



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER
EL GRADO ACADÉMICO DE
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE

“VARIABILIDAD HORARIA DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLES VEGETALES Y
SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES DEL CLIMA, EN LA RESERVA NATURAL
PARQUE LURO, PROVINCIA DE LA PAMPA”.

Paula Andrea CALVO

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2011

Prefacio

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la Cátedra de Manejo de Fauna Silvestre, dependiente del Departamento de Recursos Naturales, durante el período comprendido entre diciembre de 2010 y diciembre de 2011, bajo la dirección del MSc. Diego Villarreal.

Agradecimientos

A mi director Diego Villarreal, por sus consejos, su paciencia y la ayuda brindada, tanto en la elaboración del proyecto como en el trabajo de campo, y por sus acertadas correcciones en la redacción de esta tesina.

A M. Eugenia Estanga Mollica por sus valiosos aportes y sugerencias.

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por el financiamiento de este trabajo.

A la Subsecretaría de Ecología por otorgarme el permiso para trabajar en la Reserva Parque Luro.

A la Dirección General de Defensa Civil por facilitarme la micro estación meteorológica para el registro de las variables climáticas.

A Violeta Poggio Herrero, por su colaboración en las tareas de campo, ¡gracias por el aguante compañera!

A María Paula Dieser, por su buena onda y predisposición cada vez que requerí su ayuda en los análisis estadísticos. También agradezco a Marina Cock, que me auxilió en alguna que otra consulta.

A mis compañeras y amigas de la carrera: Violeta, Marina, Sonia y Marita A.

A mis amigas de la vida: Mary, Marita C., Paola y Silvia.

A mi familia: Hugo, Sandra, Fer y Nico. Gracias por su comprensión, su constante apoyo, por alentarme y acompañarme en los momentos difíciles, y darme fuerzas para seguir adelante... ¡GRACIAS!

Y otro agradecimiento especial a mis abuelas queridas Coca y Luisa, por su cariño, por cuidarme y acompañarme siempre.

16 de diciembre de 2011

Paula Andrea Calvo

Departamento de Recursos Naturales

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVERSIDAD DE LA PAMPA

Resumen

El comportamiento del fuego en un incendio depende de la interacción de factores atmosféricos, topográficos y relativos a los combustibles. Dentro de éstos últimos, se incluye el contenido de humedad. El interés en estudiar esta variable se debe a que es una de las propiedades de los combustibles que mayor influencia tiene en el comportamiento del fuego, puesto que determina su inicio y regula su propagación.

En la provincia de La Pampa se suelen producir incendios de gran extensión e intensidad y que provocan graves perjuicios. Ello hace necesario contar con información adecuada para la prevención y el control de incendios.

El objetivo de este trabajo consistió en determinar la relación entre el contenido de humedad del combustible vegetal fino y grueso, tanto vivo como muerto, y la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Se escogió un área de bosque abierto de la Reserva Provincial Parque Luro, en la cual se midieron los factores climáticos mencionados al tiempo que se colectaron, cada dos horas, muestras de vegetación herbácea (gramíneas), broza y ramas finas de caldén (*Prosopis caldenia*), para observar la variabilidad de su humedad, en ausencia de precipitación, durante un período de 24 horas. El contenido de humedad de las muestras se obtuvo mediante el método de secado en estufa. La relación entre humedad de los combustibles y humedad relativa, temperatura y velocidad del viento fue establecida con análisis de regresión. La selección del modelo de ajuste más adecuado para cada tipo de combustible se llevó a cabo a través del procedimiento Backward de eliminación de variables. Los resultados indican que es posible determinar el contenido de humedad del combustible fino a partir del registro de parámetros meteorológicos, tales como humedad relativa y temperatura. Como estos parámetros pueden ser medidos de forma automática y remota, una aplicación de este estudio será la de alimentar a los sistemas de alerta de incendios y modelos de fuego, con información sobre los contenidos de humedad del combustible en tiempo real y facilitar la prevención o el control de incendios.

Abstract

Fire behavior depends on the interaction of atmospheric and topographic factors, and those related to the fuels, like moisture content. The interest in studying this variable is due to the fact that it has the most influence on fire behavior since it determines its beginning and regulates its propagation.

In La Pampa province, fires might burn hundreds of thousands of hectares of natural forest, causing serious damage. This make necessary to improve the methods of collecting information required for prevention and control of forest fires.

The aim of this paper was to determine the relationship among fine and thick, live and dead fuel moisture content and meteorological variables, such as temperature, relative humidity and wind speed. These parameters were recorded in an area of open forest of Parque Luro Natural Reserve and, every two hours, samples of herbaceous vegetation (grass), litter and thin branches of caldén (*Prosopis caldenia*) were collected to observe the variability of their moisture in dry conditions, over a 24-hour period. The moisture content of the samples was obtained through direct drying oven method. Regression analysis was conducted to examine the relationship among moisture content and temperature, relative humidity and wind speed. The most suitable model of adjustment for each type of fuel was selected by applying the Backward Elimination procedure. The results show that it is possible to determine fine moisture content from records of weather parameters, like relative humidity and temperature. As these measurements can be automatically and remotely obtained, an application of this study will be to provide wildland fire warning systems and fire models with real time information about fuel moisture content and, therefore, to facilitate prevention and control of woodland and grassland fires.

Índice

Introducción.....	1
Materiales y Métodos	
Área de estudio.....	4
Trabajo de campo.....	5
Trabajo de laboratorio.....	6
Análisis estadístico.....	6
Resultados.....	7
Discusión.....	13
Conclusiones.....	16
Referencias bibliográficas.....	18

Introducción

Los incendios de bosques, montes y pastizales son eventos de gran trascendencia debido a la elevada frecuencia e intensidad que han cobrado en los últimos años. Si bien ciertos ecosistemas requieren del fuego para poder evolucionar (Pausas, 2010), otros son muy sensibles a sus efectos y pueden ser gravemente perjudicados. Por ejemplo, un informe de la FAO (2010) indica que durante el período 2003-2007 fueron afectadas por fuego un promedio anual de aproximadamente 60 millones de ha de tierra (bosques, otras tierras boscosas y otras tierras). El informe se basa en lo ocurrido en 78 países, que reúnen el 63% del área total de bosques del mundo. Además se estimó que en 87 países, el 94% de la superficie total de bosque afectada por fuego se debió a quemas no planificadas, mientras que sólo el 6% restante correspondió a quemas prescritas (FAO, 2010).

El fuego es un fenómeno físico-químico que libera luz y calor, como resultado de la combustión de un cuerpo. Para que el proceso de combustión se inicie son indispensables tres elementos, -combustible, oxígeno y calor-, que deben hallarse en proporciones adecuadas para generar una reacción en cadena. Esta reacción comienza alrededor de los 500-600 °C, instante en que la combustión prosigue por sí misma aunque se retire la fuente de calor. Si se eliminan uno o más de esos componentes (combustible, oxígeno, calor) o no se encuentran dentro de los valores necesarios, la combustión se detiene y el fuego se extingue (Plan Nacional de Manejo del Fuego, 2001).

Resulta importante conocer acerca del comportamiento del fuego, que es definido por Trollope (1991), citado por Kunst *et al.* (2003), como la forma en que se libera la energía durante la combustión. El comportamiento depende de la acción combinada de factores atmosféricos -principalmente temperatura, viento y humedad relativa-; topográficos -altitud, exposición, relieve y pendiente- y relativos a los combustibles -tamaño, forma, carga, distribución espacial y contenido de humedad, entre otros-. Es fundamental comprender estos factores, dado que determinarán la peligrosidad del incendio y el grado de dificultad para la prevención o el control. Con ese propósito, se han desarrollado sistemas de evaluación de peligro de incendio así como modelos de predicción del comportamiento del fuego. Estas herramientas a menudo funcionan en forma conjunta, incorporándose modelos dentro de sistemas.

