

Dinámica del contenido de humedad de pastos y su relación con la ecología del fuego en región chaqueña occidental (Argentina)

KUNST, C.¹; LEDESMA, R.¹; BRAVO, S.²; DEFOSSÉ, G.³; GODOY J.¹; NAVARRETE, V.¹; JAIME, N.¹

RESUMEN

El fuego es un evento frecuente en la región chaqueña argentina. El contenido de agua (CH, %) es un factor que define la inflamabilidad de los combustibles vegetales y su dinámica temporal puede ser usada para comprender la ecología del fuego en una región, planificar su uso como prescripto; o como un indicador de riesgo para su prevención. En este trabajo se evaluó la dinámica de CH a través del tiempo en tres sitios ecológicos (\approx modelos de combustible) de la región chaqueña, en muestras con *Elionorus muticus* como especie dominante (sitio bajo, sabana), *Trichloris pluriflora* y *Pappophorum pappipherum* (sitio media loma, parques) y una especie exótica, *Panicum máximum* cv Gatton (sitio loma, bosque secundario rolado), respectivamente. El CH fue determinado en forma gravimétrica mensualmente en el bajo en 1992; y cada 10-15 días entre mayo 2008 y octubre 2009 en la media loma y la loma. Los datos fueron analizados en forma gráfica y mediante análisis de la varianza empleando estación climática, especie y tiempo cronológico como factores de clasificación. El CH promedio de las especies a través del tiempo presentó una amplitud estacional marcada, entre 4-5% en invierno-primavera y mayor al 150% en verano-otoño. Las especies nativas presentaron un CH significativamente menor que *P. máximum* y más bajo que el umbral de extinción teórico (CH=30%) indicando que en la región chaqueña, como en otros ecosistemas, las gramíneas y sus formaciones vegetales son el combustible por donde se propaga el fuego. La dinámica temporal de CH podría ser representada por una senoide. La correlación entre CH y la máxima humedad relativa entre fechas de muestreo fue significativa. Ambos resultados sugieren que es factible usar funciones matemáticas conocidas y métodos indirectos para predecir CH y la 'inflamabilidad' del combustible en las estaciones climáticas, facilitando la predicción del comportamiento de fuego.

Palabras clave: manejo de fuego, modelos de combustible, vegetación.

ABSTRACT

Fire is a common event in the Chaco region of Argentina. The fuel moisture content (CH, %) is a factor defining flammability. Its changes throughout time could be used as an index of fire risk, to understand fire ecology, and for planning the use of prescribed fire. We assessed CH dynamics in three ecological sites (\approx fuel models): samples with *Elionorus muticus* as dominant species (lowland, savanna); *Trichloris pluriflora* and *Pappophorum pappipherum* (midland, parkland) and an exotic species *Panicum máximum* cv Gatton (upland, roller-chopped

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Jujuy 850, Santiago del Estero, G4200CQR, Argentina. Correos electrónicos: kunst.carlos@inta.gov.ar ledesma.roxana@inta.gov.ar

²Universidad Nacional de Santiago del Estero, Cátedra de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales, Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina.

³Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico, (CIEFAP) y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Sede Esquel, Esquel, Chubut. Coreo electrónico: gdefosse@ciefap.org.ar

secondary forest). CH was monitored using the gravimetric method every month in the lowland during 1992; and every 10-15 days from May 2008 to October 2009 in the midland and upland sites. Data were analyzed graphically and with analysis of variance using season, chronological time and species as classification factors. The average CH of the species presented a marked seasonal trend, with a large amplitude, from 4-5 % in the winter to above 150 % in summer and fall, respectively. The CH of the native species was significantly lower than *P. maximum*, and also lower than the extinction threshold (CH = 30 %) suggesting that in the Chaco region, as well as in other ecosystems, grasses are the fuel where fire starts and propagate to other plant communities. Correlation between CH and the maximum air relative humidity observed between sampling dates was significant. The latter fact and the sinusoidal pattern of CH suggest that may be feasible the use of known mathematical functions and indirect methods to predict CH, helping in predict fire behavior throughout the seasons.

Keywords: fire ecology, fire behavior, vegetation.

INTRODUCCIÓN

En la región chaqueña argentina el fuego es un evento frecuente. Por una parte, el fuego era usado antiguamente por los pueblos originarios para la caza, guerra y otros fines (Morello y Saravia Toledo, 1959). Por otra parte, existen tipos de vegetación nativos dominados por gramíneas (sabanas y pastizales) donde el fuego, al contribuir a mantener el equilibrio entre especies leñosas-herbáceas, posee un rol ecológico clave (Morello y Saravia Toledo, 1959; Morello y Adámoli, 1974). Actualmente, el fuego es empleado como herramienta de manejo de la vegetación natural para fines ganaderos y para eliminar residuos leñosos (Bravo *et al.*, 2001; Fischer *et al.*, 2012). En años de sequía ocurren fuegos accidentales en grandes superficies y que generan gran preocupación de la sociedad¹.

La ubicuidad del fuego en los agroecosistemas chaqueños requiere generar información básica sobre su ecología y manejo. La ecología es la comprensión del rol del fuego en los ecosistemas y abarca diversos aspectos tales como comportamiento (longitud de llama, velocidad de avance del frente, etc.), la relación clima-fuego y la inflamabilidad de las especies. Otros aspectos incluidos son las características del combustible que propaga el fuego (fino, mediano o grueso) y la estructura de la vegetación y/o paisaje que puede influir a escala local sobre la desecación de los combustibles. (Rothermel, 1983; Anderson, 1982; Agee, 1993).

La vegetación natural del Chaco consiste en un mosaico de bosques, arbustales y sabanas, que puede asimilarse a distintos modelos de combustible (*sensu* Rothermel, 1983). Las gramíneas son los combustibles finos por excelencia

debido a su relación superficie/volumen, a la arquitectura y a la estructura individual de sus plantas. Las comunidades dominadas por pastos son muy proclives al fuego a nivel mundial (Groot *et al.*, 2005; Cheney y Sullivan, 2008). En la región chaqueña existen tres modelos de combustible dominados por pastos donde el fuego tiene mayor probabilidad de ser encendido por tormentas eléctricas y por el hombre, y de allí propagarse a otros estratos y formaciones vegetales en condiciones climáticas extremas (Bravo *et al.*, 2001): (a) sabanas de *Elionorus muticus* (Spreng.) Kuntze² (aibe), una especie que posee sustancias aromáticas en su follaje que le otorga gran inflamabilidad (Burkart, 1969); (b) parques y pastizales dominados por *Trichloris* y *Pappophorum* ('pastizales de quemados', Morello y Saravia Toledo, 1959); y (c) bosques secundarios y arbustales rolados sembrados con *Panicum maximum* Jacq cv Gatton³ para mejorar la oferta de forraje y facilitar el tránsito de personal y de hacienda (Kunst *et al.*, 2006b). Las gramíneas exóticas modifican el comportamiento del fuego debido a la gran cantidad de biomasa (combustible) generada y a la arquitectura o hábito de la planta (McDonald y Mc Pherson, 2010).

El manejo del fuego se define como las acciones destinadas a la protección del fuego y al empleo de este para lograr objetivos de manejo (CIFFC, 2002). La relación directa entre el contenido de humedad o agua (CH) de los combustibles y su probabilidad de ignición es universalmente conocida (Bianchi *et al.*, 2014). Por lo tanto, el estudio de la dinámica del CH en las gramíneas adquiere una importancia clave en el estudio de la ecología y el manejo del fuego en la región chaqueña así como en otros ecosistemas donde dominan los pastos (Groot *et al.*, 2005).

