

Comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador

Marcos Pedro Ramos Rodríguez¹, Orlando Gabriel Pico Coronel², Alfredo Jimenez González³, Cristóbal Gonzalo Cantos Cevallos³, Mónica Virginia Tapia Zúñiga³, Otto Francisco Mero Jalca³

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador. E-mail: marcos.ramos@unesum.edu.ec (ORCID: 0000-0003-0992-8414)

² Profesional Autónomo, Jipijapa, Manabí, Ecuador. E-mail: orlandopc_2995@hotmail.com (ORCID: 0000-0002-5917-4801)

³ Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador. E-mail: alfredo.jimenez@unesum.edu.ec (ORCID: 0000-0002-1768-5566); gonzalo.cantos@unesum.edu.ec (ORCID: 0000-0002-5560-2637); monica.tapia@unesum.edu.ec (ORCID: 0000-0002-5591-3603); otto.mero@unesum.edu.ec (ORCID: 0000-0001-6995-9971)

RESUMEN: La reducción de la cantidad de combustible depositado en el piso del bosque permite disminuir las ocurrencias y la propagación del fuego. Una técnica que puede ser utilizada para lograr esto, es el uso del fuego. Este trabajo tuvo el objetivo de analizar el comportamiento del fuego, a escala experimental, en una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Fueron delimitadas 10 parcelas de 2 x 5 m en las que se aplicó el fuego utilizando la técnica de quema a favor del viento. Durante el desarrollo del experimento fueron medidas la velocidad del viento y la humedad relativa del aire a 0,50 m de altura del suelo y a 1 m de distancia del extremo de la parcela por donde se inició el fuego. El material combustible se caracterizó a través de las variables peso, espesura y contenido de humedad antes y después de la quema. Los parámetros del comportamiento del fuego considerados fueron velocidad de propagación, altura de las llamas, intensidad lineal del fuego, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área. También se determinó la relación existente entre las variables utilizadas en el experimento. Los valores medios obtenidos para las variables cantidad de material combustible, profundidad de quema, altura de las llamas, velocidad de propagación del fuego e intensidad lineal fueron 0,46 kg m⁻²; 0,58 cm; 0,57 m; 0,0101 m s⁻¹ y 16,49 kcal m⁻¹ s⁻¹, respectivamente.

Palabras clave: quema prescrita; reducción de combustible; prevención; incendios forestales

Fire behavior at an experimental scale in a plantation of *Tectona grandis* L.f. in Jipijapa, Manabí, Ecuador

ABSTRACT: The reduction of the fuel load deposited in the forest floor allows decrease the occurrences and the propagation of the fire. One technique that can be used to achieve this is the use of fire. The objective of this work was to analyze the behavior of fire on an experimental scale in a plantation of *Tectona grandis* L.f. in Jipijapa, Manabí, Ecuador. Ten plots of 2 x 5 m were delimited in which the fire was applied using the headfire technique. During the development of the experiment was measured the wind speed and the relative humidity of the air at 0.50 m height of the ground and 1 m away from the end of the plot where the fire started. Was characterized the fuel through the variables load, depth and moisture content before and after burning. The parameters of fire behavior considered were rate of spread, flame height, fire-line intensity, scorch heights and heat per unit area. The relationship between the variables used in the experiment was also determined. The average values obtained for the variables fuel load, burning depth, flame height, rate of spread and fire-line intensity were 0.46 kg m⁻²; 0.58 cm; 0.57 m; 0.0101 m s⁻¹ and 16.49 kcal m⁻¹ s⁻¹, respectively.

Key words: prescribed burning; fuel reduction; prevention; forest fires

Introducción

Los incendios forestales o de la cobertura vegetal se dan en casi todos los ecosistemas del mundo, aunque con diferentes regímenes. La mayor actividad de incendios se da en zonas tropicales y subtropicales con elevada productividad y elevada estacionalidad (Pausas, 2012). Durante el pasado año 2017 se desarrollaron incendios forestales catastróficos en Chile, Estados Unidos, Portugal y España. También en otros países se reportaron incendios de menores dimensiones. Afortunadamente en la actualidad (Parra-Lara & Bernal-Toro, 2011) hay una mayor comprensión de los incendios de la cobertura vegetal como un problema multicausal y de impactos multidimensionales y sobre sus estrechas relaciones con los procesos de cambio climático global y desertificación.

Los incendios forestales constituyen uno de los principales agentes de perturbación de los ecosistemas del planeta, donde millones de hectáreas son afectadas cada año. La elevada presión de las actividades humanas y el calentamiento global están incrementando la frecuencia, intensidad y tamaño de estos incendios, con importantes consecuencias tanto para las comunidades naturales como para la sociedad en su conjunto. Los incendios son eventos adversos con costos tangibles para la propiedad y la vida humana (Martin et al., 2016).

La acumulación de material combustible sobre el piso de los bosques a lo largo de los años aumenta drásticamente el riesgo de incendios. Lydersen et al. (2017), estudiando la influencia relativa de los tratamientos de combustibles previos (incluidos los incendios forestales), el clima de incendios, la vegetación y el equilibrio hídrico en la intensidad del fuego en el *Rim Fire* de 2013, California, encontraron que tanto los tratamientos con combustibles como los incendios forestales anteriores de severidad baja a moderada redujeron la prevalencia de incendios de alta severidad.