Los sistemas de evaluación de peligro de incendio están compuestos por índices que se calculan mediante ecuaciones, y de acuerdo a características climáticas, topográficas y del combustible, entre otras variables, evalúan la probabilidad de que un incendio se inicie (Dentoni & Muñoz, 2000). Uno de los más desarrollados es el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (Natural Resources Canada, 2003), que ha sido implementado y adoptado en varios países, incluido

Argentina. Los modelos de predicción del comportamiento del fuego, también llamados modelos de fuego, son relaciones matemáticas que describen las características que tendrá un incendio en caso de producirse (Arroyo *et al.*, 2008). A partir de propiedades físicas, químicas y térmicas del combustible, características del terreno y condiciones meteorológicas se obtienen valores estimados de velocidad de propagación, calor desprendido en el frente, longitud y altura de la llama, entre otros. Se ha producido gran cantidad de estos modelos, sin embargo muchos de ellos no son tan exactos como se desearía debido al inconveniente de incluir los numerosos factores que interactúan entre sí e influyen en la forma de avance del fuego (Denham, 2007).

Se distinguen modelos físicos, empíricos y semiempíricos o semifísicos. Los físicos se basan en leyes que rigen la mecánica de fluidos y la transferencia de calor. Dada la complejidad y la falta de conocimiento sobre aspectos o procesos vinculados al fuego, este tipo de modelos aún se encuentra en desarrollo (Morandini, 2001; citado en Zárate López, 2004). Los empíricos se obtienen a partir de datos experimentales y no incluyen procesos físicos, por ello se aconseja utilizarlos cuidadosamente, ya que su uso se limita a las situaciones específicas en que fueron experimentados (Zárate López, 2004). Los últimos se caracterizan por ser una mezcla de los dos primeros. El modelo semifísico de Rothermel (1972) es uno de los más utilizados; la mayoría de los simuladores de comportamiento del fuego (Behave, Farsite, Behave Plus, Nexus) emplean en sus cálculos este modelo (Zárate López, 2004; Bianchini, 2006).

Un componente primario de los modelos de fuego y sistemas de evaluación de peligro de incendio es el tipo y estructura de la vegetación; para describir tales características se han desarrollado gran variedad de modelos de combustibles. Éstos intentan representar los grupos de materiales vegetales que predominan en un ambiente dado y que determinarán la forma de propagación del fuego en caso de incendio. Por ejemplo, Scott & Burgan, (2005) crearon trece modelos de combustible que especifican diversas características: carga, altura, relación superficie volumen, contenido de humedad, entre otras. Estos modelos se emplean como entradas en los modelos de comportamiento y, de acuerdo a condiciones topográficas y atmosféricas, determinan básicamente la intensidad y la velocidad de dispersión del fuego (Denham, 2007).

Otro componente fundamental de los modelos de fuego e índices, es la humedad del combustible (Kunst & Bravo, 2003). Es importante conocerla y establecerla con precisión debido a que condiciona, junto a otras características físicas y químicas, la inflamabilidad y combustibilidad de los vegetales. Además, es una de las propiedades de mayor influencia en el comportamiento del fuego, puesto que regula el inicio y posterior expansión del mismo (Ruiz & Vega, 2007). Para medirla existen diversos métodos: a) los directos, son más exactos pero se requiere de aparatos de laboratorio y no se pueden

aplicar en el campo. Por ejemplo, la medición por secado en estufa y las técnicas químicas de valoración; b) los indirectos, generalmente son menos precisos pero pueden ser aplicados en el campo. Tal es el caso de los modelos de estimación, las técnicas eléctricas y mecánicas y el método de combustibles semejantes. Los modelos de estimación son los más utilizados en la actualidad dado que son rápidos y sencillos de calcular. Aún así, su aplicación se dificulta por la gran cantidad de factores que entran en juego y que deben considerarse al momento de realizar su cálculo. Por esta razón no son tan precisos como los métodos directos (Ruiz & Vega, 2007).

En la provincia de La Pampa, se producen cada año una variedad de incendios provocados por diferentes causas. El factor climático ocasiona el 47% de los incendios, el antrópico el 36%, mientras que el 17% es de origen desconocido (Dirección General de Defensa Civil, Provincia de La Pampa, 2009). En algunos años se queman cientos de miles de hectáreas de monte natural, provocando graves perjuicios. En este sentido se destacan los eventos de incendios ocurridos durante el verano de 2000-2001, que afectaron un total de 3.300.000 ha, equivalentes a un 23% de la superficie total de la provincia y a un 31% del área total ocupada por el monte y el bosque de caldén (*Prosopis caldenia*) (Lorda *et al.*, 2001). Esa cobertura de incendios ha sido la de mayor magnitud registrada en nuestra provincia en una temporada de verano.

La Reserva Natural Parque Luro es un área protegida de La Pampa que no escapa a esta problemática. Este área alberga un recurso de gran valor, no sólo ecológico sino también económico y social, como es el bosque de caldén o caldenal. Este ecosistema está compuesto por una diversidad de ambientes susceptibles a eventos de fuegos; ello señala la importancia de producir información de base para mejorar los métodos de determinación de la humedad del combustible.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un modelo de estimación (método indirecto) de humedad del combustible para un área del bosque de caldén de La Pampa.

Objetivo específico

- Establecer la relación entre el contenido de humedad del combustible fino y grueso, tanto vivo como muerto, y la temperatura, humedad relativa y viento.

Para alcanzar los objetivos planteados se determinó a lo largo del día, en un área de caldenal de la Reserva Parque Luro, la variabilidad de la humedad de los

combustibles, en ausencia de precipitación, y se midieron los factores climáticos mencionados. Si existiera una buena asociación entre estos factores (o alguno de ellos) y la humedad del combustible, se podría predecir el contenido de humedad de acuerdo al valor de las variables climáticas. Como estas variables pueden ser medidas de forma automática y remota, una aplicación de mi estudio será la de alimentar a los sistemas de alerta de incendios y modelos de fuego, con información sobre los contenidos de humedad del combustible en tiempo real y facilitar la prevención o el control de incendios.

Materiales y métodos

Área de estudio

La Reserva Natural Parque Luro ($36^{\circ} 57' S$, $64^{\circ} 17' O$) se encuentra a 35 km al sur de la ciudad de Santa Rosa, en el departamento Toay, La Pampa, Argentina (Figura 1). Es un área protegida con una superficie de 7600 ha, de las cuales 1600 están destinadas a la actividad turística y recreativa, y las 6000 restantes tienen fines de investigación y de conservación (<http://www.parqueluro.gov.ar>).



Figura 1: Ubicación de la Reserva Natural Parque Luro, en la provincia de La Pampa.

La reserva presenta tres ambientes naturales: el salitral, el pastizal de médano y, de mayor extensión, el caldenal, bosque que forma parte de la provincia fitogeográfica del Espinal, más específicamente del distrito del Caldén. En La Pampa, el caldenal ocupa generalmente zonas bajas o depresiones con suelos francos arenosos, finos y profundos (Cano, 1980). Además de caldén, lo componen otras especies arbóreas tales como *Prosopis flexuosa*, *Geoffroea decorticans*, *Schinus fasciculatus* y *Jodina rhombifolia*. En el estrato arbustivo son frecuentes *Condalia microphylla*, *Lycium chilense*, *Prosopis flexuosa*

var. depressa, *Ephedra triandra* y *Senna aphylla*, entre otras. Algunas de las gramíneas presentes son *Poa ligularis*, *Nasella tenuis*, *Nasella tenuissima* y *Jarava ichu*.

