

PATRONES ESPACIO-TEMPORALES DE INCENDIOS EN EL COMPLEJO LITORAL DEL RÍO PARANÁ

LISANDRA PAMELA ZAMBONI, FERNANDO R. TENTOR, WALTER F. SIONE, LEONARDO HARDTKE, HÉCTOR F. DEL VALLE, IGNACIO QUIGNARD y PABLO G. ACEÑOLAZA

RESUMEN

Se ha estudiado la ocurrencia de incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná, Argentina (periodo 2004-2008), mediante el análisis de focos de calor (FC). Se evaluó información espacial de diferentes sensores remotos (MODIS, ERS, Goes, NOAA) descargados de diferentes fuentes de consulta (CONAE, ESA, INPE). Los datos del sensor MODIS Aqua (descargados y procesados por CONAE) presentaron la mayor eficiencia en la detección de FC. Para este sensor se desarrolló un algoritmo que permitió agrupar FC e interpretarlos como incendios, integrando conocimiento previo de la región y del comportamiento del fuego en el área de estudio. Se obtuvieron mapas, tablas y figuras. Se realizaron estadísticas descriptivas, test de normalidad (Shapiro Willks) y varianza (Krus-

kal Wallis). No se observaron diferencias estadísticamente significativas (DES) entre los FC e incendios ocurridos en los diferentes meses o estaciones estudiadas. Se encontraron DES entre los años 2004, 2006 y 2008, y los años 2005 y 2007. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, los incendios del Complejo Litoral del Río Paraná son en general de corta duración y pequeño tamaño, con un patrón primavero-estival de ocurrencia, y su número varía significativamente entre años. Periodos excepcionales, como el año 2008, pueden ser identificados por la variación de estos parámetros. Esta información se presenta como una herramienta apropiada para el manejo del fuego en la región.

El fuego es un componente importante de la mayoría de los ecosistemas naturales del mundo. En el Complejo Litoral del Río Paraná se producen como resultado del manejo de pastizales para lograr la mejora de la calidad de forraje para el ganado vacuno. En el caso del año 2008 se estimaron, como consecuencia de las quemadas,

emisiones de $\sim 7,7$ Tg C-CO₂ (Sione *et al.*, 2009). Algunas de las variables que permiten clasificar tipos de fuego son la frecuencia, intensidad, patrón espacial, estacionalidad y severidad (Brown y Smith, 2000). La rápida evolución de estas variables requiere de una continua actualización de la información territorial. La teledetección ayuda a entender estos patrones, proporcionando in-

formación de alta frecuencia temporal que permite abarcar grandes áreas, y a estudiar series de tiempo largas (Anaya, 2009). Sumado a lo anterior, el análisis de diferentes variables derivadas de datos de teledetección y terreno (Chuvieco, 2002) resultan de particular interés para la ecología del fuego (Ayanz *et al.*, 2003). Estos resultados pueden expresarse como cartografía de niveles

PALABRAS CLAVE / Cartografía del Fuego/ CONAE / ESA / Humedales / INPE / MODIS / Río Paraná / Software R /

Recibido: 01/10/2012. Modificado: 11/09/2013. Aceptado: 09/10/2013.

Lisandra Pamela Zamboni. Licenciada en Biodiversidad y Magister en Conservación y Gestión del Medio Natural, Universidad Nacional del Litoral, Argentina. Docente - Investigador, Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER), Argentina. Dirección: Centro Regional de Geomática. (CeReGeo), UADER. España y Materi SN. Diamante. CP 3105. Entre Ríos, Argentina. e-mail: pamelazamboni@gmail.com

Fernando R. Tentor. Ingeniero Agrónomo, UADER, Argentina. Profesor, UADER, Argentina.
Walter F. Sione. Doctor en Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Luján, Argentina. Profesor, UADER, Argentina.