Una de las alternativas para disminuir el riesgo o disminuir el potencial de daños, es reducir periódicamente la cantidad de material combustible en el interior de los rodales mediante el uso del fuego. Según Castellnou et al. (2010), el fuego prescrito se utiliza principalmente como herramienta en la prevención activa y pasiva de incendios donde las operaciones de quemaduras prescritas se basan en el uso de fuegos de baja intensidad que apuntan a reducir las cargas de combustible y reducir así los riesgos de los incendios de alta intensidad.

La *Tectona grandis* L.f. es una de las especies forestales más importantes del comercio. De acuerdo con Blanco-Flórez et al. (2014), esta especie es considerada una de las maderas más valiosas debido a sus excelentes propiedades físicas y estéticas. Presenta alta demanda para usos específicos, como construcción y revestimiento de embarcaciones, fabricación de muebles y objetos lujosos.

Tanto en el Cantón Jipijapa como en la provincia de Manabí y otras de la República del Ecuador, los productores de madera de *T. grandis* tienen por costumbre quemar el material combustible existente bajo el dosel del bosque. Esta práctica se sustenta en las ideas de que con la quema

aumenta la belleza de la madera, se favorece el incremento de las plantas y se limpia con facilidad el área. Sean estas ideas, mitos o realidades, lo cierto es que todos los años se utiliza el fuego en los rodales de esta especie, alcanzando en algunos casos un comportamiento no deseado que pone en peligro el desarrollo adecuado de los árboles, lo cual ocurre también cuando en ocasiones, el fuego llega a estos rodales proveniente de las áreas agrícolas colindantes.

Relacionado con lo anterior la FAO (2007) plantea que en la Reserva de Bosque de Teca de Kalahari Sand en el oeste de Zimbabwe, los primeros guardabosques (inicios de la década de 1920) observaron que los incendios dañaron un gran porcentaje de árboles en estos bosques. Gran parte de la madera cosechada mostraba serias fallas y defectos relacionados con el fuego. En 1925 en su reporte anual sobre los daños del fuego en los bosques de teca de Kalahari Sand, Kelly Edwards atribuyó las causas del fuego a la superstición y la práctica tradicional de quemaduras anuales para mejorar el pastoreo y la recolección de miel, particularmente durante los momentos de hambre. Los agricultores también causaron incendios forestales durante las actividades de preparación de tierras agrícolas. Los incendios también se originaron para enlodar el juego y se hicieron fuegos para complacer a los dioses de la lluvia, especialmente cuando la sequía amenazaba. Entre 1931 y 1970 se practicó una quema extensiva temprana en la estación seca con el objetivo de proteger rodales de teca joven de buen crecimiento. Si bien la protección completa contra incendios no fue exitosa, la quema temprana fue abandonada en la década de 1970 y actualmente las principales actividades de protección contra incendios son la vigilancia de los puestos de bomberos y la lucha contra incendios.

Durante las últimas cuatro décadas se ha realizado una cantidad apreciable de investigaciones sobre el comportamiento del fuego en diferentes tipos de vegetación. Algunas de las más recientes en bosques de *Pinus* sp. han sido las desarrolladas por Batista et al. (2013), Cerano-Paredes et al. (2015), Cerano-Paredes et al. (2016) y Battipaglia et al. (2016). En otras especies y tipos de vegetación pueden citarse a White et al. (2014) en *Araucaria angustifolia*; Seger et al. (2013) en vegetación de estepa; y Romero-Mieres et al. (2014) en bosques siempre verdes. En el caso de *T. grandis*, Ramos et al. (2018), reportaron los resultados de la planificación de una quema prescrita en una plantación de la especie mencionada.

Considerando la importancia de contar con criterios científicos según los cuales se pueda continuar utilizando el fuego de forma segura en las plantaciones de *T. grandis* con fines de prevención de incendios o para satisfacer determinadas costumbres, el objetivo de este trabajo fue analizar el comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *T. grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Los resultados podrían ser utilizados por los gestores para conocer la ventana de prescripción óptima para la reducción de combustible requerida en estas plantaciones.

Material y Métodos

Caracterización del área experimental

El trabajo se realizó en una plantación de *T. grandis* ubicada en el Cantón Jipijapa, provincia de Manabí, Ecuador (Figura 1). El clima predominante de Jipijapa es cálido seco en la zona oeste y cálido húmedo con temporadas secas en la zona este, con una temperatura media de 25 °C, afectada por la presencia de dos estaciones: invierno (mayo a octubre) y verano (noviembre a abril). Los valores más altos de humedad y temperatura se registran en el mes de marzo, donde se alcanza una temperatura media del aire de 28 °C. La precipitación promedio anual es de 670 mm, concentrándose la mayor cantidad entre los meses de febrero y marzo. La altitud del sitio es de 320 msnm.

La vegetación herbácea y arbustiva en el área objeto de estudio era poca, compuesta por hierbas y arbustos aislados de menos de un metro de altura. El estrato arbóreo estaba formado por individuos de *T. grandis* con valores medios de diámetro a 1,30 m y de altura de 16,87 cm y de 9,95 m, respectivamente, con una altura promedio de fuste sin ramas de 6,04 m (Figura 2). El modelo de combustible, de acuerdo a la modelación Cuba 19 (Ramos et al. 2012) es HCL2 que corresponde al grupo de Hojarasca con Combustibles Leñosos (HCL). En este modelo es difícil la transición del fuego a la copa y el mismo se propaga por una capa de hojarasca compacta de especies de latifolias, con presencia continua de combustible leñoso o herbáceo muerto. La profundidad del complejo hojarasca-restos es mayor a 15 cm.