En la actualidad, el bosque presenta una superficie y una composición estructural y específica muy distinta a la original, como consecuencia de actividades humanas principalmente la ganadería, los desmontes, la explotación forestal y las quemas intencionales (Lell, 2004). Uno de los cambios más notables es la arbustización o “fachinalización” y la invasión de leñosas en pastizales naturales, debido probablemente a la introducción del ganado vacuno, ayudado también por la ocurrencia de fuegos (Dussart *et al.*, 1998; Medina *et al.*, 2000; Lerner, 2004). En Parque Luro, el último incendio se registró hace aproximadamente quince años (Dirección Gral. de Defensa Civil, 2009), lo cual sugiere que la acumulación de material combustible es alta y genera riesgos de fuegos de difícil control. Ello motivó su selección como área de estudio.

Trabajo de campo

Las tareas de campo se desarrollaron en el mes de marzo de 2010, hacia fines del verano, época de alto riesgo de incendio. Se eligió un área de caldenal abierto, ubicado en el sector noroeste de la reserva, perteneciente al ambiente de pastizal samófilo. Esta zona se caracteriza por suelos medanosos, con llanos o pendientes suaves y gramíneas intermedias con árboles aislados. El área seleccionada presenta un estrato herbáceo dominado por *J. ichu* y *N. tenuissima*, con ejemplares dispersos de *P. Caldenia* en el estrato arbóreo.

De manera aleatoria se establecieron 12 sitios, 5 a muestrear de noche y 7 de día, que se ubicaron a más de 10 m de la picada y separados entre sí por más de 10 m. Los sitios y muestras a coleccionar en horas nocturnas fueron marcados previamente con banderines durante las horas de luz solar para hallarlos fácilmente. El muestreo se realizó cada dos horas durante un período continuo de 24 horas. Se coleccionaron en cada sitio y al azar, en bolsas de papel bien identificadas, muestras de gramíneas, obtenidas de distintos individuos, realizando el corte al ras del suelo, y muestras de broza. Se consideró broza a los restos de material vegetal presentes en la superficie del suelo. Estos dos tipos de combustible (gramíneas y broza) se coleccionaron bajo dos tratamientos: 5 muestras expuestas y 5 ubicadas debajo del canopeo de los caldenes. Además se tomaron 5 muestras de caldén, de 5 ramas delgadas cada una, obtenidas de distintos individuos. Todas las muestras se pesaron de inmediato in situ para obtener su peso húmedo, con una balanza electrónica de 0,001 g. de precisión. Al mismo tiempo, se registraron in situ y a una altura de 1,20 m la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento con una micro estación meteorológica Kestrel modelo K4500.

Trabajo de laboratorio

Las muestras se trasladaron al laboratorio y se las secó en una estufa a 60°C hasta peso constante, el que se alcanzó al cabo de 48 horas. A continuación se pesaron todas las muestras para obtener su peso seco. Tanto para calcular el peso húmedo como el peso seco, se restó a los valores obtenidos el peso de la bolsa vacía. Por último, se calculó la humedad de las muestras, a través de la siguiente fórmula (Countryman & Dean, 1979):

$$CH (\%) = \frac{PH - PS}{PS} \times 100;$$

CH = Contenido de humedad (%)
PH = Peso húmedo (g)
PS = Peso seco (g)

Análisis Estadístico

Los datos fueron analizados con el programa Infostat, versión 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011). Para determinar si existieron diferencias en las mediciones del contenido de humedad entre las muestras expuestas y las ubicadas bajo canopeo, se empleó Análisis de la Covarianza (ANCOVA). La relación entre el contenido de humedad de las tres clases de combustibles (gramíneas, broza y caldén) y humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, fue establecida con Análisis de Regresión. La significancia de los modelos fue examinada con Análisis de la Varianza (ANDEVA), mediante la prueba de Fisher, y la bondad de ajuste de los modelos, a través del coeficiente de determinación R^2 . Además, en todos los casos se evaluó la normalidad y homocedasticidad de los datos para satisfacer los supuestos de estos análisis. Las diferencias obtenidas fueron consideradas estadísticamente significativas cuando los valores de probabilidad fueron menores al 5%. Con el propósito de seleccionar cuántas y cuáles de las variables independientes (humedad relativa, temperatura y viento) fueron las más adecuadas para construir los mejores modelos predictivos de la humedad de los combustibles estudiados, se efectuó el procedimiento Backward de eliminación de variables. Se escogió este método debido a que es uno de los más sencillos y rápidos; además permite desde el inicio emplear en el modelo todas las variables disponibles. En este caso particular, al ser pocas las variables independientes utilizadas, disminuye el riesgo de que exista colinealidad (Schlups, 2011).

Resultados

El día de la experiencia transcurrió soleado y con cielo despejado de nubes. La humedad relativa varió entre un 48% y un 100% y, como se esperaba, presentó valores mínimos durante la tarde, entre las 15 y 17 horas, período donde se registraron las temperaturas más elevadas, y valores máximos a primeras horas de la mañana, entre las 5 y 7 horas, donde las temperaturas fueron mínimas (Figura 2). Con respecto a la temperatura, si bien no se observan variaciones muy notables a esa escala de tiempo (Figura 2), osciló entre 15°C y 28°C. En cuanto a la velocidad del viento, no se registraron valores muy altos. El máximo fue de 17 km/h y se alcanzó al comienzo de la experiencia, alrededor de las 13 horas. Luego fue disminuyendo a lo largo del día, incluso mostró valores nulos hacia la noche y la madrugada: en torno a las 21 horas y entre la 1 y 3 horas, respectivamente (Figura 2).

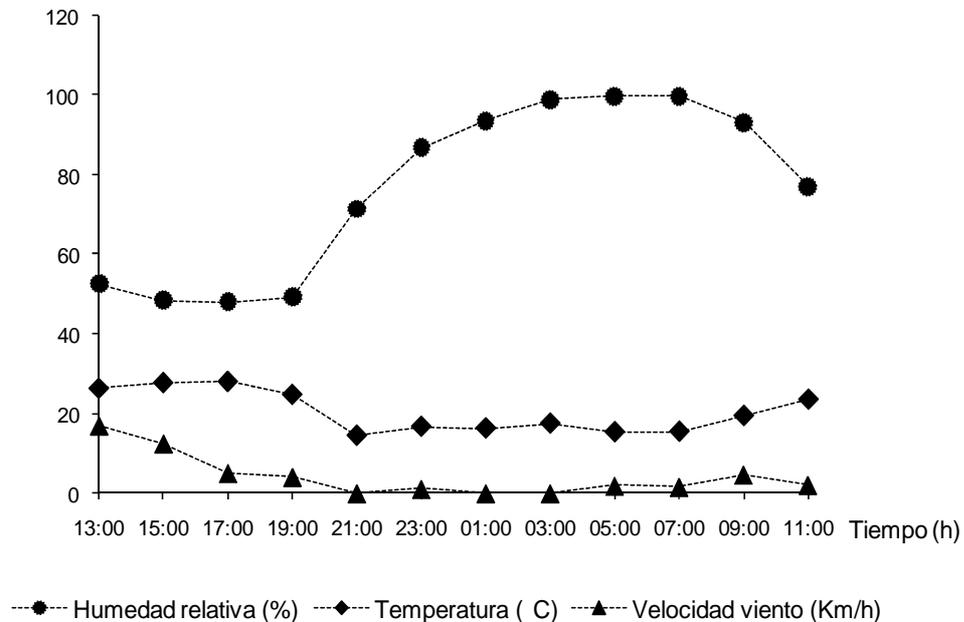


Figura 2: Variación de la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento durante las 24 horas de estudio. Cada punto corresponde al valor de la variable registrado a la hora en punto indicada.