¹La Voz del Interior, Verificado: 13 de agosto de 2013. <http://www.lavoz.com.ar/galeria/ciudadanos/carlos-paz-tras-incendio>

²Nomenclatura según Catálogo de la Flora de la República Argentina, Instituto de Botánica Darwinion (<http://www2.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina> verificado: 30 de agosto de 2013)

³Sinónimo de *Megathyrsus maximus* (Jacq) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs var. *Maximus*. (<http://www2.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina> verificado: 30 de agosto de 2013)

El CH de los combustibles finos en situación de campo es difícil de evaluar rápidamente, por ello es importante identificar: (a) el patrón temporal del CH para evaluar si su predicción puede facilitarse empleando ecuaciones o funciones matemáticas conocidas (Anderson, 1986; Catchpole *et al.*, 2001) y (b) la fortaleza relativa de las correlaciones del CH con otras variables más fáciles de medir u obtener, de manera indirecta, como las climáticas (Pellizzaro *et al.*, 2006). La significancia estadística de la correlación entre el CH y las variables ambientales es un índice de la fiabilidad de las predicciones de peligro de fuego cuando se usan métodos indirectos de estimación de CH (Ruiz Gonzalez, 2004). Conocer la variación del CH y las variables asociadas a esta contribuye directamente a identificar períodos de alto riesgo de fuego y también para planificar quemas (Chuvieco *et al.*, 2009; Pellizzaro *et al.*, 2006). El curado es la proporción de tejido seco/muerto en los combustibles finos y es otro indicador del peligro de ignición especialmente en los pastos (Cheney y Sullivan, 2008; Wittich, 2011).

Existe abundante información sobre el contenido de agua de gramíneas nativas y exóticas, un atributo calculado comúnmente como subproducto de la estimación de materia seca para estudios de rendimiento de biomasa (Cornacchione, 2008; Kunst *et al.*, 2014b). Esos estudios, sin embargo, están orientados hacia la producción animal y no hacia la ecología de fuego. Los objetivos de este trabajo fueron: (a) establecer la dinámica estacional del CH en pastos nativos y exóticos de la región chaqueña; (b) analizar los efectos de la estación climática y la especie sobre el CH, y (c) analizar la correlación entre el CH, la humedad del suelo y las variables climáticas como la precipitación, la temperatura y humedad relativa del aire. La información obtenida fue interpretada en un contexto de ecología, prevención y manejo de fuego y complementa la generada por otros autores (Bianchi *et al.*, 2014; Kunst *et al.*, 2014a).

MATERIALES Y MÉTODOS

Trabajo de campo

El muestreo se realizó en el campo experimental La Maria, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Santiago del Estero, Argentina (28° 3' S y 64° 15' W). El clima es semiárido-subtropical, con inviernos fríos y secos, y veranos calientes y lluviosos (Boletta, 1988). La precipitación media anual es 574 mm, concentrados desde noviembre a mayo (INTA EEA Santiago del Estero, 1936-2005).

Se definió como combustible todo aquel material orgánico susceptible de encenderse (Schroeder y Buck, 1970). Para este estudio, solamente se tuvo en cuenta el combustible fino, caracterizado por una alta relación entre superficie/volumen y con diámetro < 0,5 cm (Sullivan, 2010). El muestreo se realizó en dos períodos en los distintos modelos de combustible y especies:

- **Período I.** Se trabajó en el sitio ecológico bajo, en sabanas de *E. muticus* (Kunst *et al.*, 2006a), entre junio-octubre de 1992, con frecuencia mensual. Las muestras (n=3) se

cosecharon con tijera, en tres ubicaciones seleccionadas al azar, separadas entre sí 200 m. En cada fecha de muestreo se volvió a la misma ubicación. Cada muestra estuvo compuesta con *E. muticus* como dominante, acompañada por *Aristida mendocina* Phil. y *Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. Ex Roen. & Schult., así como por especies del género *Botriochloa*.

- **Período II.** Se trabajó entre el 13/5/2008 y 10/11/2009 en: (a) sitio ecológico media loma con vegetación de parque, dominado por las gramíneas *Pappophorum pappipherum* (Lam.) Kuntze y *Trichloris pluriflora* E. Fournier; y (b) sitio ecológico alto (=loma), con un bosque rolado, con un estrato herbáceo dominado por *P. maximum* cv Gattón. En los dos casos se recolectaron al azar tres muestras individuales por especie y sitio. La frecuencia de muestreo fue semanal durante la primavera-verano y quincenal durante el invierno.

En los dos períodos las plantas muestreadas estaban desarrolladas y maduras; y las muestras consistieron en una mezcla natural de hojas/tallos y tejido seco/muerto. Este tipo de muestra es más representativa del CH de la carga de combustible que el muestreo de órganos y tejidos vivos o muertos por separado (Agee *et al.*, 2002). Las muestras fueron introducidas en una bolsa de nylon inmediatamente luego del corte, identificadas y pesadas *in situ* con una balanza electrónica de precisión 0,1 g, almacenadas en un recipiente con aislación térmica y llevadas al laboratorio donde fueron secadas por 48 h a 60 °C y pesadas nuevamente. Las muestras de combustible se recolectaron entre las 10 y 12 am. Este esquema de muestreo se basó en que la variación diurna del CH es insignificante en términos de comportamiento del fuego siendo más relevante la variación estacional (Alexander, 1988). El CH de las muestras de combustible se estimó mediante gravimetría con base peso seco (Bianchi *et al.*, 2014). En el período II se evaluó el curado de los combustibles finos empleando una escala visual subjetiva de 0 = sin tejido seco a 100%, totalmente seco (Wittich, 2011).

En los dos períodos y para cada sitio ecológico y ubicación se tomaron 3 muestras de suelo al azar para evaluar contenido de agua (HS), a dos profundidades: 0-30 cm y 30-60 cm.

La humedad relativa del aire (HR, %), las temperaturas del aire máxima y mínima, la velocidad del viento a 2 m de altura (VV, km/h), la precipitación (mm) y la radiación solar (megajoules.m²) registradas en el área experimental durante el período II fueron obtenidas del Observatorio Meteorológico del INTA, situado a 6 km del sitio de muestreo.

Análisis de datos

Se calculó el promedio de HS y CH por fecha de muestreo para los dos períodos, clasificándolas por sitio, profundidad de suelo y especie, respectivamente.

Período I. Se realizó el análisis de la dinámica temporal del promedio del CH y de la HS a las dos profundidades de suelo y se asoció estas variables con el patrón temporal de las precipitaciones.