Figura 2. Aspecto general de la plantación de *T. grandis* y delimitación de las parcelas de quema.

Delimitación del área experimental y colecta de datos

Fueron delimitadas 10 parcelas de 2 x 5 m haciendo un área total de 100 m² en la que se aplicó el fuego utilizando la técnica de quema a favor del viento. No obstante, esta variable fue muy inestable debido a cambios repentinos de dirección, comprobándose una vez más las dificultades que se presentan cuando se desarrollan estos experimentos en condiciones naturales. El terreno era llano. Las parcelas se ubicaron una a continuación de la otra entre las dos líneas de

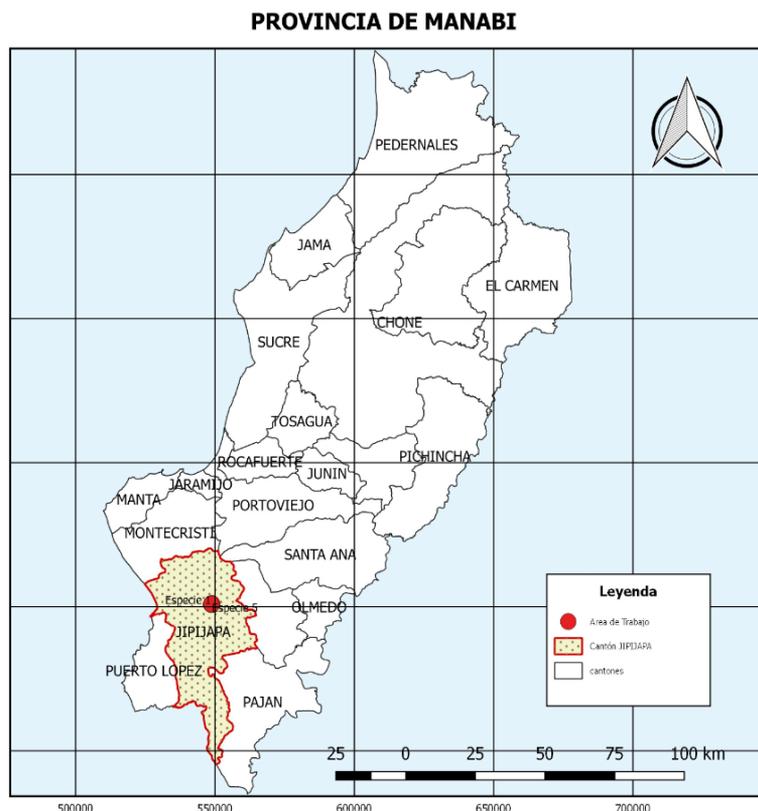


Figura 1. Ubicación del área experimental.



plantación centrales del rodal. Alrededor del área a quemar se construyó un cortafuego de 1 m de ancho para evitar que el fuego pasara al área externa del tratamiento (Figura 3). Para facilitar el inicio del fuego se colocaron fragmentos de papel periódico debajo del combustible situado en el lugar por donde se inició el fuego.

La quema aplicada fue superficial y se realizó el 25 de noviembre de 2017, 31 días después de la última lluvia superior a 10 mm ocurrida en el área, la cual fue de 36 mm. El experimento se inició a las 11:45 horas y terminó a las 13:32 horas, para una duración de una hora y 47 minutos entre el inicio de la primera parcela y la extinción total de la última, con una variación del tiempo de quema entre las parcelas de 5 a 11 minutos.

Durante el desarrollo del experimento fueron medidas la velocidad del viento y la humedad relativa del aire con ayuda de un medidor meteorológico digital (Kestrel 3500 *Pocket Weather Station*) a 0,50 m de altura del suelo y a 1 m de distancia del extremo de la parcela por donde se inició el fuego. También se midió la dirección del viento con una brújula.



Figura 3. Ubicación y delimitación de las parcelas de quema en la plantación de *T. grandis*.

Caracterización de los combustibles

Para caracterizar el material combustible se obtuvieron informaciones sobre peso, espesura de la capa de combustible depositado sobre el suelo y contenido de humedad. La determinación del peso o carga de material combustible o materia seca, antes y después de la quema, se basó en el método destructivo propuesto por Brown et al. (1982). De acuerdo con esto en el centro de cada parcela se colectó una muestra de 2 500 cm² antes y después de la quema, delimitada por un cuadro de madera de 50 x 50 cm, de cuyo interior se retiró todo el material. El material colectado en cada caso fue colocado en fundas de nailon y pesado con balanza de gancho de 0,01 g de precisión. Posteriormente se colocó en estufa a 75°

hasta alcanzar peso constante. La diferencia observada entre la cantidad de combustible seco antes (combustible total) y después de la quema (combustible residual) proporcionó la cantidad de material consumido por el fuego (combustible disponible). Con los mismos datos se determinó también la variable consumo de combustible (ConsC) utilizando la Ecuación 1 (Amaral et al., 2014) modificada.

$$\text{ConsC} = \frac{m_{i\text{ comb}} - m_{f\text{ comb}}}{m_{i\text{ comb}}} \times 100 \quad (1)$$

donde *ConsC*: Consumo de combustible (%); $m_{i\text{ comb}}$: masa inicial de combustible seco (kg); $m_{f\text{ comb}}$: masa residual de combustible seco (kg).