El contenido de humedad de las gramíneas ubicadas bajo el canopeo de los caldenes varió entre un 16 y un 38%, mientras que el de las expuestas, entre un 11 y un 56% (Figura 3 a). Respecto a la broza, la humedad de las situadas bajo canopeo varió entre un 9 y un 23%, en tanto que la de las expuestas, entre un 5 y un 25% (Figura 3 b). En relación al caldén, no exhibió variaciones muy marcadas. Las mismas se situaron entre un 110 y un 200% (Figura 3 c).

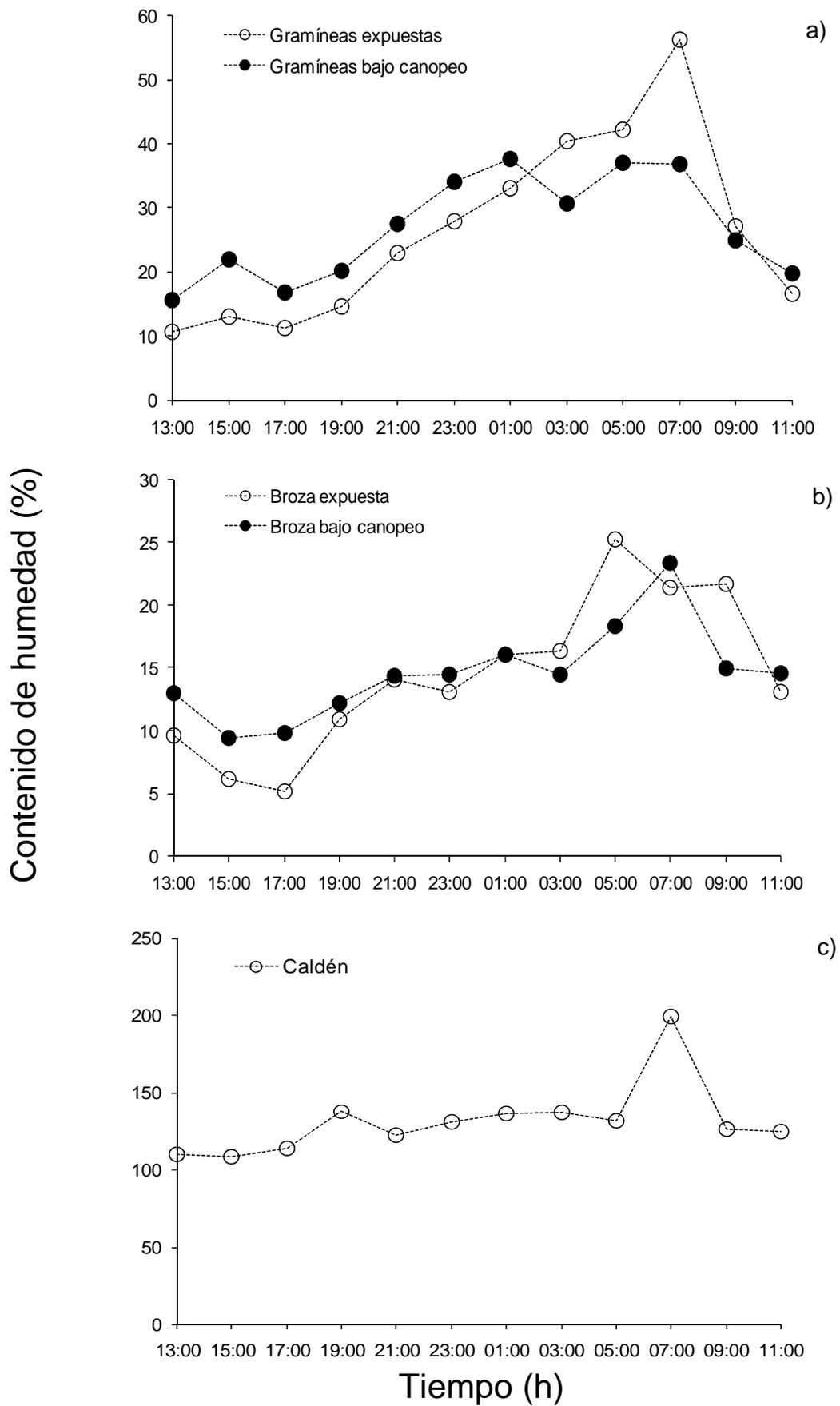


Figura 3. Variación del contenido de humedad de los tres tipos de combustibles colectados durante las 24 horas de estudio. Los círculos (blancos y negros) representan valores promedio de todas las muestras colectadas en los horarios indicados.

Los resultados del ANCOVA indican que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos “expuestas” y “bajo canopeo” ($F_{1, 114} = 0.17$, $p = 0.68$; $F_{1, 114} = 0.11$, $p = 0.74$, respectivamente) (Tabla 1). Por lo tanto, las medidas de contenido de humedad, tanto para gramíneas como para broza, se consideraron de forma conjunta para realizar los análisis posteriores.

Tabla 1: Valores promedio de contenido de humedad de los dos tipos de combustibles (gramíneas y broza) sometidos a los dos tratamientos.

Hora	Gramíneas		Broza	
	Contenido de humedad (%) Al sol	Contenido de humedad (%) A la sombra	Contenido de humedad (%) Al sol	Contenido de humedad (%) A la sombra
13:00	10,67	15,63	9,68	13,00
15:00	13,12	21,93	6,21	9,43
17:00	11,17	16,88	5,19	9,80
19:00	14,58	20,15	10,98	12,25
21:00	23,01	27,55	14,1	14,36
23:00	27,96	34,11	13,17	14,51
01:00	33,15	37,59	16,06	16,09
03:00	40,30	30,71	16,43	14,48
05:00	42,09	36,96	25,32	18,34
07:00	56,25	36,88	21,4	23,40
09:00	27,16	24,87	21,78	15,03
11:00	16,66	19,73	13,0	14,55

En la Figura 4 se observa que las curvas de contenido de humedad de gramíneas (a) y broza (b) siguen las tendencias de variación de la humedad relativa, y ambas variables presentan valores mínimos y máximos aproximadamente en los mismos horarios, es decir entre las 5 y 7 horas, y entre las 15 y 17 horas, respectivamente. Ello denota la relación directa entre estas variables. En relación al caldén no se observa el mismo patrón dado que, por su grosor, no es tan sensible a variaciones diarias de humedad del ambiente (Figura 4 c).