Leonardo Hardtke. Licenciado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de la Patagonia "San Juan Bosco", Argentina. Becario Doctoral, UADER, Argentina.

Héctor F. Del Valle. Doctor en Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina. Investigador, Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET), Argentina.

Ignacio Quignard. Licenciado en Biología, UADER, Argentina. Docente y Becario Doctoral, UADER, Argentina.

Pablo G. Aceñolaza. Doctor en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Profesor, UADER, Argentina.

de peligro, y son comúnmente integrados a sistemas de información geográfica destinados al manejo del fuego (Allgöwer *et al.*, 2003).

Dentro de esta gama de herramientas, el seguimiento de la ocurrencia de incendios mediante focos de calor (FC), es frecuentemente empleado para implementar un sistema de alerta temprana (Palacios *et al.*, 2007). Numerosos sensores proporcionan mapas de FC, y su uso es cada vez mayor por parte de los organismos encargados de la gestión del territorio. Cada tipo de sensor posee características (resoluciones espacial, temporal, espectral y radiométrica) y modos de procesamiento de los datos, por lo que arrojan diferente tipos de información. Estos datos se encuentran disponibles en forma libre en distintos sitios web (agencias espaciales, universidades, institutos de ciencia y tecnología, etc.).

En este contexto es conveniente, de acuerdo a los objetivos del presente trabajo, diferenciar entre lo que entendemos por foco de calor y por incendio. Un 'foco de calor' es una expresión que se utiliza para referirse a una anomalía térmica detectada en el terreno por un sensor remoto (España, 2002), que puede o no corresponder a un incendio, y que se diferencia netamente de las más bajas temperaturas de los pixels de su entorno. Por otro lado, entendemos por 'incendio' a la agrupación de aquellos focos de calor que se presentan asociados en un determinado tiempo y espacio, de forma tal que es posible interpretar que todos esos focos de calor forman parte de un mismo evento de incendio. El grado de asociación en el tiempo y el espacio para agrupar FC en incendios depende en mayor medida de criterios que se expresan en los algoritmos desarrollados para tal fin (Hardtke *et al.*, 2011). El conocimiento del terreno y de la ecología de los incendios en la región es asimismo útil en la construcción de dichos algoritmos. Los objetivos del presente trabajo fueron: comparar series históricas de FC detectados por diferentes sensores y fuentes de consulta (CONAE, INPE y ESA); estudiar los FC de los diferentes sensores a fin de identificar aquellos de mejor funcionamiento para el área de estudio; desarrollar un algoritmo que permita interpretar como incendios los