La espesura de la capa de combustible depositado sobre el suelo se determinó a través de tres mediciones realizadas en los extremos y en el centro de cada parcela. Después de la quema se midió nuevamente la espesura del material que no fue consumido (material residual). La diferencia entre la espesura de la capa antes y después de la quema permitió estimar la variable profundidad de la quema (PQ).

La humedad de los combustibles el día de la quema fue determinada a través de la Ecuación 2 (Soares et al., 2017).

$$U\% = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (2)$$

donde *U%*: Humedad del material combustible (%); *MU*: Masa húmeda (kg); *MS*: Masa seca (kg).

Evaluación de parámetros del comportamiento del fuego

La evaluación del comportamiento del fuego durante el experimento se basó en la medición de los parámetros altura de las llamas, velocidad de propagación del fuego, intensidad lineal del fuego, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área. La altura de las llamas se midió en cada parcela con una baliza graduada a los 2 y 4 m del extremo por donde se inició la quema, es decir, dos mediciones en cada parcela, mientras que la velocidad de propagación del fuego fue calculada midiendo el tiempo utilizado por el fuego para recorrer los 5 m de cada parcela (m s⁻¹) considerando esto cuando el 50 % de la línea de fuego llegaba al final de la parcela.

La intensidad lineal del fuego (Byram, 1959), la altura de secado letal (Van Wagner, 1973) y el calor desprendido por unidad de área (Soares et al., 2017) se estimaron a través de las Ecuaciones 3, 4 y 5, respectivamente.

$$I = H \times w \times r \quad (3)$$

$$h_s = \frac{3,94 \cdot I^{7/6}}{(0,107 \cdot I + V^3)^{1/2} (60 - T)} \quad (4)$$

$$Ha = \frac{I}{r} \quad (5)$$

donde I : intensidad lineal del fuego ($\text{kcal m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$); H : calor de combustión (kcal kg^{-1}) ($\pm 4000 \text{ kcal kg}^{-1}$); w : peso del combustible disponible (kg m^{-2}); r : velocidad de propagación del fuego (m s^{-1}); h_s : altura de secado letal (m); V : velocidad el viento (m s^{-1}); T : temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); Ha : calor liberado por unidad de área (kcal m^{-2}). La constante 60, asociada a la temperatura del aire, representa aproximadamente la temperatura letal del follaje de los árboles.

El calor de combustión del material húmedo se calculó a través de la Ecuación 6 (Countryman, 1977). Se consideró un calor de combustión seco de $4\,000 \text{ kcal kg}^{-1}$ ($16\,720 \text{ kJ kg}^{-1}$) el cual han utilizado varios autores, entre ellos, Ramos et al. (2018).

$$Hw = Hd \left(\frac{100 - \frac{U}{7}}{100 + U} \right) \quad (6)$$

donde Hw : Calor de combustión del material húmedo; Hd : Calor de combustión del material seco; U : contenido de humedad del material combustible (%).

En la Tabla 1 se presentan y describen las variables utilizadas en el experimento relacionadas con el comportamiento del fuego, las condiciones meteorológicas y el material combustible.

Tabla 1. Variables utilizadas en la quema experimental.

Variables	Descripción	Unidad
Hll	Altura de las llamas	cm
Vpf	Velocidad de propagación del fuego	m s^{-1}
I	Intensidad lineal del fuego	$\text{kcal m}^{-1}\text{s}^{-1}$
hs	Altura de secado letal	m
Ha	Calor liberado por unidad de área	kcal m^{-2}
T	Temperatura del aire	$^{\circ}\text{C}$
Hr	Humedad relativa	%
Vv	Velocidad del viento	m s^{-1}
PcA	Peso del material combustible seco antes de la quema	kg m^{-2}
PcD	Peso del material combustible seco después de la quema	kg m^{-2}
PcC	Peso de material combustible consumido por el fuego	kg m^{-2}
ConsC	Consumo de combustibles	%
EspA	Espesura de la capa de combustible antes de la quema	cm
EspD	Espesura de la capa de combustible después de la quema	cm
PQ	Profundidad de la quema	cm
Hcom	Humedad de los combustibles el día de la quema	%

Correlación entre variables

Para determinar la relación entre las variables analizadas se utilizaron los valores medios correspondientes a cada parcela de quema. De acuerdo con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks se obtuvo que las variables humedad de los combustibles y velocidad de propagación del fuego no tenían

una distribución normal ($p < 0,05$), por lo que se determinó el coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman, considerando una probabilidad de significación del 5 %, como medida de la relación. La interpretación de los valores de la correlación fue hecha de acuerdo con la propuesta de Bisquerra (2004), la cual se muestra en la Tabla 2.

Considerando los valores obtenidos para la relación entre la intensidad lineal del fuego y su velocidad de propagación con la altura de las llamas, se realizó un análisis de regresión para lo cual se transformaron los datos de la velocidad de propagación para cumplir con el supuesto de normalidad de estos, necesario para este tipo de análisis.

Tabla 2. Interpretación de los valores de las correlaciones de Spearman.