Período II. La HS promedio fue sometida a un análisis de la varianza (ANVA) de medidas repetidas. Los datos de CH se analizaron: (a) mediante gráficos de caja para evaluar dispersión de los datos (Zar 1999), y (b) efectuando un ANVA con CH como variable dependiente y los siguientes factores de clasificación:

- **Estación climática:** representa el efecto de las diferencias estacionales en la ocurrencia de lluvias y temperaturas del aire. El período de muestreo fue dividido de acuerdo a la precipitación y temperatura del aire observadas en 7 estaciones climáticas (tabla 1 y figura 2). La fecha de comienzo y fin de cada una fue definida de acuerdo a dos umbrales: (a) precipitación caída en la semana previa al muestreo, y (b) promedio decádico de temperatura del aire, ambos registrados para el período 2008-09 en el Observatorio Meteorológico, INTA EEA Santiago del Estero ubicado a 6 km de las áreas de muestreo. Para establecer la fecha de comienzo de la primavera se utilizó una precipitación ≥ 10 mm (observación empírica) y promedio decádico de temperatura mínima del aire > 10 °C, pero en ascenso. La fecha de comienzo del verano se definió a partir del promedio decádico de la temperatura del aire mínima > 15 °C y con lluvias cada 10-15 días. El otoño fue definido como el período donde el promedio decádico de temperatura mínima del aire > 15 °C y en descenso. Esta temperatura del aire es la mínima a la cual las especies nativas y *P. maximum*, que poseen metabolismo fotosintético C4, manifiestan actividad fisiológica (Ivory y Whiteman, 1978). El invierno es una temporada sin lluvias y con promedio decádico de temperatura mínima del aire ≤ 10 °C. Las estaciones climáticas pueden poseer un mismo patrón de comportamiento de las lluvias y temperaturas del aire, pero su duración es diferente al variar las magnitudes y ocurrencias de dichas lluvias.
- **Especie:** (*P. maximum*, *T. pluriflora* y *P. pappipherum*) representa características intrínsecas ligadas a su adaptación a la sequía, el sistema radical, el espesor de las hojas, el hábito de la planta, el contenido de lignina y la composición química específica, factores que afectan la ignición y el comportamiento del fuego (Chuvieco *et al.*, 2009; Davies y Legg, 2011).
- **Tiempo cronológico:** representa la variación producida por el tiempo cronológico por sí mismo y la fenología-fisiología de las especies. Fue incluida como covariable.

La variable CH fue convertida a rangos para cumplir con los supuestos del análisis de la varianza (Conover, 1980). Se emplearon medidas repetidas y modelos anidados con sentido biológico y de interés para el análisis (Zar, 1999). Las interacciones sin significancia ecológica y estadística fueron descartadas. Los modelos tuvieron en cuenta la jerarquía de factores considerando la estación climática como el de mayor jerarquía ecológica; y la especie como la de menor. El tiempo cronológico se incluyó como covariable y las medias de CH están ajustadas a esta. Para los cálculos matemáticos se emplearon los PROC MIXED y PROC GLM del paquete estadístico SAS (2002). La sepa-

ración de medias se efectuó mediante el test de Duncan y la opción LSMEANS; si ambos métodos coincidían, se informó solamente el resultado del test de Duncan. Los gráficos de caja fueron construidos empleando el programa PAST (Hammer, 2013).

De acuerdo a las sugerencias de Catchpole *et al.* (2001) se analizó la factibilidad del uso de la función senoide para la predicción de CH (fórmula 1):

$$CH = A * (\text{seno}(B * d) - C) + h \quad [1],$$

donde A = amplitud y B = frecuencia del período de la senoide, respectivamente y d = número de días de observación desde el inicio del muestreo (t = 0). La constante C representa el valor de x donde comienza a dibujarse la senoide, en este caso x = tiempo = 13/5/2008 = 0. La constante h representa la variación en el eje de referencia, es decir y = CH = 0. La significancia estadística del coeficiente de correlación de Pearson entre el CH obtenido a campo y el calculado por la senoide fue empleada como indicador de la fiabilidad de la estimación (Ruiz González, 2004).

Se utilizó el coeficiente de correlación de Kendall (Conover, 1980) para analizar la asociación entre el CH promedio de cada especie con HS a las dos profundidades de suelo (0-30 cm y 30-60 cm), y los promedios entre fechas de muestreo de la humedad relativa del aire (HR, %), las temperaturas del aire máxima y mínima, la velocidad del viento a 2 m de altura (VV, km.h⁻¹), la precipitación (mm) y la radiación solar (megajoules.m⁻²) observados entre fechas de muestreo. En todos los casos se empleó el PROC CORR del paquete estadístico SAS (2002) para los cálculos matemáticos, y un $\alpha = 0,05$ como referencia en todos los análisis estadísticos.

Para la interpretación de este estudio, en un contexto de ecología y manejo de fuego, se empleó un umbral de CH $\geq 30\%$, definido en la bibliografía como umbral o humedad de extinción del fuego para combustibles finos en general. Por arriba de ese umbral la saturación de agua de las fibras vegetales es máxima y no pueden absorber más agua: el agua libre se condensa en las paredes celulares y el fuego no puede propagarse (Andrews *et al.*, 2006; Bianchi *et al.*, 2014). Por debajo de ese umbral, las condiciones atmosféricas controlan la dinámica del CH, no la humedad de las células a través de las raíces de las plantas (Rothermel, 1983; Sun *et al.*, 2006; Sullivan, 2010). Los modelos matemáticos empleados para predecir el comportamiento de fuego consideran que un combustible homogéneo con un CH $\leq 30\%$ está seco y muerto. Debido a su variabilidad el umbral de extinción es teórico y subjetivo, ya que existen especies que pueden encenderse con un CH mayor a 30% debido a su composición química o a circunstancias climáticas específicas (Baeza *et al.*, 2002; Groot *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2006).

RESULTADOS

En los dos períodos de muestreo, el CH fue influenciado por las variables climáticas, especialmente la precipitación.

Período I: CH aumentó progresivamente, pero solo sobrepasó el umbral de extinción teórico luego de un evento de precipitación de 20 mm ocurrido en septiembre que incrementó el contenido de humedad del suelo (figura 1). La HS varió entre 4 y 10% no observándose diferencias significativas entre las dos profundidades de suelo durante el período de muestreo.

Período II. El total de lluvia caída entre mayo 2008 y octubre 2009 fue de 471 mm. Las temperaturas del aire medias máximas y mínimas, la HR promedio del aire y la radiación solar presentaron los máximos valores en el verano y los mínimos en el invierno y comienzos de primavera (figuras 2 y 3). La velocidad media del viento fue máxima durante la primavera. La dinámica temporal de HS emuló la dinámica de la precipitación. El sitio media loma presentó el mayor contenido promedio de HS: 6,52%, versus 6,12% en el sitio alto, respectivamente, considerándose esta diferencia significativa ($p > F = 0,0868$). No se observó diferencia significativa en HS promedio entre profundidades de suelo.

La dispersión de los datos del CH promedio fue muy amplia, con magnitudes menores a 5% hasta mayores de 200% (figura 4). Los factores estación climática y especie fueron altamente significativos ($p > F = 0,0001$ en ambos casos). *P. maximum* cv Gatton presentó el mayor CH promedio

(84,28%) en comparación con *P. pappipherum* y *T. pluriflora* (45,8% y 46,9%, respectivamente) siendo las diferencias de CH entre la especie exótica y las nativas significativas ($p > |t| < 0,0001$). El mayor CH promedio en los pastos se observó en la estación verano 1; el menor, en invierno 1, muy por debajo del umbral de extinción (tabla 1).

La progresión estacional de CH presentó una variación a dos niveles de percepción temporal (figura 5): (a) entre-estaciones, con un período de duración anual, y (b) intra-estacional, con duración entre 10-15 días, menos evidente que la anterior. La amplitud de variación de CH varió de acuerdo a las especies, siendo mayor en *P. maximum* (figura 5). En forma similar al período I, el CH de todas las gramíneas reaccionó rápidamente a las primeras lluvias superando en pocos días el umbral de extinción (figura 5). La función sinusoidal presentó un coeficiente de correlación mayor a 0,60 y explicó aproximadamente un 50% de la variación de CH, siendo significativa esta proporción (tabla 2).

La declinación de CH en las especies muestreadas comenzó a principios–mediados del verano (diciembre-enero), aunque la estación de lluvias no había finalizado (figura 5). El comienzo del curado de las gramíneas coincidió con este evento sugiriendo que el fuego podría ocurrir aún a fines de verano y otoño en condiciones climáticas extremas.