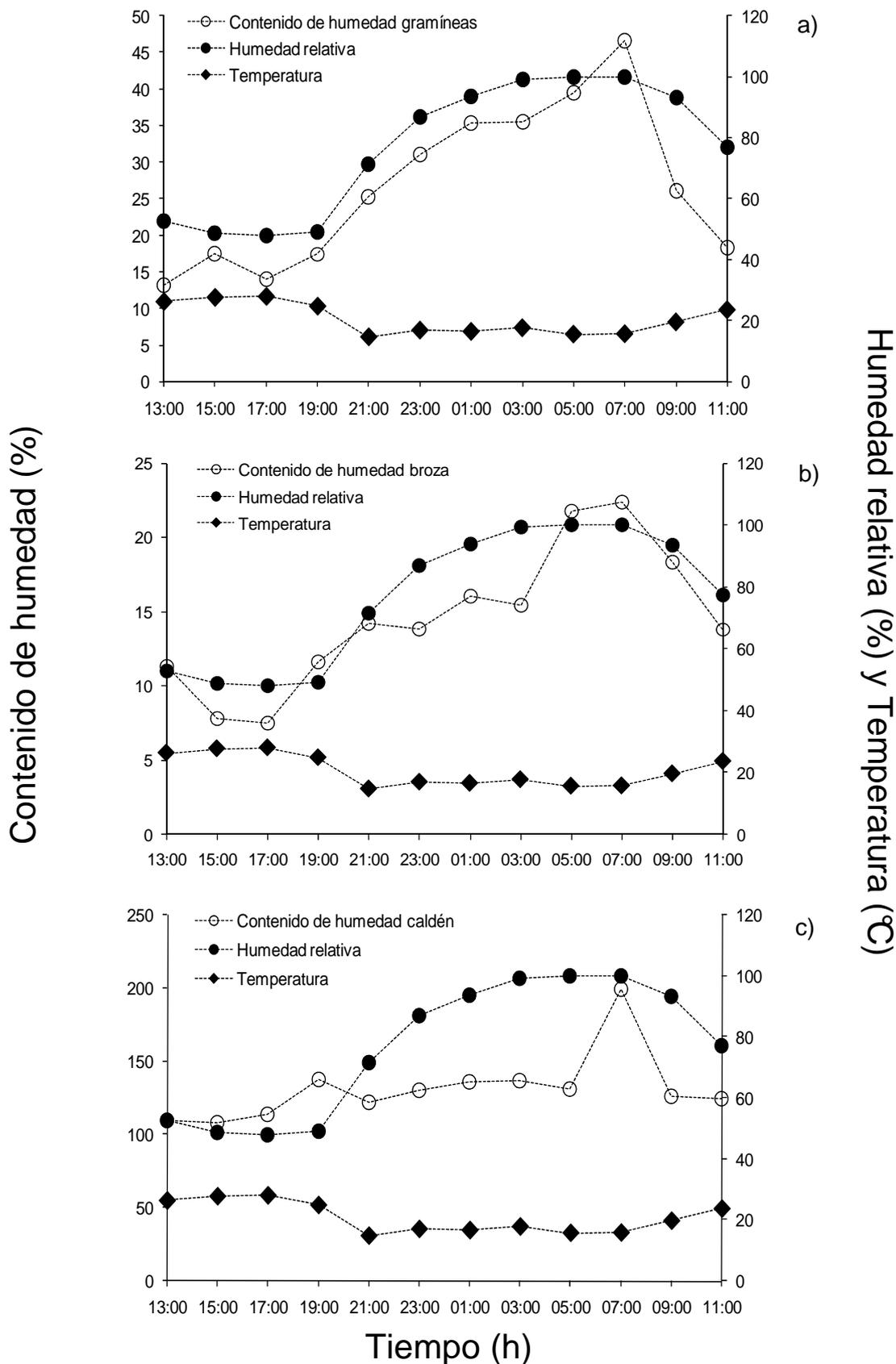


Figura 4: Comparación entre las curvas de humedad de los tres tipos de combustibles y las curvas de humedad relativa y temperatura. Los círculos blancos en las curvas de gramíneas y de broza representan valores promedios de contenido de humedad entre “expuestas” y “bajo canopeo”. Los círculos blancos en la curva de caldén corresponden a valores promedios de todas las muestras colectadas en las horas indicadas.

Al efectuar el procedimiento Backward, utilizando un valor p máximo de 0.05, se obtuvo que, para el grupo de las gramíneas, el método seleccionó la humedad relativa y la temperatura como las variables más adecuadas para estimar la humedad de esta clase de combustible; mientras tanto, para broza y caldén conservó únicamente la humedad relativa. En consecuencia, se adoptó para gramíneas un modelo de regresión múltiple, y para broza y caldén un modelo de regresión simple. Los tres modelos de estimación resultaron altamente significativos (gramíneas: $F_{2, 116} = 84.39$, $p < 0.0001$; broza: $F_{1, 117} = 109.68$, $p < 0.0001$; caldén: $F_{1, 58} = 14.59$, $p = 0.0003$) (Tablas 2, 3 y 4). Sin embargo, los coeficientes de determinación (R^2) no fueron muy elevados. Mientras que los modelos predictivos obtenidos para gramíneas y broza explican, respectivamente, el 59% ($R^2 = 0.59$) y el 48% ($R^2 = 0.48$) de la variación de su contenido de humedad, el modelo obtenido para caldén sólo tiene un 20% ($R^2 = 0.20$) de capacidad explicativa. Así, el correspondiente al conjunto de las gramíneas parece ser el modelo que mejor representa la relación entre las variables estudiadas.

Tabla 2: Resumen del modelo para gramíneas

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Contenido H°	119	0.59	0.59	66.49	836.15	847.26

$$CH_{\text{gramíneas}} = 0,3H - 0,75T + 19,36$$

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10673.20	2	5336.60	84.39	<0.0001
H° relativa	1220.56	1	1220.56	19.30	<0.0001
Temperatura	425.03	1	425.03	6.72	0.0108
Error	7335.29	116	63.24		
Total	18008.49	118			

Tabla 3: Resumen del modelo para broza

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Contenido H°	119	0.48	0.48	17.53	678.55	686.89

$$CH_{\text{broza}} = 0,19H - 0,09$$

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1860.02	1	1860.02	109.68	<0.0001
H° relativa	1860.02	1	1860.02	109.68	<0.0001
Error	1984.12	117	16.96		
Total	3844.15	118			

Tabla 4: Resumen del modelo para caldén

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Contenido H°	60	0.20	0.19	740.12	566.19	572.47

$$CH_{\text{caldén}} = 0,62H + 84,13$$

Cuadro de Análisis de Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10028.29	1	10028.29	14.59	0.0003
H° relativa	10028.29	1	10028.29	14.59	0.0003
Error	39854.56	58	687.15		
Total	49882.85	59			

Al mismo tiempo, para corroborar estos resultados y descartar de ese modo otras combinaciones de las variables, se examinó también qué sucedía al incluirse en los modelos de regresión, por un lado sólo temperatura, variable no menos importante en la determinación del contenido de humedad y cuyos datos, quizás pueden ser más fácilmente adquiridos que los de humedad relativa, y por otro, ambas variables en conjunto. De ello resultó, en el primer caso, para los tres tipos de combustible, un R² menor que el obtenido únicamente con humedad relativa (entre un 9 y un 16 % inferior), mientras que en el segundo caso fue, para broza y gramíneas respectivamente, un 2 y un 3 % superior.; en tanto, para caldén, un 10 % inferior que el alcanzado sólo con humedad relativa (Tabla 5). En relación a gramíneas, cabe señalar que se optó por el modelo que incluye las dos variables (humedad relativa y temperatura), pese a que no se observa una ganancia substancial de R², debido a que mostró un p significativo (T: p = 0.01), no así en el caso de broza (T: p = 0.24) (Tabla 5). De esta manera, queda demostrada la validez de los resultados expuestos anteriormente por el método Backward.

Tabla 5: Comparación entre los valores R² resultantes de incluir en los modelos: sólo temperatura, sólo humedad relativa y ambas variables en conjunto (* aj.= R² ajustado; T= temperatura; H= humedad relativa; V= velocidad del viento).