Valor de r	Interpretación
0,00	Nula
0,01 – 0,19	Muy baja
0,20 – 0,39	Baja
0,40 – 0,59	Moderada
0,60 – 0,79	Alta
0,80 – 0,99	Muy alta
1,00	Perfecta

Resultados y Discusión

Condiciones meteorológicas y características de los combustibles

Las condiciones meteorológicas relacionadas con el experimento de quema se muestran en la Tabla 3. Se observa poca variabilidad de los valores de las variables temperatura del aire y humedad relativa, expresado esto en los bajos valores del coeficiente de variación. Este comportamiento fue diferente para el caso de la velocidad y la dirección del viento.

La Tabla 4 muestra los valores referentes a las características del combustible antes y después de la quema. En sentido general el coeficiente de variación obtenido expresa poca variabilidad de los valores correspondientes a todas las variables en las diferentes parcelas experimentales.

Tabla 3. Condiciones meteorológicas el día de la quema en cada parcela.

Parcelas	T ($^{\circ}\text{C}$)	Hr (%)	Vv (m s^{-1})	Dv (Grados)
1	30,30	60,00	0,60	340
2	30,60	63,00	0,90	180
3	28,20	68,00	0,50	180
4	31,70	65,00	0,40	180
5	29,40	76,00	0,30	340
6	31,80	62,00	0,40	200
7	27,00	77,00	1,10	200
8	30,70	61,00	0,50	160
9	29,20	69,00	1,10	320
10	30,50	56,00	1,40	20
Media	29,94	65,70	0,72	212
CV	0,0504	0,1040	0,5230	0,4647

Nota: T: Temperatura del aire; Hr: Humedad relativa; Vv: Velocidad del viento; Dv: Dirección del viento; CV: Coeficiente de variación

Tabla 4. Características del combustible antes y después de la quema en cada parcela.

Parcelas	PcA	PcD	PcC	ConsC	EspA	EspD	PQ	Hcom
	(kg m ⁻²)			(%)	(cm)		(%)	
1	0,54	0,08	0,46	84,40	13,33	5,50	7,83	10,58
2	0,50	0,13	0,37	74,29	14,33	6,67	7,67	11,87
3	0,72	0,13	0,59	81,92	15,33	6,17	9,17	10,44
4	0,58	0,11	0,47	81,38	16,33	5,17	11,17	10,11
5	0,54	0,07	0,47	87,41	13,67	5,83	7,83	11,52
6	0,57	0,09	0,48	84,22	16,67	6,67	10,00	11,60
7	0,54	0,21	0,33	61,27	12,00	6,00	6,00	11,73
8	0,62	0,08	0,53	86,71	14,00	3,33	10,67	10,37
9	0,50	0,12	0,38	75,52	13,33	5,33	8,00	11,98
10	0,68	0,13	0,55	80,29	13,33	5,83	7,50	11,78
Media	0,58	0,12	0,46	79,74	14,23	5,65	8,58	11,20
CV	0,1273	0,3532	0,1790	0,0976	0,1030	0,1697	0,1885	0,0651

Nota: PcA: Peso del material combustible seco antes de la quema; PcD: Peso del material combustible seco después de la quema; PcC: Peso de material combustible consumido por el fuego; ConsC: Consumo de combustibles; EspA: Espesura de la capa de combustible antes de la quema; EspD: Espesura de la capa de combustible después de la quema; PQ: Profundidad de la quema; Hcom: Humedad de los combustibles el día de la quema; CV: Coeficiente de variación

Parámetros del comportamiento del fuego

El calor de combustión húmedo obtenido en cada parcela osciló entre 3 155,99 y 3 659,48 kcal kg⁻¹ (13 213,55 y 15 321,57 kJ kg⁻¹). Batista et al. (2013), utilizaron en quemas experimentales en *Pinus elliottii* un valor medio de H = 15 490 kJ kg⁻¹ de acuerdo a determinaciones hechas por Soares & Hakkila (1987). Londe de Camargos et al. (2015), determinaron valores de poder calorífico seco entre 4 093 y 4 623 kcal kg⁻¹ (17 136,63 y 19 355,65 kJ kg⁻¹) en un bosque estacional semidesiduo.

Los valores obtenidos para los parámetros del comportamiento del fuego evaluados en el experimento de quemas se muestran en la Tabla 5. Se observan valores medios para los parámetros altura media de las llamas, velocidad de propagación del fuego, intensidad lineal, altura de secado letal y calor desprendido por unidad de área de 0,57 m; 0,0101 m s⁻¹; 16,49 kcal m⁻¹ s⁻¹; 2,27 m y 1 642,33 kcal m⁻², respectivamente, mostrando todos los parámetros bajos coeficientes de variación. Las alturas de secado letal estimadas en cada parcela de quema muestran valores entre 1,21 y 2,84 m los cuales son inferiores a la altura promedio del fuste sin ramas de los árboles, lo cual indica que el calor no afectará a las ramas inferiores de los mismos.

Los resultados son similares a los reportados por Ramos et al. (2018) para las prescripciones de intervalos de las variables del comportamiento del fuego en un rodal de *T. grandis*. Estos autores prescribieron para la altura de las llamas valores entre 0,54 y 0,76 m; para la velocidad de propagación del fuego entre 0,016 y 0,033 m s⁻¹; para la intensidad lineal entre 16,43 y 33,89 kcal m⁻¹ s⁻¹; y para la altura de secado letal entre 1,38 y 4,20 m.