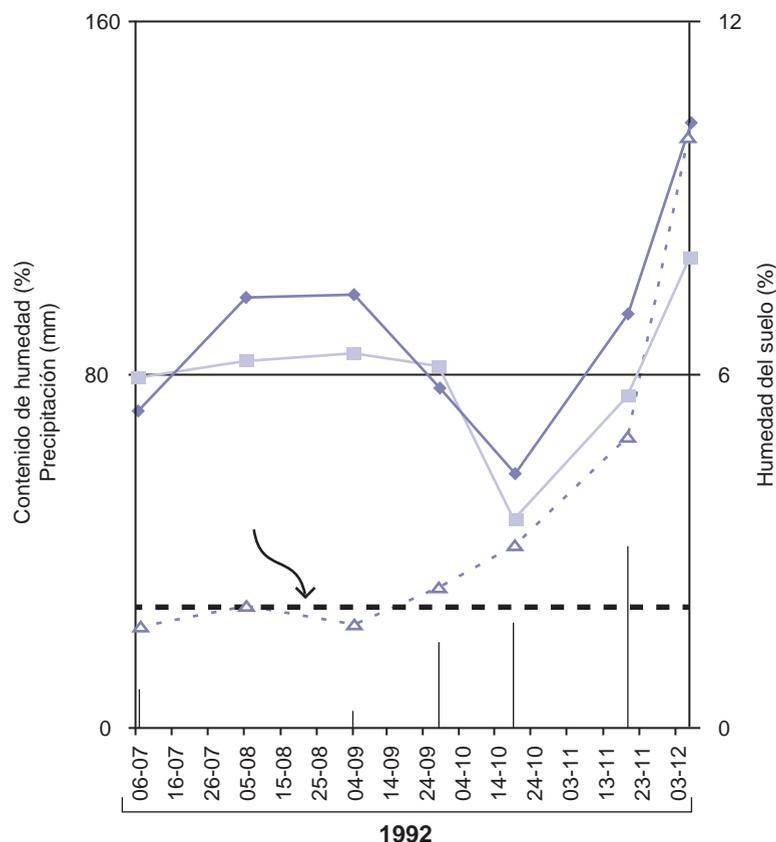


Figura 1. Dinámica de humedad en combustibles finos vivos de gramíneas (triángulos), humedad del suelo a dos profundidades: 0-30 cm (rombos); 30-60 cm (cuadrados); y precipitación (mm, barras) en el sitio ecológico bajo, período 1992. Campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero.

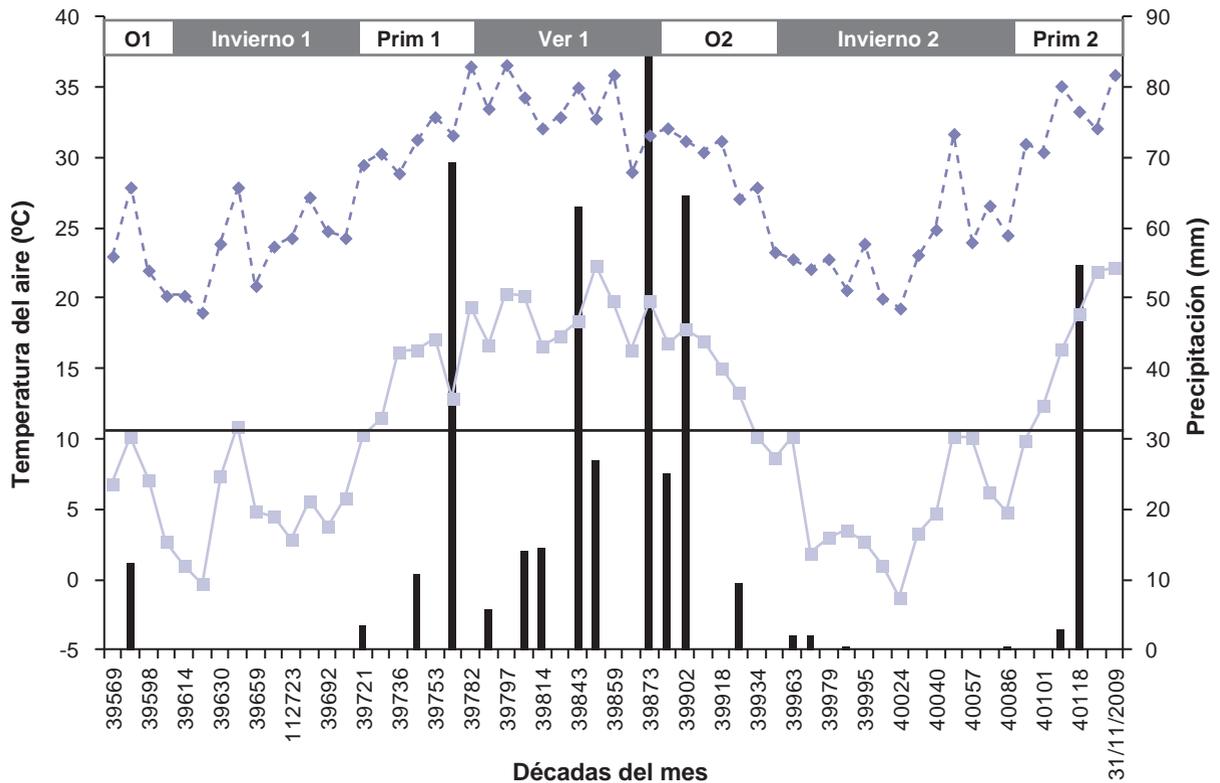


Figura 2. Dinámica temporal de la precipitación (mm, barras) y de temperaturas máxima (rombos) y mínima (cuadrados) del aire (°C, promedio decádico). Período experimental 2008-09, campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero. Abreviaturas: O, otoño; Prim, primavera; Ver: Verano.

