre 2008]
- NELSON R.M., 1984. A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. Can. J. For. Res. Vol.14, 597-600.
- NELSON R.M., 1991. A model of diurnal moisture change in dead forest fuels. 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, Missoula, Montana, 16-19 abril, pp. 109-116.
- NELSON R.M., 2001. Water relations of forest fuels. En: Forest fires behavior and ecological effects (E.A. Johnson y K. Miyanishi Eds.). Academic Press, San Diego, USA, pp. 79-149.
- NORUM R.A., MILLER M., 1984. Measuring fuel moisture content in Alaska: standard methods and procedures. USDA Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station Gen. Tech. Rep. PNW-171.
- PECH G., 1989. A model to predict the moisture content of reindeer lichen. For. Sci. Vol. 35, 1014-1028.
- POOK E.W., 1993. Empirical models evaluated for prediction of fine fuel moisture in Australian *Pinus radiata* plantations. New Zeal. J. Forest. Sci. Vol. 23(3), 278-297.
- POOK E.W., GILL A.M., 1993. Variation of live and dead fine fuel moisture in *Pinus radiata* plantations of the Australian Capital Territory. Int. J. Wildland Fire. Vol. 3(3), 155-168.
- PYNE S.J., ANDREWS P.L., LAVEN, R.D., 1996. Introduction to wildland fire. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 769 pp.
- ROTHERMEL R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper INT-115. 40 pp.
- ROTHERMEL R.C., 1983. How to predict the spread rate and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Gen. Tech. Rep. INT-143.
- ROTHERMEL R.C., WILSON R.A., MORRIS G.A., SACKETT S.S., 1986. Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE Fire Prediction System. USDA Forest Service. Intermountain Research Station Res. Pap. INT-359. 61 pp.
- RUIZ A.D., 2005. La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Madrid.
- RUIZ A.D., VEGA J.A., 2006. Moisture content of dead fuels in *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* stands; intrinsic factors of variation. En: Viegas D.X. (ed). V International Conference on Forest Fire Research, Figueira da Foz, Portugal, 27-30 Noviembre.
- RUIZ A.D., VEGA J.A., 2007. Modelos de predicción de la humedad de los combustibles muertos: Fundamentos y aplicación. MEC-INIA: Monografías INIA: Serie Forestal No. 15. Madrid, España, 207 pp.
- RUIZ A.D., VEGA J.A., ALVAREZ J.A., 2009. Construction of empirical models for predicting *Pinus* sp. dead fine fuel moisture in NW Spain I: response to changes in temperature and relative humidity. Int. J. Wildland Fire. Vol. 18(1), 71-83.

- SAGLAM B., BILGILI E., KUÇUK O., DINCDURMAZ B., 2006. Determination of surface fuels moisture contents based on weather conditions. En: Viegas D.X. (ed). V International Conference on Forest Fire Research, Figueira dea Foz, Portugal, 27-30 Noviembre.
- SAS INSTITUTE INC., 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SIMARD A.J., 1968. The moisture content of forest fuels-I. A review of the basic concepts. Canadian Department of Forest and Rural Development. Forest Fire Research Institute. Information Report FF-X-14.
- SIMARD A.J., MAIN W.A., 1982. Comparing methods of predicting jack pine slash moisture. Can. J. For. Res. Vol. 12, 793-802.
- SNEEUWJAGT R.J., PEET G.B., 1998. Forest Fire Behaviour Tables for Western Australia. Western Australian Department of Conservation and Land Management, 59 pp.
- SLIJEPCEVIC A., ANDERSON W., 2006. Hourly variation in fine fuel moisture in eucalypt forests in Tasmania. En: Viegas D.X. (ed). V International Conference on Forest Fire Research, Figueira dea Foz, Portugal, 27-30 Noviembre.
- TOLHURST K.G., CHENEY N.P., 1999. Synopsis of the knowledge used in prescribed burning in Victoria. Department of Natural Resources and Environment. Melbourne, Australia, 97 pp.
- TRABAUD L., 1976. Inflamabilité et combustibilité des principales espèces des garrigues de la région méditerranéenne. Oecologia Plantarum. Vol. 11(2), 117-136.
- VALETTE J.C., 1992. Inflamabilities of Mediterranean species. En: Forest Fire Risk and Management: European School of Climatology and Natural Hazard Course. Halkidiki, Greece, 27 May-4 June 1992. Eds. P. Balabanis, G. Eftichidis, R. Fantechi. pp. 51-64.
- VAN WAGNER C.E., 1969. Drying rates of some fine forest fuels. Fire Manage. Notes. Vol. 30 (4), 5-12.
- VAN WAGNER C.E., 1972. A table of diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code. Canadian Forestry Service. Petawawa Forest Experiment Station. Information Report PS-X-38. 8pp.
- VAN WAGNER C.E., 1977. A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Canadian Forestry Service. Petawawa Forest Experiment Station. Information Report PS-X-69. 15 pp.
- VAN WAGNER C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. Petawawa National Forestry Institute. Forestry Technical Report 35. 37 pp.
- VAN WAGNER C.E., PICKETT T.L., 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. Technical Report 33. 18 pp.
- VEGA J.A., CASAL M., 1986. Contraste de estimadores de humedad del combustible forestal fino muerto en montes arbolados de Galicia (NW de España). Seminario sobre métodos y equipos para la prevención de incendios forestales, Valencia, 30 Septiembre-4 Octubre. pp 94-97.
- VELEZ R. (ed), 1999. Protection contre les incendies de forêt: principes et méthodes d'action. CIHEAM: Série B: Etudes et Recherches, No 26, Options Méditerranéennes. Zaragoza, 118 pp.
- VINEY N.R., 1991. A review of fine fuel moisture modelling. Int. J. Wildland Fire. Vol. 1(4), 215-234.
- VINEY N.R., CATCHPOLE E.A., 1991. Estimating fuel moisture response times from field observations. Int. J. Wildland Fire. Vol. 1(4): 211-214.
- VINEY N.R., HATTON T.J., 1989. Assessment of existing fine fuel moisture models applied to *Eucalyptus* litter. Aust. For. Vol. 52(2), 82-93.
- VINEY N.R., HATTON T.J., 1990. Modelling the effect of condensation on the moisture content of forest litter. Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 51, 51-62.
- WILSON R.A., 1985. Observations of extinction and marginal burning states in free burning porous fuel beds. Combust. Sci. Technol. Vol. 44, 179-193.
- XUNTA DE GALICIA, 1992. A meteoroloxía e os incendios forestais. Consellería de Agricultura, Gandería e Montes, 131 pp.
- XUNTA DE GALICIA, 2001. O monte galego en cifras. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural, Consellería de Medio Ambiente, 232 pp.
- XUNTA DE GALICIA, 2008. CINAM-MeteoGalicia [en línea]. Disponible en <http://www.meteogalicia.es/> [Consulta: 15 Septiembre 2008]