Weise et al. (2016) utilizando una cama de combustibles procedentes de un chaparral natural en laboratorio obtuvieron una longitud de la llama entre 0,54 y 2,80 m con un coeficiente de variación promedio del 11 %. También se observó un consumo completo de la cama de combustibles y una intensidad lineal del fuego entre 68 y 2 297 kw.m⁻¹ (16,25 y 549,11 kcal m⁻¹ s⁻¹).

Análisis de correlación

La relación entre las características del comportamiento del fuego y su asociación con las propiedades de los combustibles y las condiciones meteorológicas se muestra en la Tabla 6. Se observa que las relaciones lineales significativas ($p < 0,05$) se manifestaron por lo general solo entre variables del comportamiento del fuego y no entre estas y variables

Tabla 5. Valores de los parámetros del comportamiento del fuego en cada parcela de quema.

Parcelas	Hll (m)	Vpf (m s ⁻¹)	I		hs (m)	Ha (kcal m ⁻²)
			(kcal m ⁻¹ s ⁻¹)	(kw m ⁻¹)		
1	0,56	0,0093	15,11	63,21	2,33	1631,56
2	0,41	0,0076	9,90	41,41	1,45	1307,34
3	0,67	0,0119	25,21	105,46	3,18	2117,39
4	0,86	0,0104	17,64	73,79	2,84	1693,37
5	0,57	0,0093	15,36	64,25	2,41	1659,00
6	0,36	0,0076	12,90	53,96	2,30	1702,49
7	0,52	0,0093	10,72	44,84	1,21	1158,14
8	0,47	0,0083	15,90	66,51	2,51	1907,51
9	0,73	0,0167	22,10	92,45	2,46	1326,05
10	0,51	0,0104	20,01	83,70	1,99	1920,49
Media	0,57	0,0101	16,49	68,96	2,27	1642,33
CV	0,2669	0,2659	0,2960	0,3264	0,2606	0,1845

Nota: Hll: Altura de las llamas; Vpf: Velocidad de propagación del fuego; I: Intensidad lineal del fuego; hs: Altura de secado letal; Ha: Calor liberado por unidad de área; CV: Coeficiente de variación

Tabla 6. Matriz de correlación entre las variables utilizadas en los análisis.

	Hll	Vpf	I	hs	Ha	T	Hr	Vv	PcC	PQ	Hcom
Hll	1,000										
Vpf	0,840**	1,000									
I	0,636*	0,852**	1,000								
hs	0,624	0,500	0,745*	1,000							
Ha	-0,006	0,216	0,636*	0,564	1,000						
T	-0,418	-0,525	-0,212	0,067	0,285	1,000					
Hr	0,455	0,253	-0,030	0,055	-0,467	-0,600	1,000				
Vv	-0,116	0,274	0,049	-0,502	-0,269	-0,404	-0,165	1,000			
PcC	-0,024	0,201	0,626	0,547	0,997**	0,255	-0,450	-0,279	1,000		
PQ	0,243	0,050	0,377	0,802**	0,474	0,559	-0,122	-0,656*	0,442	1,000	
Hcom	-0,273	0,006	-0,212	-0,661*	-0,491	-0,285	0,127	0,661*	-0,468	-0,669*	1,000

Nota: Hll: Altura de las llamas; Vpf: Velocidad de propagación del fuego; I: Intensidad lineal del fuego; hs: Altura de secado letal; Ha: Calor liberado por unidad de área; T: Temperatura del aire; Hr: Humedad relativa; Vv: Velocidad del viento; PcC: Peso de material combustible consumido por el fuego; PQ: Profundidad de la quema; Hcom: Humedad de los combustibles el día de la quema.

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

meteorológicas y de los combustibles. La asociación entre la altura de las llamas y la intensidad lineal del fuego fue significativa ($r = 0,636$; $p = 0,048$). Resultado similar se obtuvo para la relación entre la altura de las llamas y la velocidad de propagación del fuego ($r = 0,840$; $p = 0,002$). Cheney et al. (2012) obtuvieron que estas dos variables se correlacionaron razonablemente en bosques secos de eucaliptos en Australia. También se obtuvo correlación significativa entre la intensidad lineal del fuego y su velocidad de propagación ($r = 0,852$; $p = 0,002$).

La altura de secado letal presentó relación significativa con la profundidad de la quema y la humedad de los combustibles el día de la quema con $p = 0,005$ y $p = 0,038$, respectivamente. La no relación de la velocidad del viento con las variables del comportamiento del fuego puede explicarse por el comportamiento errático del mismo caracterizado por cambios continuos de dirección y de velocidad durante la quema de las parcelas. Esta es una de las dificultades verificadas normalmente cuando se realizan experimentos de quema en ambiente abierto. También se obtuvo una correlación significativa entre el peso del material combustible consumido por el fuego y el calor liberado por unidad de área ($p = 0,000$). Weise et al. (2016) encontraron una fuerte relación entre la tasa de pérdida de masa y la longitud de la llama en camas de combustible vivo tipo chaparral a escala experimental.

En un estudio realizado por Batista et al. (2013) sobre estimación del comportamiento del fuego en quemas experimentales bajo plantaciones de *Pinus elliotii*, obtuvieron las mayores correlaciones para el caso de las variables del comportamiento del fuego entre la altura de las llamas y la velocidad de propagación del fuego, seguida de la correlación entre la intensidad y la altura de las llamas. También obtuvieron alta correlación entre la intensidad lineal y las variables material consumido por el fuego y velocidad de propagación.