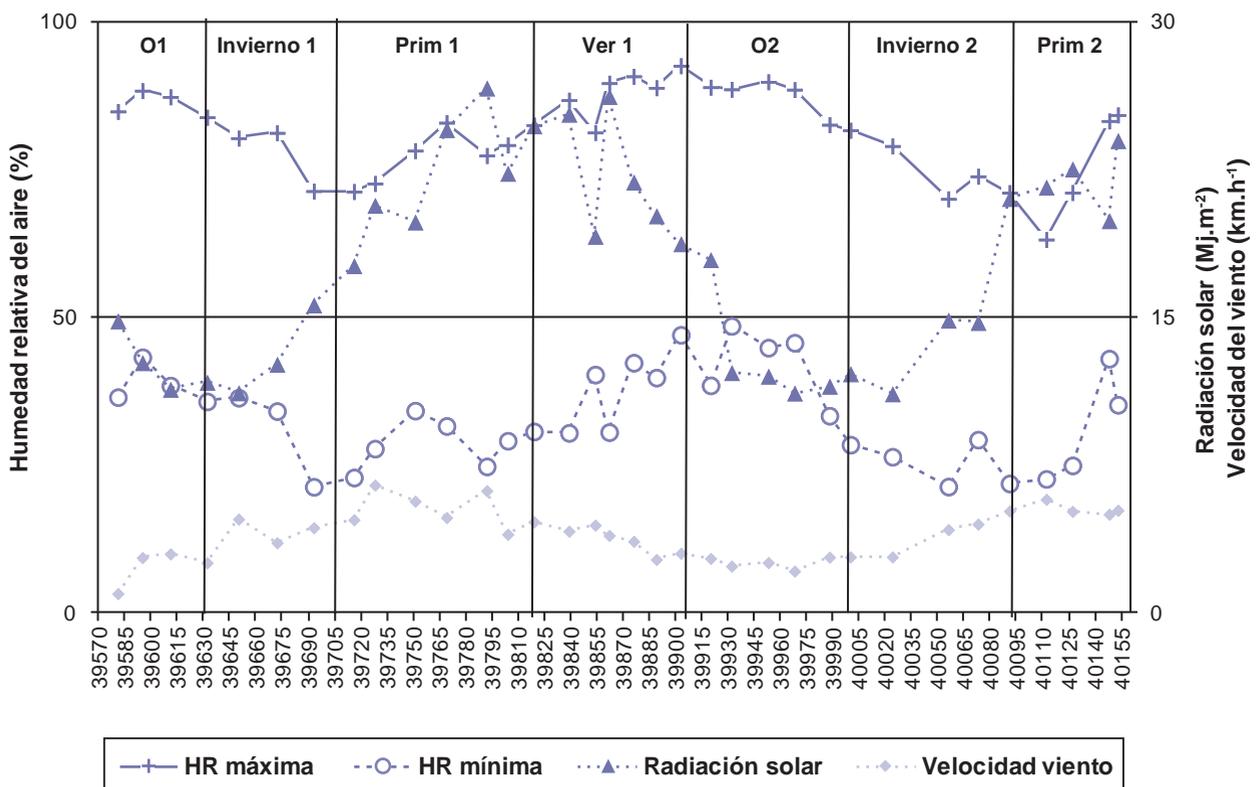


Figura 3. Dinámica temporal de los promedios de la humedad relativa del aire máxima (cruces) y mínima (círculos), la radiación solar (triángulos) y la velocidad del viento a 2 m de altura (rombos) observadas entre fechas de muestreo. Período 2008-09, campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero. Abreviaturas: O, otoño; Prim, primavera; Ver: Verano.

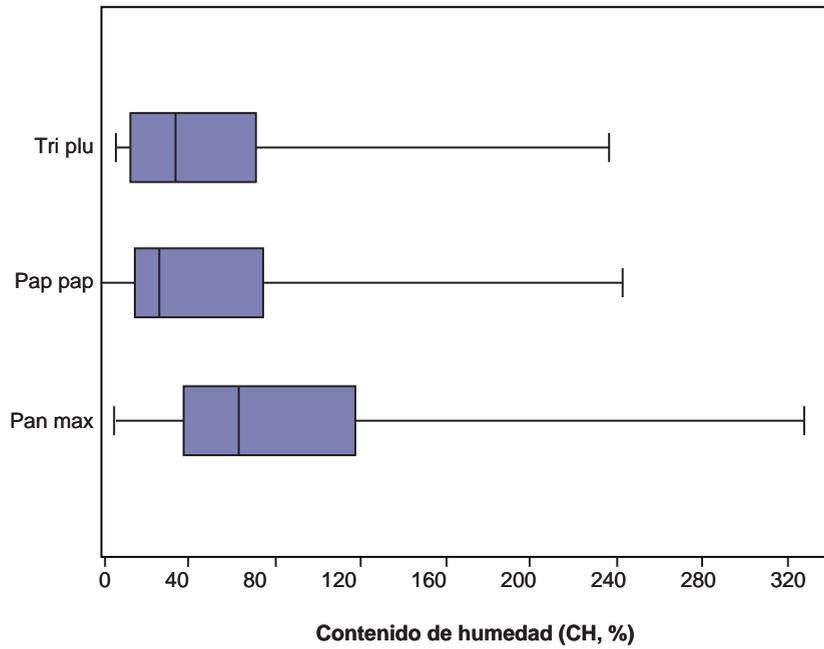


Figura 4. Gráficos de caja del contenido de humedad (CH, %) de tres especies de gramíneas de la región chaqueña occidental. Campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero, período 2008-09. Referencias: Pan max: *Panicum máximo* cv gatton, Tri plu: *Trichloris pluriflora* y Pap pap: *Pappophorum pappipherum*. El marco señala el rango de umbral de extinción.

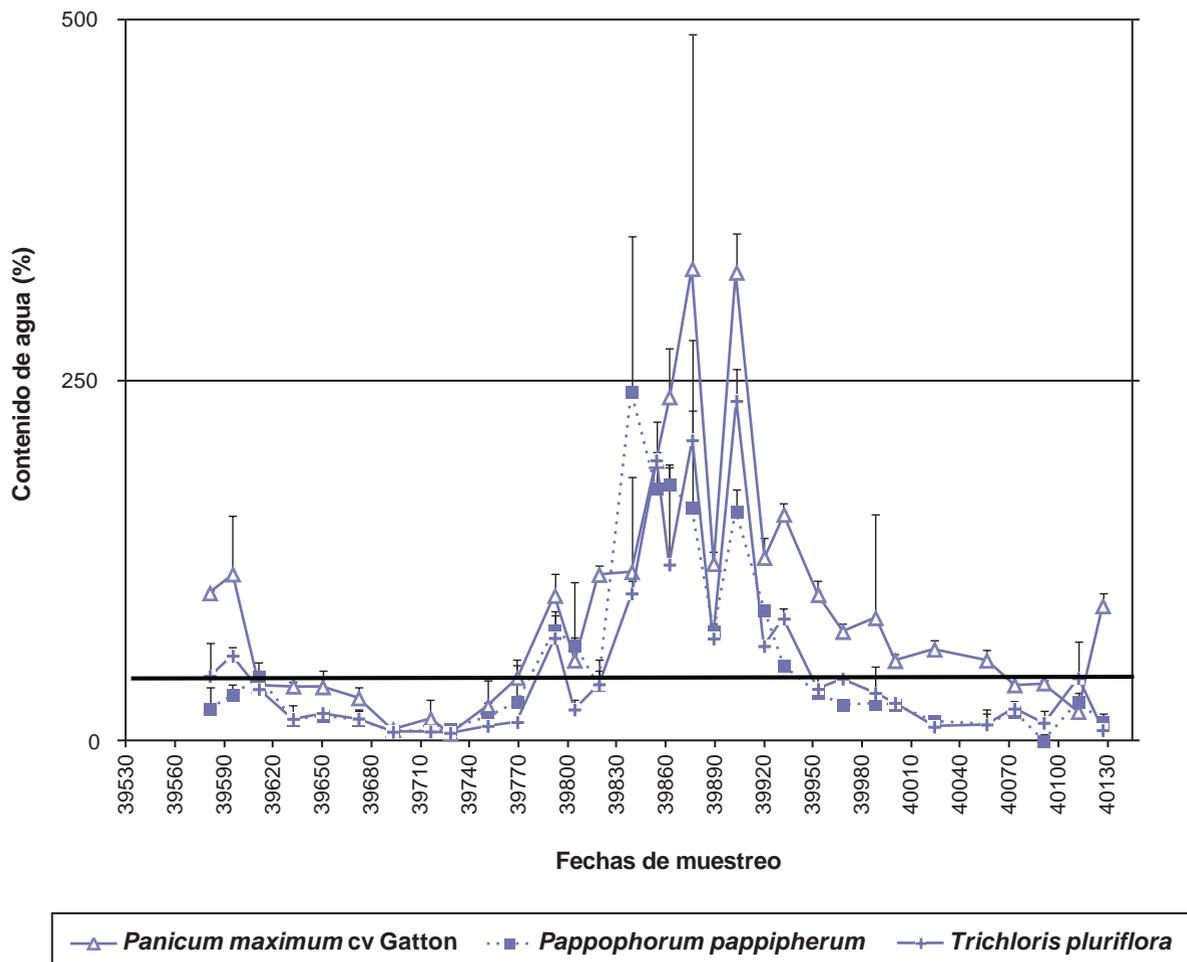


Figura 5. Dinámica estacional del contenido de humedad (CH) promedio de *Pappophorum pappipherum* (cuadrados), *Trichloris pluriflora* (cruces) y *Panicum máximo* cv Gatton panic (triángulos). Período 2008-09. Campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero.

