

## FUEL MODEL CARTOGRAPHY FOR THE PARANA RIVER FLUVIO LITTORAL COMPLEX FROM FIELD AND REMOTE SENSING DATA

## CARTOGRAFÍA DE MODELOS COMBUSTIBLES EN EL COMPLEJO FLUVIO LITORAL DEL RÍO PARANÁ A PARTIR DE DATOS DE TERRENO Y DERIVADOS DE SENSORES REMOTOS

Lisandra Pamela Zamboni<sup>1</sup>, Walter Fabián Sione<sup>1,2</sup>, Fernando Raúl Tentor<sup>1</sup> & Pablo Gilberto Aceñolaza<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Centro Regional de Geomática. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Autónoma de Entre Ríos. Ruta 11 km 10. Oro Verde. Entre Ríos. Argentina. pamelazamboni@gmail.com

<sup>2</sup>Dpto de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Luján. Buenos Aires. Argentina.

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP – CONICET), Materi y España s/n – E3105BWA, Diamante, Entre Ríos, Argentina

**ABSTRACT.** Information on fuel material is one of the basic inputs for fire management. The aim of this work was to generate a fuel model for the Complejo Fluvio-Litoral del Río Paraná (Paraná River Fluvio Littoral Complex, referred to as CFLRP) using field and remote sensing data. Fuel Moisture Content (FMC), proportion and size of woody fuel for different plant cover, (forests / shrubs / tall and low height grass) and compartment (aerial-litterfall) were estimated in the flood season (late fall/winter) and during drought (end of spring / summer) between 2010 and 2013. The results obtained for each of these 3 variables were weighed to make the model fuel. The model may assume a range of values between 1 and 9 depending on the behavior of each of the three variables. Low model values represent areas with high FMC, low proportion of woody material and low proportion of thick woody material, while high values in the model are indicative of areas with low FMC, high proportion of wood material and high ratio of thick woody material. In order to know the spatial distribution of the proposed model, the results obtained for each sampling site were integrated onto a map generated from a multitemporal unsupervised classification of vegetation covers (Kmean, 60 classes and 10 iterations) using 2 Landsat 8 OLI images (winter / spring 2013) (12 bands), segmented with a factor scale of 100, color (0.9) and form (0.1). The vector resulting from this classification was associated to an estimated NDVI value trend from a MODIS (MOD13Q1) temporal serie. This allowed the assigning of values of model fuel to a particular type of (vegetal) cover and areas with similar NDVI trends. The result obtained was a map of the spatial distribution of fuel associated to the probability of fire occurrences in the CFLRP. The results of the models were validated using field data of land cover. Thus we propose a methodology for the cartography of fuel models applicable in the CFLRP, that can be brought upto date periodically and takes into consideration the different vegetal covers and seasonality.

**KEY WORDS.** Fuel Moisture Content. Biomass. MODIS Hotspot. Landsat 8 OLI.

**RESUMEN.** La información sobre el material disponible para la combustión es uno de los insumos básicos para la gestión de incendios. El objetivo de este trabajo fue generar cartografía de modelos combustibles para el Complejo Fluvio-Litoral del Río Paraná (CFLRP) empleando datos obtenidos en terreno y otros derivados de sensores remotos. Se estimó el contenido de humedad (FMC), la proporción y tamaño del material leñoso para diferentes coberturas vegetales (bosques/arbustales/vegetación herbácea de porte alto y bajo) y compartimentos (aéreo-mantillo), en período de aguas altas (fin de otoño/invierno) y de aguas bajas (fin de primavera/verano) entre 2010-2013. Se ponderaron los resultados obtenidos para cada una de estas 3 variables que integran el modelo de combustible. El modelo puede asumir un rango de valores entre 1 y 9 dependiendo del comportamiento de cada una de las 3 variables. Valores bajos repre-

sentan áreas con alto FMC, baja proporción de material leñoso y baja proporción de material leñoso grueso), mientras que valores altos son indicadores de áreas con bajo FMC, alta proporción de material leñoso y alta proporción de material leñoso grueso. Con el fin de conocer la distribución espacial de los modelos combustibles propuestos, se integraron los resultados obtenidos para cada sitio de muestreo a un mapa generado a partir de cartografía de cobertura de vegetación resultante de una clasificación no supervisada (Kmean 60 clases y 10 iteraciones) de un compuesto (12 bandas) multitemporal de imágenes Landsat 8 OLI (invierno/primavera de 2013) segmentada con un factor de escala de 100, color (0.9) y forma (0.1). Al producto vectorial resultante de la clasificación se le asoció un valor de tendencia de NDVI estimada a partir de una serie temporal de imágenes MODIS (MOD13Q1). Esto permitió asignar los valores del modelo de combustible a un tipo determinado de cobertura y a su vez a aquellas zonas con similar tendencia de NDVI. Como resultado se obtuvo un mapa de la distribución espacial del combustible asociado a la probabilidad de ocurrencia de incendios en el CFLRP. Para validar el modelo se analizó la correspondencia entre los modelos y datos de terreno sobre cobertura del suelo. Se cuenta con una metodología para la cartografía de modelos combustibles aplicables CFLRP que puede ser actualizada de manera periódica y considera las diferentes coberturas vegetales y su estacionalidad.

**PALABRAS CLAVES.** Índice de humedad de combustible. Biomasa. Focos de calor MODIS. Landsat 8 OLI.

Recibido: 25 de Julio de 2017

Aceptado: 7 de Noviembre de 2017

## INTRODUCCIÓN

El fuego es uno de los factores de cambio más importantes en los ecosistemas terrestres, y en particular en las regiones tropicales y subtropicales (Giglio *et al.*, 2010) y es controlado por variables biofísicas y antrópicas (Chuvienco *et al.*, 2008). Su comportamiento está determinado por las condiciones atmosféricas, la topografía y el complejo de combustible (Bowman *et al.*, 2009; Bianchi *et al.*, 2014). De estas tres variables solo la referida a los combustibles puede ser manipulada, otorgándole importancia en el manejo del fuego (Morfín-Ríos *et al.*, 2012). La información de la estructura y dinámica vegetal es básica para estimar el peligro de incendios y es indispensable para la evaluación, planificación, control, y para la toma de decisiones (Hardy, 2005). Los modelos de combustible globales o regionales pueden no representar apropiadamente las características del material combustible de otras áreas (Pettinari & Chuvienco, 2017), por lo que se requiere de modelos desarrollados a partir de las condiciones locales de terreno. Para caracterizar el material combustible es posible integrar datos y técnicas de campo para complementar la información aportada por los sensores remotos. Los modelos de combustible aportan información sobre la fase previa al incendio, al es-