Tipo de combustible	Variable/s incluida/s en el modelo	R ²	p
Gramíneas	T	0.52	<0.0001
	H	0.57	<0.0001
	T y H	0.59	T: 0.01 H: <0.0001
Broza	T	0.40	<0.0001
	H	0.48	<0.0001
	T y H	0.49	T: 0.24 H: <0.0001
Caldén	T	0.18	0.0007
	H	0.20	0.0003
	T y H	0.18 (aj.*)	T: 0.52 H: 0.17

Discusión

La humedad relativa y la temperatura resultaron buenos predictores del contenido de humedad de la vegetación herbácea. Es importante destacar este aspecto ya que el combustible fino es el principal elemento responsable del inicio y propagación de un fuego (Ruiz & Vega, 2007). Además, especies poco o no consumidas por el ganado, como las gramíneas analizadas en este estudio, permanecen en pie y se convierten luego en material senescente, altamente inflamable y favorecedor del desplazamiento del fuego, al propiciar la continuidad horizontal de la vegetación (Defossé *et al.*, 2003). Del mismo modo, especies no forrajeras como *J. ichu* son más susceptibles al efecto del fuego que otras especies de gramíneas forrajeras (Bóo *et al.*, 1996), lo que puede determinar que los sitios dominados por ese tipo de gramíneas presenten una mayor vulnerabilidad ante un eventual incendio.

Los incrementos de humedad observados en los combustibles ubicados bajo el canopeo de los caldenes en relación a los expuestos fueron, aunque no significativos, en promedio, del 1% para gramíneas y del 2% para broza. Este último resultado es consistente con los de McArthur (1967) y Tolhurst & Cheney (1999), quienes también encontraron diferencias del 2% en la humedad de hojarasca de *Eucalyptus* sp. situada a plena sombra; Ruiz & Vega (2005) observaron diferencias cercanas a un 9% en restos de superficie de *Pinus pinaster*; en tanto Pook & Gill (1993), diferencias de hasta un 25% en acículas adultas de *Pinus radiata*.

La mejor relación respecto a las variables climáticas se obtuvo con el grupo de las gramíneas, como así lo refleja su mayor valor de R^2 (Tabla 2). No obstante, se esperaba lograr la mejor relación con el combustible muerto (broza). Esto debido a que la humedad del mismo está influida fundamentalmente por las condiciones meteorológicas, mientras que los vegetales vivos, si bien muestran cierta dependencia del tiempo atmosférico (Chuvienco *et al.*, 2004), obedecen mayormente a factores relacionados con su estado fenológico, fisiología, morfología y humedad del suelo (Castro *et al.*, 2003; Ruíz & Vega, 2007; Yebra Álvarez, 2008). En mi área de estudio, el haber hallado un resultado más favorable con las gramíneas puede atribuirse a que una gran proporción de éstas se encontraban en estado senescente al momento de extraerlas y, en esas condiciones (contenido de humedad menor a 30%), se consideran combustibles muertos (Andrews *et al.*, 2006), por lo que su contenido de humedad tendría una mayor dependencia de las variaciones de la atmósfera. Es de esperar, por lo tanto, que en esas condiciones ambos grupos de combustibles (pastos y broza) respondan de manera similar a estas variaciones. De hecho, sus valores de R^2 no resultaron tan dispares (Tablas 2 y 3). Quizás las diferencias radiquen en que en la broza, dada su posición con respecto al suelo, estén actuando con mayor influencia otros factores sobre su contenido de humedad, como la condensación nocturna, o cierto grado de humedad existente en la parte superior del suelo pese a la falta de lluvias. Plucinski (2003), en un estudio realizado durante dos temporadas de verano en Nueva Gales del Sur (sudeste de Australia), observó mayor humedad en hojarasca de *Allocasuarina nana* (arbusto de hoja perenne) y de *Eucalyptus sp.* a primeras horas de la mañana. El autor atribuye esta característica al aporte de humedad proveniente del rocío producido en la noche, puesto que al momento o en días previos no intervino otra fuente de humedad tal como lluvias, al menos en esos ensayos. En el presente trabajo, también se observaron mayores humedades del combustible en horas de la mañana, por lo que es probable que haya intervenido el mismo efecto. Por su parte, Pook & Hill (1993) encontraron en plantaciones de *Pinus radiata* de Australia, en condiciones libres de lluvia, que la humedad disponible en la parte superior del suelo incidía sustancialmente en la humedad de los restos superficiales de esta especie, al mejorar notablemente su predicción cuando aquella variable se añadía al modelo. En mi estudio no se tuvo en cuenta la influencia de este factor sobre la humedad de la broza, por lo que se recomienda su evaluación, en particular porque las relaciones de la broza con humedad relativa y temperatura no fueron tan claras como las esperadas. Además, Viney (1991) (citado en Plucinski, 2003) sugiere que para estimar la humedad del combustible, en especial la de broza, variables como temperatura y humedad relativa deberían ser medidas cerca de la superficie del mismo. En el caso de la temperatura, y para combustibles expuestos a la radiación solar, ello se

debe a que por acción de la misma, el aire inmediatamente adyacente al combustible es más cálido que el que se encuentra a un nivel superior. Por lo tanto, si esta variable se mide a una altura mayor, se estaría ignorando lo que sucede en la capa cercana a la superficie, que es la que se halla más en contacto con la broza. En mi trabajo, el no haber obtenido un valor elevado de R^2 entre temperatura y humedad de la broza, podría responder a esa causa. No obstante, medir temperatura a un altura menor haría impráctica la aplicación de este estudio puesto que la misma se registró a una altura estandarizada, a la cual se ubican las garitas meteorológicas.

El contenido de humedad de los pastizales mostró una buena relación con humedad relativa y temperatura, en tanto que la humedad de la broza se relacionó en forma significativa sólo con humedad relativa. Este resultado contrasta con lo obtenido por Ganatsas *et al.* (2011), en un bosque en el norte de Grecia, donde la humedad de los pastos presentó una buena correlación únicamente con humedad relativa, en tanto que la de hojarasca y del suelo se relacionaron significativamente con humedad relativa y temperatura. En tanto, Ellsworth *et al.* (2010) evaluó en pastizales dominados por *Uroclhoa maxima* (pasto guinea) de Oahu en Hawaii, relaciones entre distintos parámetros meteorológicos y humedades del material vivo, muerto en pie y hojarasca de esta especie, alcanzando los mejores coeficientes R^2 entre la humedad del suelo y la de estos dos últimos combustibles. Pook & Gill (1993), como se mencionó anteriormente, también obtuvieron mejores resultados incluyendo la humedad del suelo en la predicción del contenido de humedad de restos de superficie de *P. radiata*. Por su parte, Alves *et al.* (2009) en un experimento similar al realizado en mi estudio, con plantaciones de *P. elliottii* en el estado de Paraná (sudeste de Brasil), encontraron los mejores ajustes incluyendo temperatura y velocidad del viento en los modelos de regresión aplicados a restos de acículas superficiales. Al analizar las diferencias entre todos estos resultados, sin embargo, se deben tener en cuenta factores tales como las condiciones ambientales de cada sitio de estudio, la naturaleza de las especies involucradas y las distintas metodologías empleadas.