Estación climática	Fechas		CH promedio ¹ (%)	Comparación de medias ²					
	Inicio	Fin		Verano 1	Otoño 2	Primavera 2	Invierno 2	Primavera 1	Otoño 1
Verano 1	06/01/2009	17/03/2009	151,96						
Otoño 2	13/05/2008	12/06/2008	111,71	0,0002					
Primavera 2	05/10/2009	10/11/2009	68,51	<0,0001	<0,0001				
Invierno 2	06/07/2009	17/09/2009	58,34	<0,0001	<0,0001				
Primavera 1	25/09/2008	22/12/2008	18,03	<0,0001	0,053				
Otoño 1	13/05/2008	12/06/2008	15,29	0,22	0,0002	0,0439	0,0504	0,0006	
Invierno 1	03/07/2008	02/09/2008	-10,88	<0,0001	0,0266				<,0001

Tabla 1. Contenido de humedad (CH) promedio de gramíneas de acuerdo a estación climática, 2008-09. Campo experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero.

¹LS MEANS, ²Comparación basada en datos transformados a rangos, test de t, $\alpha = 0,05$.

Especie	A	B	C	h	r ¹	r ²
<i>Panicum maximum</i>	-80	0,017214	-0,781	81	0,77	0,59**
<i>Papp. pappipherum</i>	-82	0,02	-0,6	81	0,73	0,54**
<i>Trichloris pluriflora</i>	-55	0,02	-1,3	61	0,69	0,48**

Tabla 2. Parámetros de la función sinusoidal utilizada para ajustar la dinámica temporal de CH de tres especies de gramíneas del Chaco occidental y sus coeficientes de correlación (r) y determinación (r²).

¹Coefficiente de Pearson

**significativo/significant at $\alpha=0.01$

Referencias: A = amplitud y B = frecuencia del período de la sinusoide, respectivamente; d = número de días de observación desde el inicio del muestreo

(t = 0); C = variación en el ángulo de fase y h = variación en el eje de referencia.

Variables ¹	Especies				
		<i>Trichloris pluriflora</i>	<i>Pappophorum pappipherum</i>	<i>Panicum maximum cv gatton</i>	
Precipitación p > t	τ	0,37	0,31	0,36	
		0,0048	0,017	0,0091	
Humedad de suelo	0-30 cm	τ	0,32	0,23	0,22
		p > t	0,0113	0,069	0,0878
	30-60 cm	τ	0,45	0,34	0,052
		p > t	0,0004	0,0056	0,6936
Humedad relativa el aire	máxima	τ	0,54	0,54	0,50
		p > t	<,0001	<,0001	0,0002
	mínima	τ	0,40	0,47	0,36
		p > t	0,0015	0,0001	0,0062
Velocidad de viento p > t	τ	0,19	0,12	0,12	
		0,12	0,35	0,33	
Radiación solar p > t	τ	-0,17	-0,28	-0,29	
		0,18	0,0263	0,026	

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Kendall (τ) y su significancia estadística entre contenido de humedad de combustibles (CH), humedad de suelo (HS) a dos profundidades, precipitación, humedad relativa del aire máxima y mínima, velocidad del viento y radiación solar para tres especies de gramíneas, período 2008-09. Campo Experimental La María, INTA EEA Santiago del Estero.

¹Promedios de datos observados entre fechas de muestreo.

La correlación entre CH con el promedio de HS a 0-30 cm, a 30-60 cm, la precipitación y los promedios de humedad relativa del aire máxima y mínima entre fechas de muestreo fueron significativas en las tres especies en general (tabla 3). La mayor magnitud del coeficiente se observó entre CH y la máxima humedad relativa del aire. No se observó relación con la velocidad del viento. La radiación solar presentó correlación negativa con CH (tabla 3).

DISCUSIÓN

El CH promedio de las gramíneas y su variación está dentro del rango informado para ese tipo de combustibles en otros ecosistemas del mundo (Agee *et al.*, 2002; Groot *et al.*, 2005; Andrews *et al.*, 2006). La precipitación caída durante el período 2008-09 fue \approx 18% menor que el promedio histórico, lo cual podría ser una causa de la baja magnitud general en el CH promedio observado en los pastos nativos ubicados en áreas abiertas en comparación con *P. maximum*, implantado bajo cobertura arbórea la que es conservada en los rolados.

La mayor HS promedio en el sitio ecológico media loma sugiere que el mismo presentó la mayor disponibilidad de agua en el suelo a través del tiempo, hecho que contrasta con el menor CH promedio de las especies nativas con respecto a *P. maximum*. Ello se atribuye principalmente a diferencias en la estructura de la vegetación. Por una parte, el sitio media loma es un ambiente semiabierto, sin grandes masas de árboles y arbustos (isletas) que causen intercepción de la precipitación. Pero, por otra parte, está sometido a la acción directa de los vientos y de la insolación. Estos hechos favorecerían la rápida hidratación de tejidos como repuesta a la lluvia, pero también su desecación brusca. El efecto de la cobertura en la disminución del grado de secado de los pastos por sombreado y la menor velocidad del viento han sido citados en otros ecosistemas (Groot *et al.*, 2005).

La variación estacional de CH en gramíneas reflejó la distribución anual de las lluvias y temperatura: ausencia normal de precipitación durante casi 6 meses, desde el otoño a primavera temprana (mayo a septiembre), y luego lluvias con frecuencia y volumen variables en el tiempo durante el verano y parte del otoño. La amplitud de la oscilación estacional fue de mayor magnitud que la observada en árboles y arbustos nativos por Kunst *et al.* (2014a). Ello se atribuye a que las gramíneas captarían agua del horizonte superficial del suelo, desarrollándose activamente durante el verano y el otoño como repuesta a las condiciones climáticas que favorecen el crecimiento, y secándose rápidamente durante el invierno y la primavera (Pellizzaro *et al.*, 2006). La magnitud de los coeficientes de correlación y determinación entre CH y la función sinusoidal, similar a la registrada en otras especies vegetales, sugiere que el empleo de estas para su predicción podría ser factible (Catchpole *et al.*, 2001).

La magnitud del coeficiente de correlación (τ) y su significancia estadística entre el CH, la HS a las dos profundidades de suelo, la precipitación y la HR máxima y mínima en

las tres especies de gramíneas estudiadas fueron mayor a la informada por Kunst *et al.*, (2014a) en árboles y arbustos de la región chaqueña con las mismas variables. Esta fortaleza de la asociación entre el CH y las variables indicadores del ambiente climático sugiere una gran sensibilidad para identificar períodos de alta probabilidad de encendido entre y dentro de las estaciones climáticas. La HR máxima del aire parece ser la de mayor potencial indicador del CH en gramíneas.

El curado temprano observado (enero) se atribuye al aumento de carbohidratos estructurales (celulosa, lignina) en las gramíneas causado por el comienzo de la etapa fenológica de encañazón. La reproducción en gramíneas nativas y exóticas comienza tempranamente, entre fines de diciembre y principios de enero (Kunst *et al.*, 2001). El curado causado por muerte de tejidos por bajas temperaturas se estima que comenzaría recién cuando la temperatura del aire cae por debajo de los 10 °C, durante mayo, a mediados-fines de otoño.