## INTRODUCTION

Fire is one of the most important actors of change in the earth's ecosystems. This is particularly so in tropical and subtropical regions (Giglio *et al.*, 2010) and is controlled by biophysical and anthropic variables (Chuvienco *et al.*, 2008). Its behaviour is determined by atmospheric conditions, topography and the complexity of fuel (Bowman *et al.*, 2009; Bianchi *et al.*, 2014). Of these three, only the variable referring to fuels can be manipulated, giving it importance in the management of fire (Morfín-Ríos *et al.*, 2012). The information on vegetal structure and dynamic is essential to estimate the danger of fires and it is indispensable for the evaluation, planning, control and decision making in this regard (Hardy, 2005). The global or regional fuel models cannot appropriately represent the characteristics of the fuel material of other areas (Pettinari & Chuvienco, 2017), as these require models developed based on local terrain conditions. To characterise the fuel material, it is possible to integrate field data and techniques to compliment the information contributed by remote sensors. Fuel models

timar el estado del complejo de combustible (arreglo espacial del combustible en el ecosistema). El complejo combustible puede ser caracterizado a partir de variables del material vegetal como el tamaño de las partículas, su grosor, contenido de humedad y compartimento (Krivtsov *et al.*, 2009).

La intensidad y velocidad de propagación del fuego disminuyen en relación al aumento del contenido de humedad del combustible. En términos generales la probabilidad de ignición de combustibles es baja cuando el contenido de humedad supera el 20% (Bianchi *et al.*, 2014). El índice de humedad de combustible (FMC: Foil Moisture Content) es uno de los más empleados (Chuvienco *et al.*, 2003). Este índice se estima comúnmente para datos de campo mediante métodos gravimétricos (pesado y secado a 60-80°C hasta la obtención del peso seco) (Brown *et al.*, 1981). El FMC se estima mediante la siguiente ecuación (Desbois *et al.*, 1997):

$$FMC = ((Ww - Wd) / Wd) * 100$$

Donde: Ww: peso fresco (húmedo) y Wd peso seco. Se expresa en porcentaje (%).

Los resultados de los modelos de combustible se expresan en cartografía de niveles de peligro (Allgöwer *et al.*, 2003) y pueden ser integrados a productos derivados de sensores remotos (Anaya *et al.*, 2009). En este contexto el objetivo de este trabajo fue generar cartografía de modelos combustibles para el Complejo Fluvio-Litoral del Río Paraná (CFLRP) empleando datos obtenidos en terreno y otros derivados de sensores remotos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio (Fig. 1) corresponde al Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (CFLRP), localizado entre las coordenadas 31°6'23,76"S como límite superior y 34°26'43,157"S como límite inferior, 60°56'34,427"W límite Oeste y 58°22'17"W límite Este. Se trata de una llanura de inundación compleja que funciona como un macroecosistema de humedales (Malvárez, 1999) estrechamente vinculado al pulso hidrosedimentológico y al fuego (Neiff, 2005; Casco *et al.*, 2010). El CFLRP se extiende 600 km en dirección Norte-Sur (Iriondo, 2004; Aceñolaza *et al.*, 2008; Zoffoli *et al.*, 2008; Aceñolaza *et al.*, 2014). Se diferencia de los paisajes aledaños (Casco *et al.*, 2010), representados por una matriz agrícola y por núcleos portuarios, industriales urbanos asociados principalmente al tramo deltaico del Río Paraná (Aceñolaza *et al.*, 2014).

### Metodología

Se estimó en campo la biomasa de diferentes unidades homogéneas de vegetación (bosques fluviales, vegetación arbustiva, herbácea de alto y de bajo porte) y en dos compartimentos (biomasa aérea y manto) (Aceñolaza *et al.*, 2014). Se emplearon técnicas

contribuir información sobre la fase precedente al fuego, al estimar el estado del complejo de combustible (arreglo espacial del combustible en el ecosistema). El complejo combustible puede ser caracterizado por las variables del material vegetal como el tamaño de las partículas, su grosor, contenido de humedad y compartimento (Krivtsov *et al.*, 2009).

La intensidad y rapidez de la propagación del fuego disminuyen en relación al aumento del contenido de humedad del combustible. En términos generales la probabilidad de ignición de combustibles es baja cuando el contenido de humedad supera el 20% (Bianchi *et al.*, 2014). El índice de humedad de combustible (FMC: Foil Moisture Content) es uno de los más utilizados (Chuvienco *et al.*, 2003). Este índice se estima comúnmente mediante datos de campo a través de métodos gravimétricos (pesado y secado a 60-80°C hasta la obtención del peso seco) (Brown *et al.*, 1981). El FMC se estima mediante la siguiente ecuación (Desbois *et al.*, 1997):