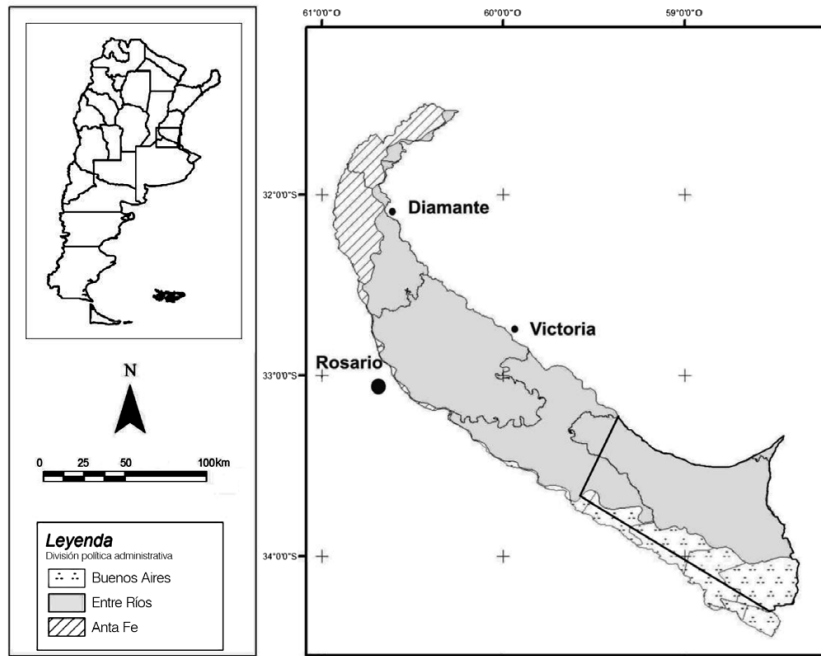


Figura 1. Área de estudio, correspondiente al Complejo Litoral del Río Paraná, Argentina. Se observa la delimitación del área de estudio, de acuerdo a las jurisdicciones administrativas (Provincias y Departamentos/Partidos). En recuadro negro, el área de validación delimitada para evaluar la detección de focos de calor de diferentes sensores remotos. Corresponde a un recorte del área de estudio.

FC; identificar patrones espaciales y temporales de ocurrencia de incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná; y analizar la ocurrencia de incendios del área de estudio en relación a la dinámica hidrológica.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) corresponde al Complejo Litoral del Río Paraná, Argentina. Esta región ha sido caracterizada desde diferentes aspectos por diferentes autores. Iriondo (2004), Iriondo *et al.* (2007), Drago (2007) y Aceñolaza *et al.* (2008b), entre otros, describieron su geomorfología y las características de su dinámica fluvial. Kandus *et al.* (2003), Zamboni y Aceñolaza (2004, 2005), Aceñolaza *et al.* (2006, 2007, 2009, 2010), Vicari *et al.* (2006) y Pratolongo *et al.* (2008) realizaron aportes sobre las tasas de producción y descomposición de materia orgánica y almacenaje de carbono. Bó (2006) caracterizó la ecorregión Delta e islas del Paraná. Malvárez (1999), Kandus *et al.* (2003), Aceñolaza *et al.* (2004, 2005, 2008a), Rodríguez *et al.* (2007) y Franceschi *et al.* (2010), entre otros, describieron la vegetación. En cuanto al estudio del fuego en la región, Sione *et al.* (2009) estimaron las emisiones de CO₂ a partir de información de terreno y teledetección. Los aportes de los mencionados autores fueron tenidos en cuenta para definir los algoritmos,

umbrales, y demás criterios de decisión adoptados en el presente trabajo.

Área de validación

Al interior del área de estudio fue delimitada, tomando en cuenta la disponibilidad y volumen de procesamiento de los datos, un 'área de validación' representativa del Complejo Litoral del Río Paraná (Figura 2), para evaluar la eficiencia en las detecciones de FC de diferentes sensores remotos y fuentes de consulta.

Metodología

Análisis de FC por sensor y fuentes de consulta

Para estudiar los mapas de ocurrencia de focos de calor (FC) del Complejo Litoral del Río Paraná, se han descargado datos de distribución libre de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE; www.conae.gov.ar) y la Plataforma MODIS (sensores Terra y Aqua) del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE; www.inpe.gov.br), abarcando los sensores diurnos MOD01, NOAA12, NOAA 15, NOAA16, NOAA 18, Terra, y Aqua; y los nocturnos: NOAA 12, NOAA 14, NOAA 15, NOAA 16, NOAA 17, GOES 10-12, Terra, y Aqua, así como de la Agencia Espacial Europea (ESA; www.esa.int) incluyendo sensor ATSR, satélite ERS, y algoritmos 1 y 2. Los algoritmos empleados para la construcción de los FC han sido revisados por diferentes autores (Giglio *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003; Palacios *et al.*, 2007). Descripciones generales sobre el funcionamiento y características de las plataformas y sensores han sido asimismo proporcionadas por Chuvieco (2002). Los períodos descargados corresponden a los datos disponibles por tipo de sensor y año, por lo que comprenden toda la base de datos existente hasta el año 2009 (Tabla I). Se analizó la distribución de los datos de FC y se realizaron pruebas de varianza para determinar si las cantidades de FC detectados presentaban o no diferencias significativas entre las fuentes y sensores empleados.