Los pastos pueden encenderse y propagar el fuego con un CH menor a 28% (Williams *et al.*, 1998; Bilbao *et al.*, 2009; Govender *et al.*, 2006; Sullivan, 2010). En modelos de combustible compuestos por gramíneas, la longitud de llama promedio observada a nivel mundial es \geq 2-3 m, y el umbral de CH asociado con ese comportamiento varía entre \approx 5-12% (Williams *et al.*, 1998; Bilbao *et al.*, 2009; Govender *et al.*, 2006; Mc Donald y Mc Pherson, 2010). Kunst *et al.*, (2001, 2012) informan sobre la implementación de fuegos prescritos de media a alta intensidad (longitud de llamas > 3 m) en sabanas de *E. muticus* y parques de *Trichloris* y *Pappophorum* con un CH entre 16-20%. Durante 1992, el CH de las gramíneas del sitio ecológico bajo superó CH 5-10% y se mantuvo por debajo del umbral de extinción teórico, sugiriendo una baja probabilidad de encendido. En el período II, 2008-09, las gramíneas presentaron durante el invierno y primavera un CH promedio \leq 5-6%, cercano al umbral de comportamiento de fuego extremo en ese modelo de combustible (Mc Donald y Mc Pherson, 2010; Bianchi *et al.*, 2014).

Las quemas prescritas en la región chaqueña tienen como objetivo principal el control de especies arbustivas. La dinámica de CH de los combustibles finos sugiere que fuegos de mediana a baja intensidad son factibles a partir de mediados del invierno, mientras que los de alta intensidad a principios-mediados de primavera. Estas distintas alternativas deben ajustarse a la fenología de las leñosas para lograr resultados aceptables (Kunst *et al.*, 2001).

Los sitios ecológicos se diferencian entre sí por el tipo de suelos y la composición botánica de la vegetación (Kunst *et al.*, 2006). Las sabanas y parques de la región chaqueña, donde las gramíneas son dominantes (o aumentan su participación en la vegetación), se ubican en los sitios ecológicos bajo y media loma. En la práctica, y debido a la presencia de arbustales y bosques a sus costados con altura significativamente superior a los pastos, este paisaje canaliza el viento e incluso aumenta su velocidad actuando como túneles de viento, efecto que se incrementa cerca del

suelo. En las sabanas y parques el combustible es homogéneo en altura, está distribuido regularmente en el espacio y el CH se ubica, durante fines de invierno y principios de primavera, muy por debajo del umbral de extinción. Los resultados obtenidos confirman que las gramíneas nativas son el estrato vegetal por donde se inicia y/o se propaga inicialmente el fuego en la región chaqueña al igual que en otras regiones subtropicales (Hoffmann *et al.*, 2012). Ello sugiere que el fuego posee una frecuencia en el tiempo y espacio relativamente alta, hecho constatado mediante análisis de cicatrices de fuego (Bravo *et al.*, 2001).

La proclividad al fuego de la región chaqueña argentina se debería entonces en primer lugar a la coexistencia de modelos de combustible (sabanas, pastizales, arbustales y bosques). Este estudio sugiere además como otro factor ligado a la proclividad el CH por debajo del umbral de extinción durante la época más seca (transición entre invierno y primavera). Las condiciones meteorológicas apropiadas para el curado del combustible y de ignición necesarias coinciden prácticamente todos los años, una característica típica de las regiones subtropicales del hemisferio sur (Williams *et al.*, 1998). Regiones con climas que poseen larga estación seca y alternancia de épocas lluviosas y secas son proclives a fuegos de alta intensidad y severidad (Stott, 2000). Si a esto se suma la presencia de gramíneas en el paisaje, el fuego se transforma en un factor ecológico importante (Gill *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 1998; Hoffmann *et al.*, 2012).

El pastoreo bovino, al reducir las cargas de combustible fino, habría causado un cambio de régimen de fuego en áreas subhúmedas-semiáridas del mundo como la región chaqueña (Morello y Adámoli, 1974; Joubert *et al.*, 2012). En ese aspecto, este estudio sugiere que, al eliminar material semi-curado y promover nuevo crecimiento vegetativo, el pastoreo también puede cambiar la proporción de tejido seco/verde, aumentando el CH por encima del umbral de ignición e impidiendo la ocurrencia y/o el avance del fuego.

CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS PARA EL MANEJO

El CH es un indicador de la inflamabilidad de los combustibles y su dinámica puede emplearse para identificar épocas de aplicación de fuego prescripto y de peligro de fuego accidental. Las gramíneas, al presentar una gran variación del CH y fuerte asociación con variables ambientales, serían las de mayor valor indicador del peligro de fuego de las estaciones climáticas, resultado similar al encontrado en otros ecosistemas (Chuvienco *et al.*, 2004). Los resultados indican que la probabilidad de ignición es alta a partir de mayo debido al bajo CH y alto curado de los combustibles finos. Ello sugiere una larga temporada de fuego, desde principios de junio hasta la caída de las primeras lluvias usualmente en septiembre-octubre, con distintas implicancias ecológicas debido al estado fisiológico de leñosas y de pastos.

Este trabajo empleó una sola localidad de muestreo limitando la extrapolación espacial de la prevención del fuego a partir del CH, pero permitiendo avanzar en detalle sobre su

dinámica temporal. Este estudio sugiere, además, que la humedad relativa del aire máxima es la variable que posee mayor potencial como indicador indirecto del CH de los pastos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación estuvo financiada por el Proyecto FP6-018505 FIRE PARADOX *An innovative approach of integrated wildland fire management regulating the wildfire problema by the wise use of fire: solving the fire paradox*, European Union, 6th Framework, y por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Área Estratégica Forrajes y Pasturas, Proyecto Específico 1503 *Incremento de la productividad de pastizales naturales 2006-2009*. La Fundación ArgenINTA colaboró activamente en distintas etapas del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- AGEE, J. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest forests. Island Press, Covelo, California, p. 493.
- AGEE, J.; WRIGHT, C.; WILLIAMSON, N.; HUFF, M. 2002. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management* 67: 57-66.
- ALEXANDER, M. 1988. Help with making crown fire hazard assessments. Symposium and Workshop on Protecting People and Homes from Wildfire in the Interior West, Missoula, MT, p. 147-156.
- ANDERSON, H. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, UT 84401 General Technical Report INT-122.
- ANDERSON, H. 1986. Moisture and fine forest fuel response, p. 193-199. En: DONOGHUE, L.; MARTIN, R. Weather – The drive train connecting the solar engine to forest ecosystems. Proc. 8th. Conference on Fire and Forest Meteorology, Detroit, Michigan.
- ANDREWS, P.; ANDERSON, S.; ANDERSON, W. 2006. Evaluation of a dynamic load transfer function using grassland curing data. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41, p. 381 – 394.
- BAEZA, M.; DE LUIS M.; RAVENTÓS J.; ESCARRÉ, A. 2002. Factors influencing fire behavior in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. *Journal of Environmental Management* 65: 199-208.
- BIANCHI, L.; DEFOSSÉ, G. 1; DENTONI M., KUNST, C.; LEDESMA, R.; BRAVO, S. 2014. Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y el manejo de fuego en la región chaqueña occidental (Argentina) : conceptos básicos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 40 (2): 154-164.
- BILBAO, B.; LEAL, A.; MÉNDEZ, C.; DELGADO CARTAY, M. 2009. The role of fire in the vegetation dynamics of upland savannas of the Venezuelan Guayana. *Cap. 16, p. 451-480*. En: COCHRANE, M. *Tropical fire ecology*. Springer-Praxis, Berlin-Chichester, p. 645.
- BOLETTA, P. 1988. Clima. *Cap. 1, p. 7-21*. En: CASAS, R. (compilador): *Desmonte y habilitación de tierras en la región chaqueña semiárida*. FAO, Santiago, Chile, p. 306.
- BRAVO, S.; KUNST, C.; GIMÉNEZ, A.; MOGLIA, G. 2001. Fire regime of a *Elionorus muticus* Spreng. Savanna, western Chaco region, Argentina. *International Journal of Wildland Fire* 10: 1-8.
- BURKART, A. 1969. Flora ilustrada de Entre Ríos (Argentina): Parte II: Gramíneas. INTA Colección Científica Tomo VI, parte II, Buenos Aires, p. 551.