$$FMC = ((Ww - Wd) / Wd) * 100$$

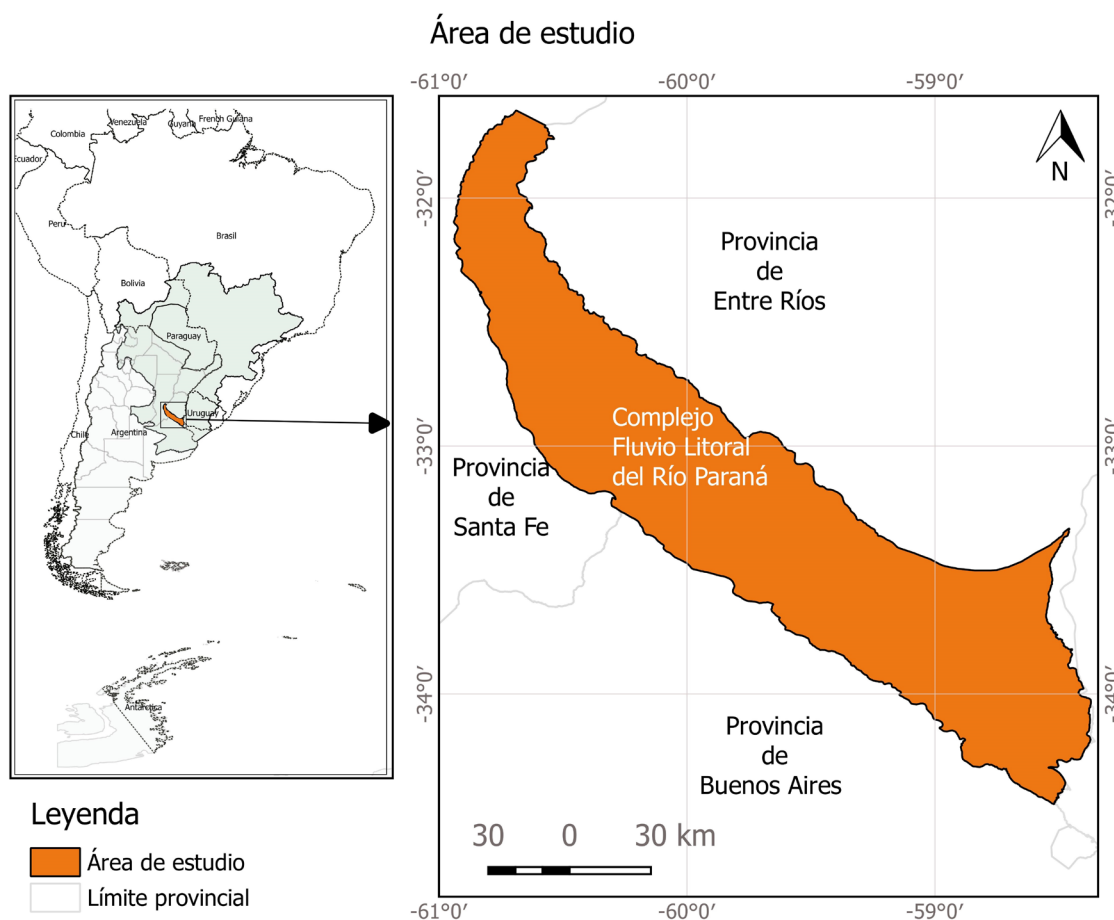
Donde: Ww: peso fresco (húmedo) y Wd peso seco. Se expresa en porcentaje (%).

Los resultados de los modelos de combustible se expresan en cartografía de niveles de peligro (Allgöwer *et al.*, 2003) y pueden ser integrados a productos derivados de sensores remotos (Anaya *et al.*, 2009). En este contexto el objetivo de este trabajo fue generar cartografía de modelos combustibles para el Complejo Fluvio Littoral del Río Paraná (CFLRP) utilizando datos obtenidos en terreno y otros derivados de sensores remotos.

## MATERIAL AND MÉTHODS

### Area of study

The study area (Fig. 1) corresponds to the (Paraná River Fluvio Littoral Complex), Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (CFLRP), located between the coordinates 31°6'23,76"S as the upper limit and 34°26'43,157"S as the lower limit, 60°56'34,427"W Western limit and 58°22'17"W Eastern limit. It is a flood plain complex that functions as a macro ecosystem of wetlands (Malvárez, 1999) closely linked to the hydro-sedimentological pulse and fire (Neiff, 2005; Casco *et al.*, 2010). The CFLRP extends 600 km in the North-South direction (Iriondo, 2004; Aceñolaza *et al.*, 2008; Zoffoli *et al.*, 2008; Aceñolaza *et al.*, 2014). It differs from the nearby landscape (Casco *et al.*, 2010), represented by an agricultural matrix and by a nucleus of ports and industries associated principally with the deltaic section of the Paraná River (Aceñolaza *et al.*, 2014).



**Figure 1.** Study area. Paraná River Fluvio Littoral Complex (El Complejo Fluvio Littoral del río Paraná).  
**Figura 1.** Área de estudio. El Complejo Fluvio Littoral del río Paraná.

tradicionalmente utilizadas para el muestreo de la biomasa (Brown y Smith, 2000). Para el mantillo y la biomasa aérea de las fisonomías herbáceas y arbustivas se utilizó la metodología de cortado y pesado en parcelas de 0.5 m<sup>2</sup> a 4m<sup>2</sup> respectivamente, y para las arbóreas la siguiente ecuación alométrica: Biomasa= exp (-2,4090+0,9522ln (D<sup>2</sup>HS) (Brown *et al.*, 1981) integrando los datos estructurales de parcelas de 400 m<sup>2</sup>, donde D=Diámetro a la Altura del Pecho en centímetros, H= Altura en metros, S= Densidad Específica de la madera. Los valores de densidad específica de la madera (Kg/m<sup>3</sup>) fueron (Gasparri *et al.*, 2008): 700 Kg/m<sup>3</sup> para *Tessaria integrifolia*, 955 Kg/m<sup>3</sup> para *Albizia inundata*, 590 Kg/m<sup>3</sup> para *Erythrina cristae-galli*, 730 Kg/m<sup>3</sup> para *Sapium haematospermum* y 1195 Kg/m<sup>3</sup> para *Acacia caven*. Se obtuvieron valores de biomasa expresados en T/Ha-1.

Los resultados corresponden a valores medios de biomasa de 3 parcelas dispuestas en cada uno de cua-

### Methodology

The biomass of different homogenous units of vegetation (riverine forests, shrubland, high and low herbaceous species) were estimated on the field, in two compartments (aerial biomass and mulch) (Aceñolaza *et al.*, 2014). Traditionally used techniques were used for the sampling (maestro) of biomass (Brown y Smith, 2000). For the mulch and the aerial biomass of the herbaceous and shrub physiognomies the methodology of cutting and weighing was used in parcels of 0.5 m<sup>2</sup> a 4m<sup>2</sup> respectively, and for the arboreal part the following allometric equation: Biomasa= exp (-2,4090+0,9522ln (D<sup>2</sup>HS) (Brown *et al.*, 1981). This method integrates the structural data of parcels of 400 m<sup>2</sup>, where D=Diameter to chest height in centimetres, H= Height in meters, S= Specific

tro sitios de muestreo, relevados dos veces por año desde fines de verano a inicios de otoño (período de inundación) y desde fines de invierno a inicios de primavera (período de estiaje) desde 2010 a 2013.

En laboratorio se pesó el material (peso seco) y se secaron las muestras en estufa (pesado y secado a 60-80°C hasta un peso constante) (Chuvieco *et al.*, 2003). Se separaron y pesaron las partículas menores a 1 cm, entre 1 y 5 cm y mayores de 5 cm de diámetro; representando al material leñoso fino, medio y grueso respectivamente. Para cada muestra se calculó la proporción de material leñoso, la proporción de combustible grueso (partículas leñosas mayores a 5 cm de diámetro), y se obtuvo el FMC.

Se valoraron los resultados obtenidos de la siguiente forma:

- Proporción de material leñoso: valores con 0 % de material leñoso: Nulo, de 1 a 19%: Bajo, de 20 a 49%: Medio, y valores de 50% o más: Alto.