Los análisis de regresión realizados (Figura 4), entre a altura de las llamas y las variables intensidad lineal del fuego y velocidad de propagación, muestran una relación positiva,

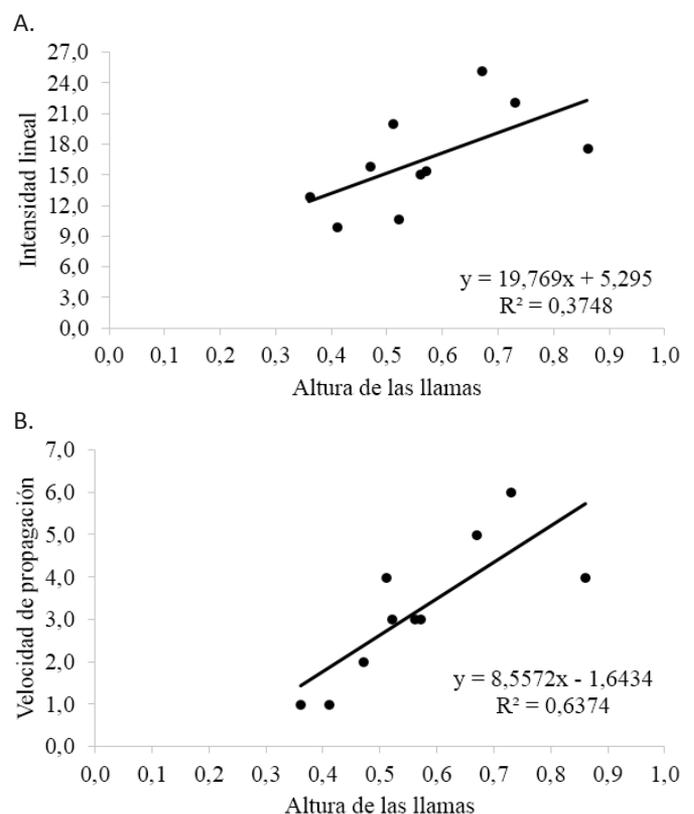


Figura 4. Análisis de regresión realizado entre la altura de las llamas y la intensidad del fuego (A) y entre la altura de las llamas y la velocidad de propagación (B).

pudiéndose utilizar las ecuaciones obtenidas para modificar el patrón de ignición en caso necesario a partir de considerar la altura de las llamas, parámetro que puede ser identificado *in situ* a tiempo real.

Conclusiones

El análisis del comportamiento del fuego a escala experimental en plantaciones de *T. grandis* tuvo las dificultades que imponen el ambiente natural abierto, fundamentalmente la influencia de las variables velocidad y dirección del viento.

No obstante, se ha contribuido a la argumentación del uso del fuego en plantaciones de la especie objeto de estudio.

Los valores del comportamiento del fuego observados en esta investigación son importantes para fundamentar el uso del fuego en plantaciones de *T. grandis*. De forma general se obtuvieron correlaciones significativas entre las variables del comportamiento del fuego, pero no entre estas y las que describen el material combustible y las condiciones meteorológicas. No obstante, las correlaciones fueron altas tanto entre la profundidad de la quema y la altura de secado letal como entre el peso del material combustible consumido por el fuego y el calor desprendido por unidad de área.

A partir de los resultados obtenidos para la relación de la variable altura de las llamas con la intensidad y velocidad de propagación, se obtuvieron modelos de regresión que pueden ser utilizados en la práctica para modificar el patrón de ignición si fuera necesario.