- CATCHPOLE, E.; CATCHPOLE, W.; VINEY, N.; MCCAW, W.; MARSDEN-SMEDLEY, J. 2001. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire* 10: 215-222.
- CHENEY, P.; SULLIVAN, A. 2008. Grassfires: fuel, weather and fire behavior. 2d. Edition, CSIRO, Australia, p. 160.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; DIMITRAKOPOULOS, P. 2004. Conversion of fuel moisture values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2284-2293.
- CHUVIECO, E.; GONZALEZ, I.; VERDÚ, F.; AGUADO, I. 2009. Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem. *International Journal of Wildland Fire* 18: 430-441.
- CIFFC (Canadian Interagency Forest Fire Centre). 2002. Glossary of forest fire management terms. http://www.env.gov.bc.ca/esd/fire_mgmt_gloss_2002.pdf. Verificado: 31 de agosto de 2014
- CONOVER, W. 1980. Practical nonparametric statistics. J. Wiley and Sons, N. Y., p. 494.
- CORNACCHIONE, M. 2008. Avances en gramíneas megatermicas. 1.º Seminario de la Ganadería Santiagueña. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_megatermicas/122-avances.pdf. Verificado: 19 de diciembre de 2013.
- DAVIES, G. M.; LEGG, C. 2011. Fuel moisture thresholds in the flammability of *Calluna vulgaris*. *Fire Technology* 47: 421-436.
- FISCHER, M.; DI BELLA, C.; JOBBAGY, E. 2012. Fire patterns in central semiarid Argentina. *Journal of Arid Environments* 78: 161-168.
- GILL, A.; MOORE, P.; WILLIAMS, R. 1996. Fire weather in the wet-dry tropics of the World Heritage Kakadu National Park, Australia. *Australian Journal of Ecology* 21: 302-308.
- GOVENDER, N.; TROLLOPE, W.; VAN WILGEN, B. 2006. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savanna vegetation in South Africa. *Journal of Applied Ecology* 43: 748-758.
- GROOT, W. de; WANG, W.; WANG, Y. 2005. Calibrating the fine fuel moisture code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire* 14: 161-168.
- HAMMER, Ø. 2013. PAST: Paleontological Statistics. Reference Manual. Universidad de Oslo. <http://folk.uio.no/ohammer/past>. Verificado: 03 de diciembre de 2013
- IVORY, D.; WHITEMAN, P. 1978. Effect of temperature on growth of five subtropical grasses: 1. Effect of day and night temperature on growth and morphological development. *Aus J Plant Phys* 5: 131-148.
- JOUBERT, D.; SMIT, G.; HOFFMAN, M. 2012. The role of fire in preventing transitions from a grass dominated state to a bush thickened state in arid savannas. *Journal of Arid Environments* 87: 1-7.
- KUNST, C.; BRAVO S.; MOSCOVICH F.; HERRERA J.; GODOY J.; VÉLEZ, S. 2001. Control de tusca (*Acacia aroma* Gill ap. H. et A.) mediante fuego prescripto. *Rev. Arg. Prod. Animal*. 20: 199-213.
- KUNST, C.; MONTI E.; PÉREZ H.; GODOY J. 2006a. Assessment of the rangelands of southwestern Santiago del Estero, Argentina for grazing management and research. *Journal of Environmental Management* 80: 248-265
- KUNST, C.; LEDESMA R.; CASILLO J.; GODOY J. 2006b. Rolados y residuos leñosos: II Dinámica del contenido de humedad de combustibles de origen leñoso. CIEFAP, Actas Ecofuego 217-219.
- KUNST, C.; LEDESMA, R.; BRAVO, S.; DEFOSSÉ, G.; GODOY J.; NAVARRETE, V. 2012. Comportamiento del fuego en un pastizal del sitio ecológico media loma, región chaqueña occidental. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 38: 70-76.
- KUNST, C.; LEDESMA, R.; BRAVO, S.; DEFOSSÉ, G.; GODOY J.; NAVARRETE, V. 2014a. Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y manejo de fuego, región chaqueña occidental (Argentina) II: follaje y residuos de árboles y arbustos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 40 (2): 165-180.
- KUNST, C.; LEDESMA, R.; CORNACCHIONE, M.; CASTAÑARES, M.; VAN MEER, H.; GODOY, J. 2014b. Yield and growth features of *Panicum maximum* (Jacq.) var *Trichoglume* cv Petrie (Green Panic) under woody cover, Chaco region, Argentina. *Agroforestry Systems* 88: 157-171.
- MCDONALD, C.; McPHERSON, G. 2011. Fire behavior characteristics of buffelgrass-fueled fires and native plant community composition in invaded patches. *Journal of Arid Environments* 75: 1147-1154.
- MORELLO, J.; ADÁMOLI, J. 1974. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. 2.ª Parte: Vegetación y ambientes de la pcia. del Chaco. INTA Serie Fitogeográfica N.º 13, Buenos Aires.
- MORELLO, J.; SARAVIA TOLEDO, C. 1959. El bosque chaqueño I y II. *Rev. Agronómica del Noroeste Argentino*, 3: 5-81/209-258.
- PELLIZZARO, G.; CESARACCIO, C.; DUCE, P.; VENTURA, A.; ZARA, P. 2006. Influence of seasonal weather variations and vegetative cycle on live moisture content and ignitability in Mediterranean maquis species. *Forest Ecology and Management* 234 S-S111.
- ROTHERMEL, R. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-143.
- RUIZ GONZALEZ, A. 2004. La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a las masas arboladas de Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. En: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/prediccion-humedad-restos-forestales-combustibles-aplicacion-masas-arboladas-galicia/id/34395554.html. Verificado: 13 de marzo de 2014.
- SAS. 1998. Release 6.12 Edition. SAS Institute Inc. Cary, N. C.
- SCHROEDER, M.; BUCK, C. 1970. Fire weather. US Dept. of Agriculture, Agriculture Handbook N.º 70, p. 230.
- STOTT, P. 2000. Combustion in tropical biomass fires: a critical review. *Progress in Physical Geography* 24: 355-377.
- SULLIVAN, A. 2010. Grassland fire management in future climate. Cap. 5, p. 173-208. *Advances in Agronomy* 106. Elsevier.
- SUN, L.; ZHOU, X.; MAHALINGHAM, S.; WEISE, D. 2006. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels. *Combustion and Flame* 144: 349-359.
- WILLIAMS, R.; GILL, A.; MOORE, P. 1998. Seasonal changes in fire behavior in a tropical savanna in northern Australia. *International Journal of Wildland Fire* 8: 227-239.
- WITTICH, K. 2011. Phenological observations of grass curing in Germany. *International Journal of Biometeorology* 55: 313-318.
- ZAR, J. 1999. Biostatistical analysis. 4th Edition, Prentice Hall, N. J.