- Proporción de material grueso: valores de 0% de material leñoso con diámetro mayor a 5 cm: Nulo, valores de 1 a 39%: Bajo, de 40 a 69%: Medio, y valores de 70% o más: Alto.

- FMC: valores hasta 39%: Alto, entre 40 y 69%: Medio y 70% o más Bajo.

A fin de ponderar los resultados de cada una de estas tres variables, y obtener un modelo de combustible para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de incendios, se transformaron los valores categóricos de la siguiente forma: categoría Nulo: Valor 0. Bajo: Valor 1. Medio: Valor 2 y Alto: Valor 3. De esta forma el modelo de combustible asumió valores entre con un mínimo de 1 (Bajo, Nulo, Nulo) y un máximo de 9 (las 3 variables presentan la categoría Alto).

Estos resultados se integraron a un mapa de cobertura de las unidades homogéneas de vegetación generado mediante la clasificación no supervisada (Kmean 60 clases y 10 iteraciones) de un compuesto (12 bandas) multitemporal de imágenes Landsat 8 OLI (fines de invierno a fines de primavera de 2013) segmentada con un factor de escala de 100, color (0.9) y forma (0.1) (Aceñolaza *et al.*, 2014). Al producto vectorial resultante de la clasificación se le asoció un valor de tendencia de NDVI estimada a partir de una serie temporal de imágenes del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS- MOD13Q1) para el período 2010-2013 (Zamboni *et al.*, 2015). Se generó así cartografía sobre la distribución espacial del combustible: un mapa del combustible leñoso, uno del combustible leñoso grueso y un mapa del FMC. De esta manera se integraron los 3 mapas y se obtuvo cartografía de probabilidad de ocurrencia de incendios.

Para evaluar el grado de acierto del modelo de combustible frente a la efectiva ocurrencia de incendios en el período estudiado, se analizó la relación entre incendios (Tentor *et al.*, 2015) y el modelo de com-

Density of the Wood. The values of specific density of the wood (Kg/m<sup>3</sup>) were (Gasparri *et al.*, 2008): 700 Kg/m<sup>3</sup> for *Tessaria integrifolia*, 955 Kg/m<sup>3</sup> for *Albizia inundata*, 590 Kg/m<sup>3</sup> for *Erythrina cristagalli*, 730 Kg/m<sup>3</sup> for *Sapium haematospermum* and 1195 Kg/m<sup>3</sup> for *Acacia caven*. The values of the biomass obtained were expressed in T/Ha-1.

The results correspond with mean biomass values of 3 parcels disposed in each of the four sampling sites, taken twice a year from the end of Summer to the beginning of Autumn (flood period) and from the end of Winter to the beginning of Spring (period of dryness) from 2010 to 2013.

The material was weighed in the laboratory (dry weight) and the samples were dried with a heater (weighed and dried at 60-80°C until a constant weight was reached) (Chuvieco *et al.*, 2003). The particles were separated and weighed at: less than 1 cm, between 1 and 5 cm and over 5 cm in diameter; representing fine, medium and thick woody material respectively. For each sample the proportion of woody material was calculated with the proportion of thick fuel (woody particles over 5 cm in diameter), and thereby the FMC was obtained.

The results obtained were valorised in the following form:

- Proportion of woody material: values with 0 % of woody material: Null, from 1 to 19%: Low, from 20 to 49%: Medium, and values of 50% or over: High.

- Proportion of thick material: values of 0% of woody material with a diameter over 5 cm: Null, values from 1 to 39%: Low, from 40 to 69%: Medium, and values from 70% or over: High.

- FMC: values up to 39%: High, between 40 and 69%: Medium and 70% or over: Low.

After pondering the results of each of these three variables, and obtaining a fuel model for the estimation of the probability of fire incidents, the categorical values were transformed in the following manner: Null category: 0 Value. Low: Value 1. Medium: Value 2 and High: Value 3. In this way the fuel model values ranged from a minimum of 1 (Low, Null, Null) to a maximum of 9 (the 3 variables present the category High).

De esta forma el modelo de combustible asumió valores entre con un mínimo de 1 (Bajo, Nulo, Nulo) y un máximo de 9 (las 3 variables presentan la categoría Alto).

These results were integrated in a map of the homogenous units of vegetation cover generated