Efectividad de los FC según sensor y fuente de consulta

Se determinó para el área de validación (Figura 2) el porcentaje de

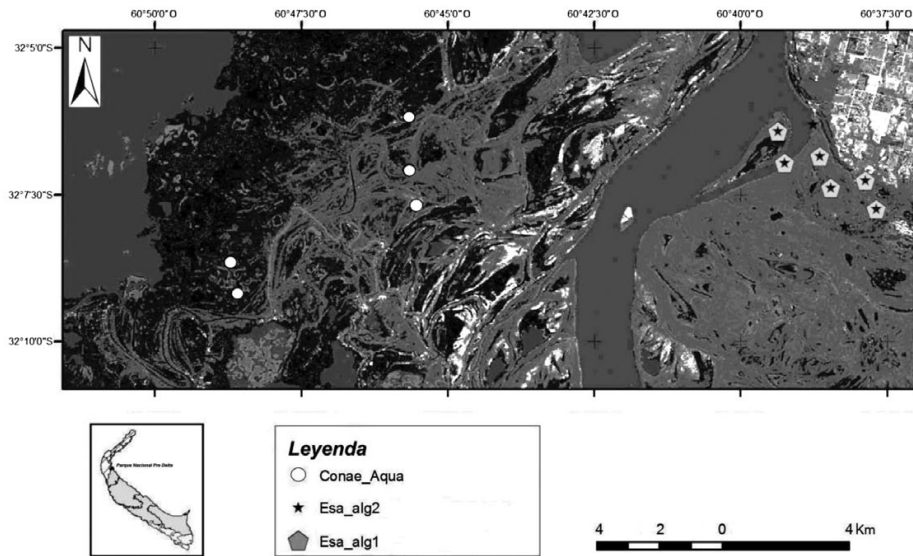


Figura 2: Área de validación delimitada para evaluar la detección de FC de diferentes sensores remotos. Corresponde a un recorte del área de estudio (Figura 1). Se observa en la leyenda la información de la imagen (sensor Landsat 5 con fecha de 04/06/2006, path 225 row 83).

aciertos por sensor, tomando como base imágenes Landsat 5 TM (descargadas de forma libre del sitio web de INPE) y estimando la correspondencia entre FC y áreas quemadas. Estas áreas fueron identificadas visualmente en imágenes satelitales y en terreno. Dada la alta regeneración post-incendio de la cobertura vegetal en el área de estudio (Zamboni y Aceñolaza, 2005; Aceñolaza *et al.*, 2010), se realizaron ensayos usando ventanas temporales mayores, y se seleccionaron aquellos FC que se detectaron hasta 30 días antes de la fecha de adquisición de la imagen.

Una vez identificado el sensor con mayor porcentaje de aciertos, se realizaron análisis estadísticos a fin de cono-

cer la distribución de los datos de FC y evaluar posibles diferencias estadísticas en la ocurrencia de los FC (años, meses). Considerando como variable la cantidad de FC del sensor con mayor porcentaje de eficiencia en las detecciones, por año, para el período 2004-2009, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks modificada (SW) (Infostat, 2008). Lo mismo se realizó para los FC mensuales para el período de interés, con $n=72$. Ambas pruebas indicaron que los datos no presentan distribución normal. Posteriormente se realizaron transformaciones de los datos (\log_{10} , raíz cuadrada) y se efectuaron nuevas pruebas de normalidad (SW). El valor resultante indicó que la distribución de los datos (inclusive transformados) no co-

rresponde a una curva normal, por lo que se resolvió emplear el test de Kruskal Wallis (KW), que permite realizar un análisis de varianza no paramétrico (Infostat, 2008). El nivel de significancia en todas las pruebas fue de 0,05.