Si bien en este estudio se hallaron relaciones significativas con humedad relativa y temperatura respecto al combustible vivo del estrato herbáceo, otros trabajos como los de Verbesselt *et al.* (2007) en ecosistemas de sabana de Sudáfrica, Cocero *et al.* (1999), Chuvieco *et al.* (2004), García *et al.* (2008) y Yebra *et al.* (2008) en pastizales de España, basados en relaciones entre variaciones del contenido de humedad y cambios en la reflectividad de la superficie vegetal, han mostrado mayores coeficientes de regresión con índices o variables derivados de imágenes satelitales captadas por sensores de teledetección (VEGETATION, AVHRR, MODIS). Entre ellos se mencionan NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NDWI (Índice de Agua de Diferencia

Normalizada), TS (Temperatura de Superficie), NDVI/TS y NDII (Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada). Ésta puede ser una alternativa a utilizar para los modelos de comportamiento de fuego o sistemas de evaluación de riesgo de incendio en La Pampa.

El contenido de humedad de las ramas de caldén exhibió, al igual que la humedad de broza, una relación significativa únicamente con humedad relativa y fue el grupo que presentó el menor coeficiente R^2 . Esto es de esperar en combustibles de mayor grosor, ya que al tener menor relación superficie-volumen, responden más lentamente a las variaciones de la atmósfera (Ruíz & Vega, 2004), por lo cual no experimentan a lo largo del día cambios muy marcados en su contenido hídrico. Por el contrario, experimentan mayormente cambios estacionales. Aunque el grado de estas variaciones diarias y estacionales dependerán en gran medida de las características fisiológicas de cada especie. Por ejemplo, en zonas mediterráneas de España e Italia se encontró una alta correlación entre ramas vivas de *Cistus monspeliensis* y humedad relativa, temperatura y temperatura máxima diaria, así como entre *Rosmarinus officinalis* y temperatura máxima diaria (Castro *et al.*, 2003; Pellizzaro *et al.*, 2005), debido a que dichas especies mostraron ser muy sensibles a modificaciones en las condiciones ambientales. Mientras tanto, otras especies como *Phillyrea angustifolia* y *Pistacia lentiscus* fueron menos dependientes de esos cambios, al presentar valores casi constantes de su contenido de humedad a lo largo del año. Esto sugiere que modelos basados sólo en parámetros meteorológicos no serían adecuados para describir alteraciones estacionales en los niveles de humedad de estas especies (Pellizzaro *et al.*, 2005). En este estudio se observó únicamente la variación diaria del estado hídrico de caldén, por lo que sería interesante examinar también las estacionales para analizar, junto con parámetros climáticos, la probabilidad de mejora del modelo obtenido para predecir la humedad de este tipo de combustible.

Conclusiones

Esta investigación logra describir adecuadamente la variabilidad del contenido de humedad del combustible a lo largo del día y demuestra cómo en épocas de alto riesgo de incendio, el combustible, particularmente el fino, puede pasar en un corto período de tiempo (horas), de altos a muy bajos niveles de humedad. Esto pone de manifiesto la importancia de cuantificar esta variable y evaluar la capacidad de predecirla de manera práctica a través de modelos sencillos, con el fin de facilitar su aplicación en el campo.

El estudio indica además la existencia de relaciones claras entre variables ambientales, sobre todo humedad relativa y temperatura, y contenido de humedad de la vegetación herbácea. Por lo tanto, se cree viable el empleo de estos parámetros en la construcción de modelos para predecir la humedad de la misma. Esto contribuiría a una

mayor rapidez y eficacia en la determinación del peligro de incendio y facilitaría el trabajo de técnicos responsables en el manejo y combate del fuego. En ese sentido, tal como se expone en Sharples *et al.* (2009), una vez construidos y afianzados los modelos, se podrían elaborar guías con tablas o gráficos de fácil lectura para ser utilizados en el campo, incluyendo en ellos el valor de las variables intervinientes para el cálculo de la humedad del combustible, e incluso otras herramientas gráficas para la determinación de índices de peligro de incendio, y así proporcionar una forma simple y práctica de obtener en tiempo real la información necesaria. Además sería de gran utilidad para aplicar prácticas de manejo del fuego, como las quemas prescriptas, dado que permitiría conocer los umbrales adecuados de humedad del combustible para realizarlas de manera segura. Otra alternativa útil a evaluar es la teledetección, que presenta la ventaja de cubrir amplias zonas geográficas con buena frecuencia temporal. Con índices de vegetación y otras variables generadas a partir de imágenes satelitales también se pueden crear modelos de estimación del estado hídrico de la vegetación en un sitio y momento específico.

Los resultados no fueron muy satisfactorios entre el contenido de humedad de broza y caldén y las variables climáticas utilizadas. En el caso de broza, podrían analizarse otros factores, por ejemplo la humedad del suelo, para evaluar su incorporación al modelo y la posibilidad de corregir la capacidad de predicción de su humedad. Del mismo modo, sería interesante examinar la variabilidad del contenido hídrico de caldén y su relación con las componentes meteorológicas, en diferentes estaciones del año. Ello contribuiría a mejorar la aplicación de quemas prescriptas, por ejemplo, ya que posibilitaría establecer épocas apropiadas (de mayor contenido de humedad del caldén) para llevar a cabo esta práctica y evitar así la quema de este combustible arbóreo.

Esta experiencia se llevó a cabo en época estival, de mayor peligrosidad de incendio, y durante un único día, por lo que se cree conveniente repetirla para asegurar la fiabilidad de los resultados. Además, se debería realizar en otras estaciones del año y áreas del caldenal para lograr un mayor conocimiento de las relaciones analizadas y poder obtener modelos de predicción más confiables y generalizables al caldenal en su conjunto. No obstante, sería prioritario testear previamente los modelos, principalmente el obtenido para gramíneas, a fin de evaluar la precisión de sus estimaciones. Tal vez el hallazgo más destacado del trabajo sea la existencia de asociación entre contenido de humedad del combustible y variables atmosféricas, lo que implica que, si bien la capacidad predictiva puede mejorarse, es factible determinar el estado hídrico de la vegetación a partir de variables climáticas de registro generalizado.

Referencias bibliográficas

- Alves, M. V. G.; A. C. Batista; R. V. Soares; M. Ottaviano & M. Marchetti. 2009. Fuel moisture sampling and modeling in *Pinus elliottii* Engelm. plantations based on weather conditions in Paraná - Brazil. *iForest- Biogeosciences and Forestry* 2: 99-103.
- Andrews, P. L.; S. A. J. Anderson & W. R. Anderson. 2006. Evaluation of a dynamic load transfer function using grassland curing data. Págs.: 381-394. En: Andrews, P. L. & Butler, B. W., comps., Fuels management -How to measure success. Conference Proceedings. 2006, March, 28-30. Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Arroyo, L. A.; C. Pascual & J. Manzanera. 2008. Fire models and methods to map fuel types: the role of remote sensing. *Forest Ecology and Management* 256: 1239-1252.
- Bianchini, G. 2006. Wildland fire prediction based on statistical analysis of multiple solutions. Doctoral thesis. Universidad Autónoma de Barcelona, Spain. 120 págs.
- Bóo, R. M., D. V. Peláez, S.C. Bunting, O. R. Elía & M. D. Mayor. 1996. Effect of fire on grasses in central semi-arid Argentina. *Journal of Arid Environments* 32: 259-269.
- Bravo, S.; C. Kunst, & J. Panigatti. 2003. Fuego en los ecosistemas argentinos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Santiago del Estero, Argentina.
- Cabrera, A. L. 1994. Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Tomo II, fascículo 1: Regiones fitogeográficas argentinas. ACME. Buenos Aires, Argentina.
- Cano, E. 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa. UNLPam, Gobierno de la provincia de La Pampa e INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Castro, F. X.; A. Tudela & M. T. Sebastia. 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology* 116: 49-59.
- Cocero, D.; D. Riaño; P. Vaughan; J. Martínez & E. Chuvieco. 1999. Sensibilidad de distintos índices de vegetación para determinar la humedad del combustible. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España.
- Countryman, C. M. & W. A. Dean. 1979. Measuring moisture content in living chaparral: a field user's manual. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Gen. Tech. Rep. PSW-36. 27 págs.
- Chuvieco, E.; D. Cocero; D. Riaño; M. P. Martín; J. Martínez V.; J. de la Riva & F. Pérez, 2004. 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.
- Defossé, G.; C. Rostagno; H. del Valle & M. Dentoni. 2003. El fuego en la porción austral de la región del monte. Págs: 167-179. En: Bravo, S.; C. Kunst & J. Panigatti. 2003. Fuego en los ecosistemas argentinos. Ediciones INTA. Santiago del Estero, Argentina.
- Denham, M. 2007. Predicción de incendios forestales basada en algoritmos evolutivos guiados por los datos. Trabajo experimental del programa de doctorado en informática "Arquitectura de computadores y procesamiento paralelo". Universidad Autónoma de Barcelona, España. 70 págs.