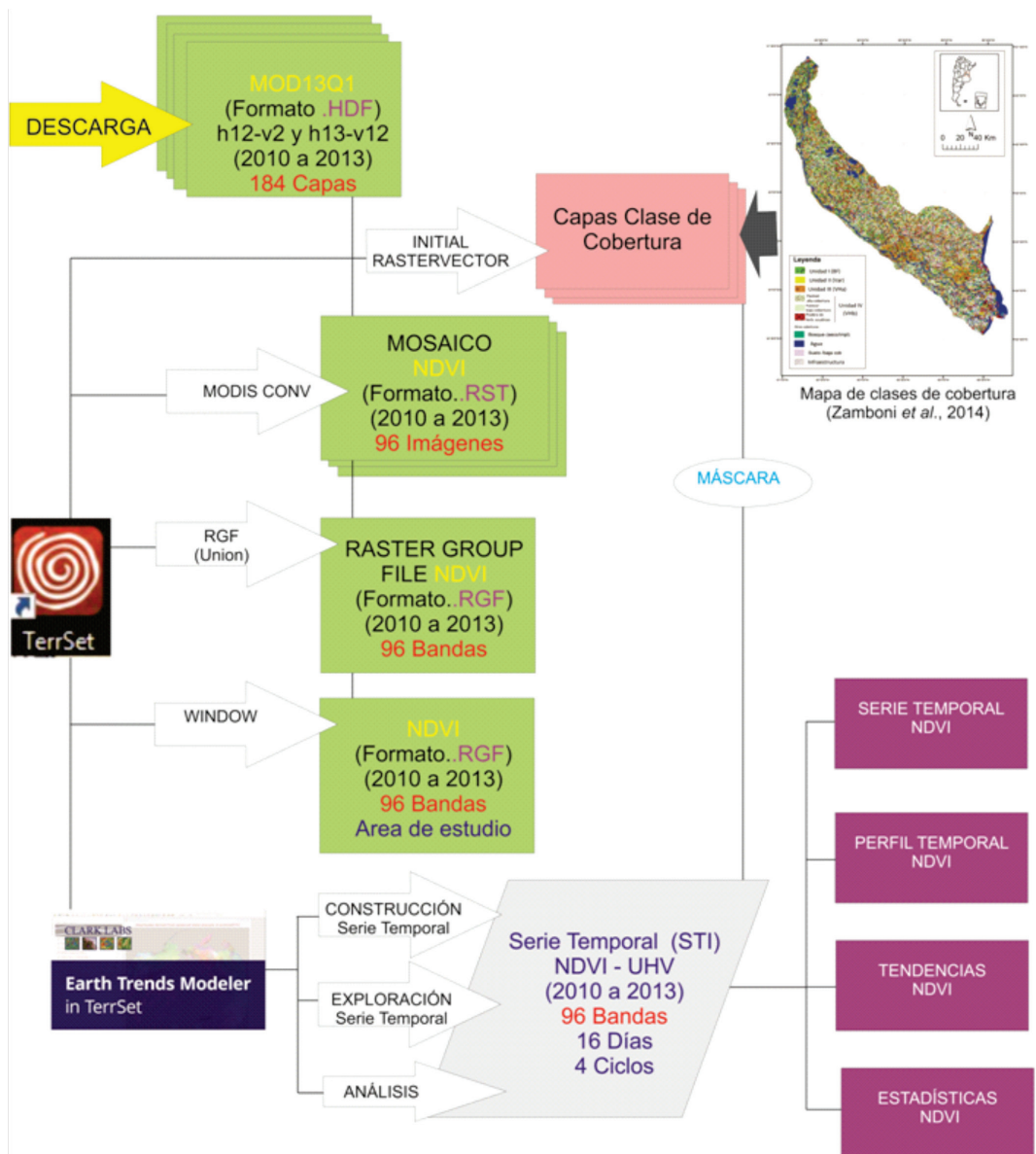


Figure 2. Methodological scheme showing the integration of data of the terrain derived from remote sensors.  
 Figura 2. Esquema metodológico donde se aprecia la integración de datos de terreno y derivados de sensores remotos.

bustible generado. De esta forma se aplicó un enfoque que integró la variabilidad tanto temporal como espacial de las variables analizadas (Hoyos *et al.*, 2017). La Figura 2 muestra el esquema metodológico utilizado en este trabajo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de valores medios de FMC (Fig. 3) muestra las áreas para las 3 categorías de FMC (bajo, medio y alto). En la porción sur del área de estudio el FMC presentó valores altos, con FMC cercano al 40%, lo que se

through the unsupervised classification (Kmean 60 classes and 10 iterations) of a compound (12 bands belts) OLI Landsat 8 multitemporal images (end of Winter to end of Spring of 2013) segmented with the scale factor of 100, colour (0.9) and form (0.1) (Aceñolaza *et al.*, 2014). To the resulting vectorial product of the classification a tendency value of NDVI estimated, from a series of temporal images of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS- MOD13Q1),

relaciona a la dominancia de comunidades vegetales herbáceas de zonas topográficas bajas (Aceñolaza *et al.*, 2014). Estos valores superan los propuestos por Bianchi *et al.* (2014) para combustibles finos y gramíneas (menores al 30%), demostrando la adaptación de la vegetación a las condiciones del humedal.

Por lo tanto la probabilidad de ocurrencia de incendios es menor tal como se aprecia en la cartografía de modelo de combustible. En la porción central y norte el FMC registró una mayor proporción de valores medios, lo que se explica debido a la dominancia de comunidades arbóreas en esta porción del área de estudio, que suelen presentar una menor variabilidad estacional de FMC (Bianchi *et al.*, 2014).

El mapa de material combustible grueso para el CFLRP (Fig. 4) muestra que en la porción norte el complejo combustible está integrado por mayor proporción de partículas leñosas que hacia el sur, que presenta valores bajos, en coincidencia con la dominancia de comunidades vegetales herbáceas (Aceñolaza *et al.*, 2014).

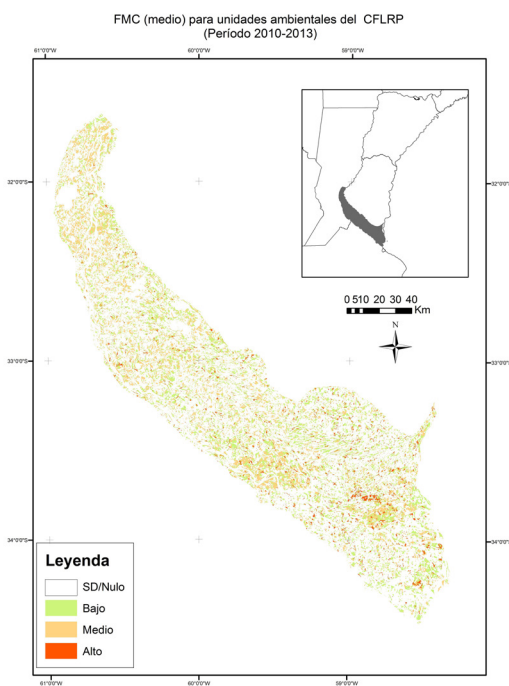
El mapa de tamaño de partículas leñosas por unidad homogénea de vegetación del CFLRP (Fig. 5)

was associated for the period 2010-2013 (Zamboni *et al.*, 2015). Thus cartography was generated on the spatial distribution of the fuel with: a map of the woody fuel, another of the woody, thick fuel and a map of the FMC. In this way 3 maps were integrated and cartography was obtained of the probability of fire occurrences.

To evaluate the degree of predictability of the fuel model considering the effective occurrence of fires in the study period, the relation between fires and the generated fuel model was researched (Tentor *et al.*, 2015). In this way a focus that integrated the temporal variability as much as the spatial one was applied to the analysed variables. (Hoyos *et al.*, 2017). Figure 2 shows the methodological scheme used in this study.

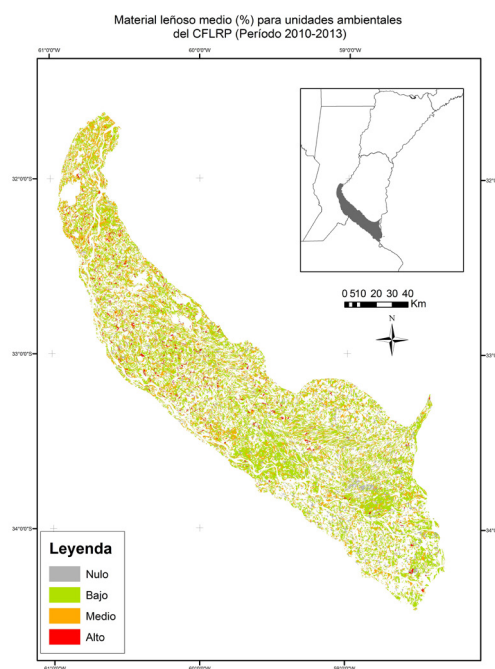
## RESULTS AND DISCUSSION

The map of average values of FMC (Fig. 3) shows the areas for the 3 categories of FMC (low, medium and high). In the portion south of the



**Figure 3.** Map of FMC of the CFLRP for homogenous vegetation units for the period 2010-2013. Different colours identify the FMC categories: Low, Medium and High.