Literatura Citada

- Amaral, S.S.; Carvalho Junior, J.A. de; Costa, M.A.M.; Neto, T.G.S.; Dellani, R.; Leite, L.H.S. (2014). Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions. *Bioresource Technology*, v.164, p.55-63. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.060>.
- Batista, A.C.; Beutling, A.; Pereira, J.F. Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliottii*. *Revista Árvore*, v.37, n.5, p.779-787, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500001>.
- Battipaglia, G.; Savi, T.; Ascoli, D.; Castagneri, D.; Esposito, A.; Mayr, S.; Nardini, A. Effects of prescribed burning on ecophysiological, anatomical and stem hydraulic properties in *Pinus pinea* L. *Tree Physiology*, v.36, n.8, p.1-13. 2016. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw034>.
- Bisquerra, R. Metodología de la investigación educativa. Madrid: Editorial La Muralla. 2004.
- Blanco-Flórez, J.; Fernando-Trugilho, P.; Tarcisio-Lima, J.; Gherardi-Hein, P.R.; Moreira da Silva, J. R. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y Bosques*, v.20, n.1, p.11-20. 2014. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100002. 06 Feb. 2018.
- Brown, J.K.; Oberheu, R.D.; Johnston, C.M. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. 22p. (General Technical Report, INT-129). https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr129.pdf. 10 Feb. 2018.
- Byram, G.M. Combustion of forest fuel. In: Davis, K.P. (ED.). *Forest fire: control and use*. New York: Mc Graw Hill, 1959. p.61-89.
- Cerano-Paredes, J.; Villanueva-Díaz, J.; Cervantes-Martínez, R.; Fulé, P.; Yocom, L.; Esquivel-Arriaga, G.; Jardel-Peláez, E. Historia de incendios en un bosque de pino de la sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque*, v.36, n.1, p.41-52, 2015. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000100005>.
- Cerano-Paredes, J.; Villanueva-Díaz, J.; Vázquez-Selem, L.; Cervantes-Martínez, R.; Esquivel-Arriaga, G.; Guerra-De La Cruz, V.; Fulé, P.Z. Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México. *Bosque*, v.37, n.2, p.389-399. 2016. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000200017>.
- Castellnou, M.; Kraus, D.; Miralles, M. Prescribed burning and suppression fire techniques: from fuel to landscape management. In: Montiel, C.; Ktaus, D. (Eds.). *Best practices of fire use – prescribed burning and suppression fire programmes in selected case-study Regions in Europe*. Joensuu: European Forest Institute, 2010. p. 3-16. (European Forest Institute Research. Report, 24). http://www.fefr.org/files/attachments/publications/efi_rr24.pdf. 19 Jul. 2018.
- Cheney, N.P.; Gould, J.S.; McCaw, W.L.; Anderson, W.R. Predicting fire behaviour in dry eucalypt forest in southern Australia. *Forest Ecology and Management*, v.280, p.120-131, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.012>.
- Countryman, C.M. The nature of heat. Portland: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1977. 11 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. Management practices for the protection of forest reserves: the case of Kalahari Sand teak forest reserves in western Zimbabwe. Based on the work by John Mudekwe. Rome: FAO; Forest Resources Development Service; Forest Management Division, 2007. 39p. (Forest Management. Working Paper, FM/31). <http://www.fao.org/docrep/pdf/010/J9533E/J9533E00.pdf>. 10 Jun. 2018.
- Londe de Camargos, V.; Assunção Ribeiro, G.; Silva, A.F. da; Martins, S.V., Silva Carmo, F.M. da. Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. *Ciência Florestal*, v.25, n.3, p.537-545, 2015. <https://doi.org/10.5902/1980509819605>.
- Lydersen, J.M.; Collins, B.M.; Brooks, M.L.; Matchett, J.R.; Shive, K.L.; Povak, N.A.; Kane, V.R.; Smith, D. F. Evidence of fuels management and fire weather influencing fire severity in an extreme fire event. *Ecological Applications*, v.27, n.7, p.2013-2030. 2017. <https://doi.org/10.1002/eap.1586>.
- Martin, D.; Tomida, M.; Meacham, B. Environmental impact of fire. *Fire Science Reviews*, v.5, n.5, p.1-21. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0014-1>.
- Parra-Lara, Á.C.; Bernal-Toro, F.E. Introducción a la ecología del fuego. In: Parra, Á.C. *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*. Cali: Talleres Gráficos de Impresora Feriva, 2011. Tomo I, p. 17-72. <http://gfmco.online/wp-content/uploads/Incendios-de-la-Cobertura-Vegetal-en-Colombia-Tomo-I-2011.pdf>. 22 Jun. 2018.
- Pausas, J.G. Incendios forestales. Una visión desde la ecología. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Editorial Catarata, 2012. 119p.
- Ramos, M.P.; Albán, D.O.; Jimenez, A.; Mero, O.F.; Ganchozo, M.T. Planificación de una quema prescrita en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, v.6, n.2, p.184-194. 2018. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.6253928.v1>.
- Ramos, M.P.; Molina, J.R.; Martínez, L.W.; Carrasco, Y. Manual de campo para la identificación de los modelos de combustible Cuba 19. La Habana: Ministerio de la Agricultura, 2012. 35p. (Proyecto Desarrollo del Sector Forestal en Cuba).

- Romero-Mieres, M.; González, M.E.; Lara, A. Recuperación natural del bosque siempreverde afectado por tala rasa y quema en la Reserva Costera Valdiviana, Chile. *Bosque*, v.35, n.3, p.257,267. 2014. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300001>.
- Seger, C.D.; Batista, A.C.; Tetto, A.F.; Soares, R.V. Comportamento do fogo em queimas controladas de vegetação de estepe no Município de Palmeira, Paraná, Brasil. *Floresta*, v.43, n.4, p.547–558, 2013. <https://doi.org/10.5380/rev.v43i4.31385>.
- Soares, R.V.; Hakkila, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no estado do Paraná. *Floresta*, v.17, n.1/2, p.73-94, 1987. <https://doi.org/10.5380/rev.v17i12.6379>.
- Soares, R.V.; Batista, A.C.; Tetto, A.F. Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo. Curitiba: Universidade Federal do Parana, 2017. 255p.
- Van Wagner, C.E. Height of crown scorch in forest fires. *Canadian Journal of Forest Research*, v.3, n.3, p.373-378, 1973. <https://doi.org/10.1139/x73-055>.
- Weise, D.R.; Koo, E.; Zhou, X.; Mahalingam, S.; Morandini, F.; Balbi, J.H. Fire spread in chaparral—a comparison of laboratory data and model predictions in burning live fuels. *International Journal of Wildland Fire*, v.25, n.9, p.980-994, 2016. <https://doi.org/10.1071/WF15177>.
- White, B.L.A.; Ribeiro, G.T.; Souza, R.M. Caracterização do material combustível e simulação do comportamento do fogo em eucaliptais no litoral norte da Bahia, Brasil. *Floresta*, n.44, v.1, p.33-42, 2014. <https://doi.org/10.5380/rev.v44i1.32977>.