- Dentoni, M. & M. Muñoz, 2000. Sistemas de evaluación de peligro de incendios. Plan Nacional de Manejo del Fuego. Secretaría de Desarrollo Sustentable y Ambiente Humano. Informe interno. 37 págs.
- Dirección General de Defensa Civil. 2009. Manual integral de prevención y lucha contra incendios rurales en La Pampa. Santa Rosa, La Pampa. L&M SRL.
- Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada & C. W. Robledo. InfoStat, versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dussart, E.; P. Lerner & R. Peinetti. 1998. Long-term dynamics of two populations of *Prosopis caldenia* Burkart. *Journal of Range Management* 51: 685-691.
- Ellsworth, L. M.; C. M. Litton & J. B. Kauffman. 2010. Using soil moisture and weather variables to predict live and dead fuel moisture in Guinea grass (*Urochloa maxima*) on Oahu, Hawaii. The 95th Ecological Society of America (ESA) Annual Meeting. Pennsylvania, USA.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 (FRA 2010) (en línea). Roma, Italia. Disponible en web: http://foris.fao.org/static/data/fra2010/FRA2010_Report_S.pdf.
- Ganatsas P.; A. Mantzavelas & M. Tsakalimi. 2011. Development of an adapted empirical drought index to the Mediterranean conditions for use in forestry. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 241-250.
- García, M.; E. Chuvieco; H. Nieto & I. Aguado. 2008. Combining AVHRR and meteorological data for estimating live fuel moisture content. *Remote Sensing of Environment* 112: 3618-3627.
- Kunst, C. & S. Bravo. 2003. Fuego, calor y temperatura. Págs.: 39-46. En: Bravo, S.; C. Kunst & J. Panigatti. 2003. Fuego en los ecosistemas argentinos. Ediciones INTA. Santiago del Estero, Argentina.
- Lell, J. 2004. El caldenal: una visión panorámica del mismo enfatizando en su uso. 18 págs. En: Arturi, M. F.; J. L. Frangi & J. F. Goya. 2004. Ecología y manejo de los bosques de Argentina, UNLP, CD-ROM.
- Lerner, P. 2004. El caldenal: dinámica de poblaciones de caldén y procesos de expansión de leñosas en pastizales. 15 págs. En: Arturi, M. F.; J. L. Frangi & J. F. Goya. 2004. Ecología y manejo de los bosques de Argentina, UNLP, CD-ROM.
- Lorda, H.; S. Y. Bellini; P. Lucchetti & A. Sipowicz. 2001. Los incendios rurales en La Pampa. Proyecto AgroRADAR. EEA INTA Anguil, La Pampa. Informe técnico. 6 págs.
- McArthur, A. G. 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. Commonwealth of Australia. Department of National Development. Forestry and Timber Bureau. Leaflet N° 107. 36 págs.
- Medina, A. A.; E. G. Dussart; H. D. Estelrich & E. A. Morici. 2000. Reconstrucción de la frecuencia de fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* Burkart, de Arizona, sur de la Provincia de San Luis. *Multequina* 9: 91-98.

- Morandini, F.; P. A. Santoni & J. H. Balbi. 2001. The contribution of radiant heat transfer to laboratory – scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal* 36: 519-543.
- Morandini, F.; P. A. Santoni & J. H. Balbi. 2001. Fire front width effects on fire spread across a laboratory scale sloping fuel bed. *Combustion Science and Technology* 166: 67-90.
- Natural Resources Canada. 2003. Fighting wildland fire with technology (brochure). Canadian Forest Service. Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. 14 págs.
- Pausas, J. G. 2010. Fuego y evolución en el Mediterráneo. *Investigación y Ciencia* 407: 56-63.
- Pellizzaro, G.; A. Ventura & P. Zara. 2005. Influence of seasonal weather variations on fuel status for some shrubs typical of Mediterranean Basin. En: *Proceedings of the 6th Fire and Forest Meteorology Symposium*. 2005, October 25-27. Canmore, AB, Canada.
- Plucinski, M. P. 2003. The investigation of factors governing ignition and development of fires in heathland vegetation. Ph. D. dissertation. University of New South Wales, Australia. 347 págs.
- Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF). 2001. Coordinación de capacitación. Manual de capacitación básica para combatientes de incendios forestales. Primer nivel. Buenos Aires, Argentina.
- Pook, E. W. & A. M. Gill. 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.
- Ruíz González, A. D. 2004. La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. Tesis doctoral inédita. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 440 págs.
- Ruíz González, A. D. & J. A. Vega Hidalgo, 2005. La humedad de los restos forestales combustibles en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*: niveles alcanzados en masas de Galicia y fuentes de variación. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza, España.
- Ruíz G., A. D. & J. A. Vega H. 2007. Modelos de predicción de la humedad de los combustibles muertos: fundamentos y aplicación. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, España.
- Schlaps, E. 2011. Regresión y correlación lineal múltiple. Trabajo final para la aprobación de la materia optativa de Licenciatura en Matemática "Análisis de varianza y regresión", Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNLPam. 76 págs.
- Scott, J. & Burgan, R. 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. 72 págs.
- Sharples, J. J.; R. H. D. McRae; R. O. Weber & A. M. Gill. 2009. A simple index for assessing fuel moisture content. *Environmental Modelling & Software* 24: 637-646.

- Tolhurst, K. G. & N. P. Cheney. 1999. Synopsis of the knowledge used in prescribed burning in Victoria. Department of Natural Resources and Environment. Melbourne, Australia. 97 págs.
- Trollope, W. S. W. 1991. Fire behavior and its significance in burning as a veld management practice. Prestige Farmers Day: Waterberg Plateaux National Park, Namibia. August, Grassland Society Southern Africa. 15 págs.
- Viney, N. R. 1991. A review of fine fuel moisture modelling. International Journal of Wildland Fire 1: 215-234.
- Verbesselt, J.; B. Somers; S. Lhermitte; I. Jonckheere; J. van Aardt & P. Coppin. 2007. Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems. Remote Sensing of Environment 108: 357-368.
- Yebra Álvarez, M. 2008. Estimación del contenido de humedad de vegetación mediterránea a partir de imágenes MODIS. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá, España. 202 págs.
- Zárate López, L. G. 2004. Cap. 4: Modelos matemáticos de los incendios forestales: análisis bibliográfico. 38 págs. En: Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 234 págs.