**Figura 3.** Mapa de FMC del CFLRP por unidad homogénea de vegetación para el período 2010-2013. Se identifican en diferentes colores las categorías de FMC: Bajo, Medio y Alto



**Figure 4.** Map of quantity of woody material (%) for type of homogenous vegetation unit of the CFLRP. Different categories are identified using colours: Null, Low, Medium and High.

**Figura 4.** Mapa de cantidad de material leñoso (%) por tipo de unidad homogénea de vegetación del CFLRP. En color se identifican las diferentes categorías: Nulo, Bajo, Medio y Alto.

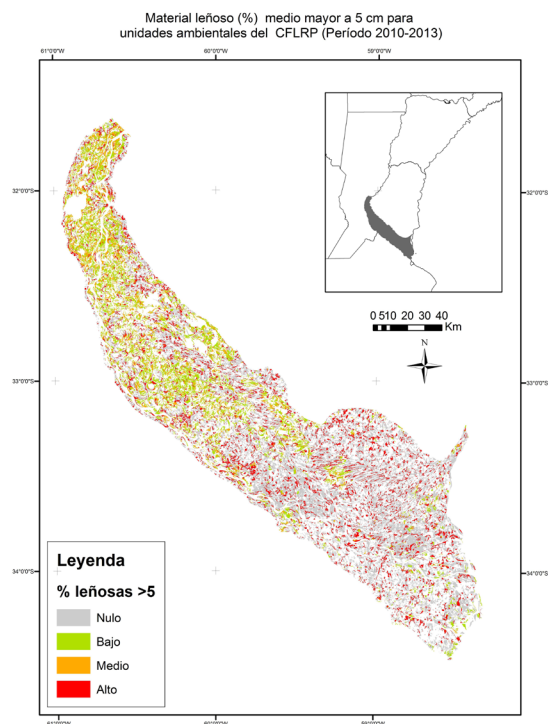
muestra la ausencia de material leñoso fino en la porción sur del CFLRP, mientras que las partículas gruesas aparecieron asociadas a los bosques fluviales. Se diferenciaron claramente los sectores norte y sur de la región. Hacia el sur, la predominancia de vegetación herbácea por sobre la arbórea-arbustiva explicó estos resultados.

A partir de los mapas de FMC (Fig. 3), cantidad de material leñoso (Fig. 4) y porcentaje de material leñoso mayor a 5 cm. de diámetro (Fig. 5) se estimó la probabilidad de ocurrencia de incendios en función de la calidad y cantidad de combustible (Fig. 6).

La probabilidad de ocurrencia de incendios (Fig. 6) presentó una mayor proporción de valores medios-altos en la porción norte y central del CFLRP, mientras que en la zona sur se registraron valores moderados a bajos. Espacialmente, la probabilidad de ocurrencia de incendios disminuye de norte a sur. El patrón temporal refleja la estrategia adaptativa de la vegetación al estrés hídrico estival, en coherencia con lo afirmado por

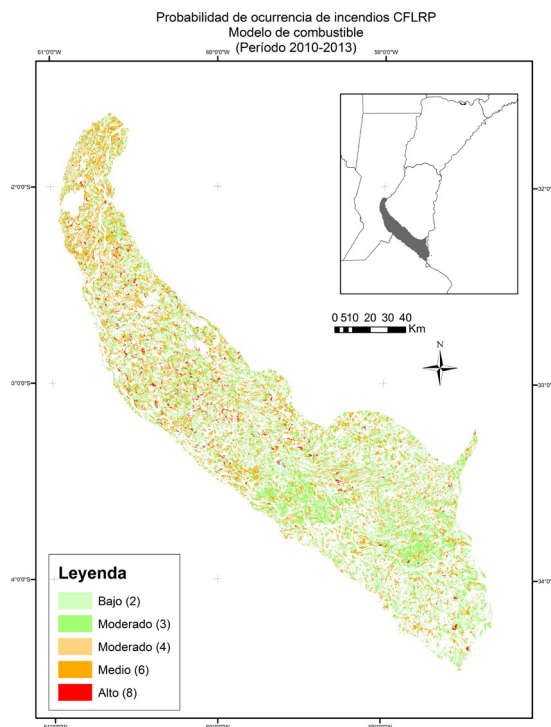
study area the FMC presented high values, with the FMC close to 40%, which is related to the dominance of herbaceous vegetal communities of low topographical zones (Aceñolaza *et al.*, 2014). These values exceed those proposed by Bianchi *et al.* (2014) for fine fuel and grasses (lower than 30%), demonstrating the adaptation of the vegetation to the wetland conditions.

Thus the probability of fire occurrences is less as seen in the cartography of the fuel model. In the central and northern portion, the FMC registered a higher proportion of average values which is explained by the dominance of arboreal communities in this portion of the study and appears to present a lower seasonal variability of FMC Bianchi *et al.*, 2014).



**Figure 5.** Map of percentage of woody particles with diameter over 5cm for homogenous unit of vegetation of the CFLRP. Categories are differentiated with colours: Null, Low, Medium and High.

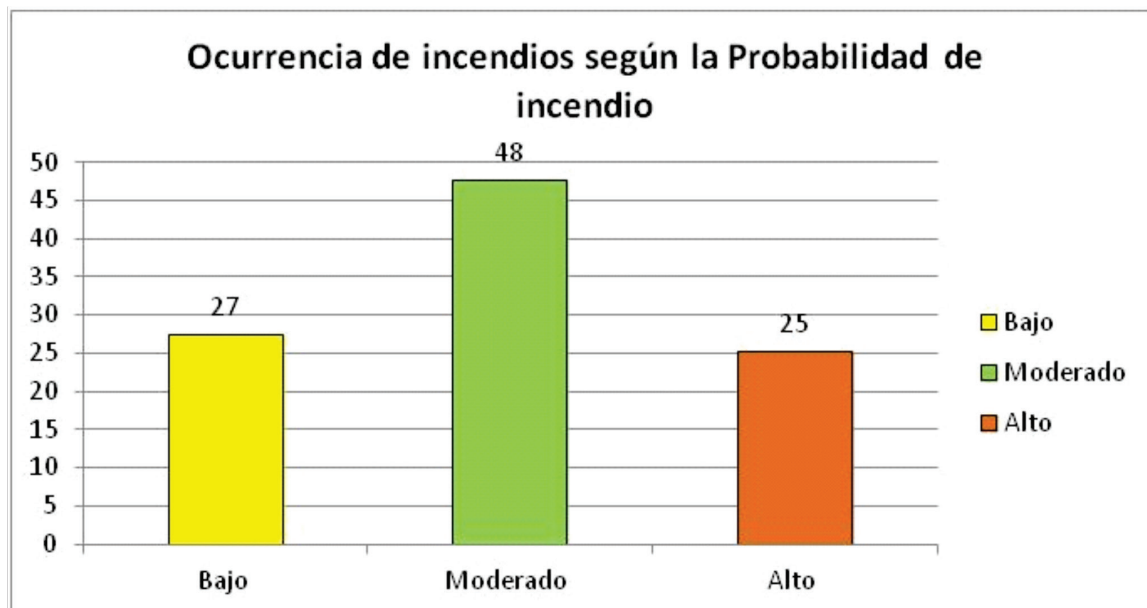
**Figura 5.** Mapa de porcentaje de partículas leñosas con diámetro mayor a 5cm. por unidad homogénea de vegetación del CFLRP. En color se diferencian las categorías: Nulo, Bajo, Medio y Alto.



**Figure 6.** Map of probability of fire incidents occurring in the CFLRP obtained based on map of FMC, quantity of woody material and 0% of woody material over 5 cm in diameter. The Categories are differentiated with colours: Low, Moderate, Medium and High.

**Figura 6.** Mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios para el CFLRP obtenido a partir de los mapas de FMC, cantidad de material leñoso y % de material leñoso mayor a 5 cm. de diámetro. En color se diferencian las categorías: Bajo, Moderado, Medio y Alto.





**Figure 7.** Fuel model evaluation based on the comparison between fires that occurred (heat focus) and values assumed by the fuel model. Colours identify the categories representing probability of fire occurrence (low, moderate and high).

**Figura 7.** Evaluación del modelo de combustible en base a la comparación entre incendios ocurridos (focos de calor) y valores asumidos por el modelo de combustible. En color se identifican las categorías de probabilidad de ocurrencia de incendios (bajo, moderado y alto).

Aceñolaza *et al.*, (2008). En coincidencia con lo registrado por Brown y Smith (2000), el material combustible es en términos generales fino y se presenta en menor cantidad en las unidades de vegetación herbáceas en comparación con las leñosas.

La relación entre la ocurrencia de incendios (focos de calor) y la probabilidad de ocurrencia de incendios estimada a partir del modelo de combustible aquí desarrollado (Fig. 7) permitió estimar que cerca del 27% de los incendios ocurrieron cuando la probabilidad de ocurrencia de incendio fue baja, cerca de la mitad (48%) cuando fue moderada y el 25% restante cuando fue alta.

Por lo tanto, si bien las características del combustible del CLRP en las unidades de vegetación leñosas presentan las mayores condiciones para la ocurrencia de incendio (menor FMC, mayor cantidad de partículas leñosas y mayor carga de combustible), estos ocurren en mayormente en sitios con probabilidades moderadas, explicando de esta forma la alta ocurrencia de eventos en las zonas con predominio de vegetación herbácea a pesar de las condiciones de su material combustible.

### CONCLUSIÓN

Se caracterizó el complejo de combustible para el CFLRP considerando sus diferentes unidades homogé-

The map of thick fuel material for the CFLRP (Fig. 4) shows that in the northern portion the complex fuel is integrated by a greater proportion of woody particles than towards the south, where low values are presented, coinciding with the dominance of herbaceous vegetal communities (Aceñolaza *et al.*, 2014).

The map of the size of woody particles for the homogenous vegetation unit of the CFLRP (Fig. 5) shows the absence of fine woody material in the southern portion of the area, while the thick particles appeared to be associated with riverine forests. Clearly the northern and southern sectors of the region differ. Towards the south, the predominance of herbaceous vegetation over shrub-land explains these results.

Based on the maps of the FMC (Fig. 3), the quantity of woody material (Fig. 4) and the percentage of woody material over 5 cm in diameter (Fig. 5), the probability of fire occurrences considering the quality and quantity of fuel was estimated (Fig. 6).

The probability of fire occurrence (Fig. 6) presented a greater proportion of high-average values in the northern and central portion of the CFLRP while in the southern zone moderate to low

neas de vegetación y tendencias (estacionales, inter-  
anuales) de NDVI.

Se realizó una zonificación de áreas con baja, media, moderada y alta probabilidad de ocurrencia de incendios.

Es conveniente continuar con el desarrollo de esta línea de trabajo presentando los valores estacionales, ya que el trabajo de campo integró datos de fines de verano-otoño y para fines de invierno-primavera, y los resultados obtenidos evidencian diferencias intra-  
anuales.

Se deberán revisar los umbrales empleados en el presente capítulo sobre la base de estos aportes.

La composición del combustible en las diferentes unidades de vegetación del CFLRP presentan características asociadas a una relativamente baja probabilidad de incendios, explicando la relación entre ocurrencia de incendios y los valores registrados del modelo de combustible.

Es necesario profundizar la información sobre las proporciones de combustible vivo y muerto, principalmente en las unidades de vegetación herbáceas, para definir de mejor manera la carga de combustible.

Se aplicó un enfoque espacio temporal para incluir las variables que cambiaron a lo largo del tiempo en las diferentes zonas del área de estudio. La metodología, variables y criterios adoptados y desarrollados son una importante herramienta para definir áreas, períodos y otros elementos asociados a la gestión del fuego en el CFLRP.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, P. G., Zamboni L. P., Sione W. F. & F. Kalesnik. 2008. Caracterización de la región superior del Complejo Litoral del Río Paraná: grandes unidades de ambiente. *Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino III. Serie Misc INSUGEO*. 17(2)293-308 pp.
- Aceñolaza, P. G., Zamboni, L. P., Kalesnik F., Rodríguez E.E., Sione W.F., & Serafini, C. 2014. Mapa de cobertura de suelo para un sector del norte del Complejo Litoral del Río Paraná con herramientas de geomática. *Revista Usted y la Geomática*. 39-44 pp.
- Allgöwer, B.; Carlson J.D., & van Wagendonk J.W. Introduction to Fire Danger Rating and Remote Sensing -Will Remote Sensing Enhance Wildland Fire Danger Rating?. In *Wildland Fire Danger. Estimation and Mapping*. (E. Chuvieco Ed). Series in Remote Sensing. 2003.Vol 4. Chapter I. 1-20 pp.
- Anaya, J. A., Chuvieco E., & Palacios-Orueta A. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*. 257:1237-1246 pp.
- Bianchi, L., Defossé, G., 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) I:

values were registered. Spatially, the probability of fire occurrence lessens from the North to the South. The temporal pattern reflects the adaptive strategy of the vegetation to summer hydric stress and is coherent with what was affirmed by Aceñolaza *et al.*, (2008). Coinciding with what Brown and Smith (2000) registered, the fuel material is fine/thin in general terms and presents itself in lesser quantity in the herbaceous vegetation units in comparison with those that are woody. Coincidiendo con lo que registra Brown, el material combustible es en términos generales fino y se presenta en menor cantidad en las unidades de vegetación herbáceas en comparación con las leñosas.

The relation between the occurrence of fires (heat focus) and the probability of fire occurrence estimated based on the fuel model developed here (Fig. 7) allowed to estimate close to 27% of the fires that took place while the probability of fire occurrence was low, close to half (48%) when probability was moderate and the remaining 25% when it was high.

Thus, even though the characteristics of the fuel for the CLRP in the woody vegetation units present higher conditions for the occurrence of fire (less FMC, greater quantity of woody particles and higher fuel charge); these occur mostly in sites with moderate probabilities thereby explaining the high occurrence of events in the zones with a predominance of herbaceous vegetation despite the conditions of the fuel material.

## CONCLUSION

The complex fuel for the CFLRP was analysed considering the area's different homogenous units of vegetation and NDVI tendencies (seasonal, inter-annual).

A zonification of areas with low, medium, moderate and high probability of fire occurrence was realised.

It is advantageous to continue developing this line of work presenting seasonal values, given that the field work integrated data from the end of Summer-Autumn and for the end of Winter-Spring, and the results obtained show intra-annual differences.

The thresholds employed in this chapter ought to be revised on the basis of these contributions. The fuel composition in the different vegetation units of the CFLRP present characteristics associated with a relatively low probability of fires, explaining

- conceptos básicos. RIA. *Revista de Investigación Agropecuaria*. 40 (2): 154-164 pp.
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M. & Cochrane, M. A. 2009. *Fire in the earth system*. *Science*, 481-484.
- Brown, J.R., Oberheuer, R.D. & Johnston, C. M. 1981. Handbook for Inventorying Surface Fuels and Biomass in the Interior West. West. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-129. 48 pp.
- Brown, J. K. & Smith, J. K. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Gen. Tech. Rep. Brown, J. K.; Smith, J. K. Edt. USDA: Department of Agriculture, Forest Service. 2000. 42-2: 257 pp.
- Casco, S.L., Neiff, J.J. & Poi de Neiff, A. 2010. Ecological responses of two pioneer species to a hydrological connectivity gradient in riparian forest of the lower Parana River. *Plant Ecology*. 209:167-177 pp.
- Chuvieco E., Aguado, I., Cocero, D. & Riaño, D. 2003. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing*. 24(8):1621-1637 pp.
- Chuvieco, E., Giglio, L., & Justice, C. 2008. Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from earth observation data. *Global Change Biology*, 14:1488-1502 pp.
- Desbois, N., Deshayes, M. & Beudoin, A. 1997. Protocol for fuel moisture content measurements. In: A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires. (E. Chuvieco Ed.). Universidad de Alcalá. España. 61-72 pp.
- Giglio, L., Randerson, J. T., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., Collatz, G. J., Morton, D. C., et al. (2010). Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences*, 7: 1171-1186.
- Hardy, C.C. 2005. Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. *Forest Ecology Management*. 211:73-82 pp.
- Hoyos N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel M.A., Espinosa, J.M., Restrepo, J.C. & Escobar, J. 2017. The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography* 84. 42-54 pp.
- Iriondo, M. 2004. The Littoral complex at the Paraná mouth. *Quaternary International*. 114. 143-154.
- Krivtsov V., Vigy, O., Legg, C., Curt, T., Rigolot, E., Lecomte, I., Jappiot, M., Lampin-Maillet, C., Fernandes, P., & Pezzatti, G.B.. 2009. Fuel modelling in terrestrial ecosystems: An overview in the context of the development of an object-orientated database for wild fire analysis. *Ecological Modelling*. 220:2915-2926 pp.
- Malvárez, A.I., El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En: Malvárez, A. I. (ed.). Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica, Montevideo, Oficina Regional de Ciencia y Técnica para América Latina y el Caribe (ORCyT) MAB/UNESCO, 1999. 35-53 pp.

the relation between fire occurrence and the values registered of the fuel model.

It is necessary to get more information on the dead and living fuel proportions, principally in the units of herbaceous vegetation, to define the fuel charge in the best manner.

A spatial-temporal focus was applied to include the variables that changed with time in the different zones of the study. The methodology, variables and the criteria adopted and developed are an important tool for defining areas, periods and other elements associated with fire management in the CFLRP.

- Morfín-Ríos, J.E., Jardel, E.J., Alvarado, C. & Michel-Fuentes, J.M. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 110 pp.
- Neiff, J.J. 2005. Bosques Fluviales de la Cuenca del Paraná. En: Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina. (M.F. Arturi, J.L. Frangi y J.F. Goya Eds.) Ediciones EDULP. La Plata. 1-26 pp.
- Pettinari, L. & Chuvieco, E. 2017. Fire Behavior Simulation from Global Fuel and Climatic Information. *Forests*. 8.179. 1-23 pp.
- Tentor F., Zamboni, L.P., Sione W.F., Maldonado F. & Aceñolaza, P.G. 2015. Incendios en el complejo litoral del Río Paraná (2010-2013) a través de focos de calor (FC FIRMS). Libro de acta de Jornadas Argentinas de Geomática. San Luis. 291-299 pp.
- Zamboni, L.P., Sione, W.F., Tentor, F.R. & Aceñolaza, P.G. 2015. Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) para el Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (Argentina) para el período 2010-2013. Libro de Actas Jornadas Argentinas de Geomática. San Luis. 255-264 pp.
- Zoffoli M.L., Kandus, P., Madanes, N. & Calvo, D.H. 2008. Seasonal and interannual analysis of wetlands in South America using NOAA-AVHRR NDVI time series: the case of the Parana Delta Region. *Landscape Ecology*. 23:833-848 pp.