Ocurrencia de incendios a partir de FC

Como se expresó en la introducción, la duración de un incendio fue definida como la diferencia de tiempo entre el primer y el último FC de cada grupo de incendio, y su extensión, de acuerdo a la cantidad de FC por grupo (Hardtke *et al.*, 2011). A mayor agrupación espacial de FC se asume mayor 'tamaño' del incendio, y a mayor tiempo transcurrido desde el primer al último foco de calor mayor 'duración del mismo, para un espacio y período dados (Palacios *et al.*, 2007).

Así, al conjunto de FC del sensor con mayor porcentaje de aciertos se le aplicó un algoritmo matemático, empleando el software estadístico de distribución libre 'R' (R Development Core Team, 2008), que permitió agrupar los FC en grupos (incendios), definiéndose como umbral espacial un radio de ~8km, y una separación temporal de 36h. Del mismo modo que con los FC, se exploraron las medidas descriptivas, se realizó una prueba de normalidad de SW que indicó la no normalidad de los datos, aún transformados (\log_{10} y raíz cuadrada), por lo que se realizó el análisis de varianza mediante la prueba KW.

Estos análisis posibilitaron caracterizar la ocurrencia de incendios en base a la cantidad (número de grupos/incendios identificados), su duración media (relación entre la hora del primer y del último foco de calor de un grupo), tamaño (cantidad de FC por incendio) y estacionalidad (mes/ estación climática de ocurrencia de un incendio).

Relación ocurrencia temporal de incendios / altura del río Paraná

Una vez identificados los patrones temporales de ocurrencia de incendios, se analizó la relación con la altura del río, para el período 2004-2008. Los datos fueron proporcionados por personal de la Prefectura Naval Argentina (Delegación Paraná Medio) y corresponden a promedios mensuales de altura del río para el Puerto Diamante, Entre Ríos, Argentina. Se ha optado por tomar los datos de este puerto debido a que está ubicado

TABLA I

FOCOS DE CALOR DISPONIBLES EN LOS SITIOS WEB CONSULTADOS, DISCRIMINADOS POR SENSOR, FUENTE CONSULTADA Y AÑO. SE HA CONSIDERADO COMO PERÍODO, LA PRIMERA FECHA DE ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CADA UNO DE LOS SENSORES HASTA EL AÑO 2009

Sensor/ Año	GOES		MODIS		NOAA								MODIS	ERS	
	12	10	01D	12	12D	14	15	15D	16	16N	17	18	18D	Terra /Aqua	Alg1/ Alg2
1997															ESA
1998															ESA
1999															ESA
2000															ESA
2001															ESA
2002															ESA
2003														INPE CONAE	ESA
2004	INPE			INPE					INPE					INPE CONAE	ESA
2005	INPE			INPE INPE			INPE INPE INPE					INPE INPE INPE	CONAE	ESA	
2006	INPE		INPE	INPE INPE INPE		INPE INPE				INPE INPE INPE INPE		CONAE	ESA		
2007		INPE INPE	INPE	INPE INPE INPE		INPE INPE				INPE INPE INPE INPE		CONAE	ESA		
2008		INPE INPE				INPE INPE INPE INPE		INPE INPE INPE INPE		CONAE	ESA				
2009		INPE INPE				INPE INPE INPE INPE		INPE INPE INPE INPE		CONAE	ESA				

en el centro el área de estudio. Se realizó un análisis de correlación (Spearman) entre los datos medios mensuales de altura del río y los valores medios de ocurrencia de incendios, para el período 2004-2008.

Resultados

Análisis de FC según fuente de consulta y sensor

Los sensores analizados detectaron para el área de estudio diferentes cantidades de FC (Tabla II). Los sensores de la ESA (con datos disponibles desde 1997) subestimaron en términos generales los FC, mientras que los de INPE estimaron cerca del 50-60% de los FC detectados por CONAE. Los datos MODIS presentaron diferencias en las identificaciones para cada una de las fuentes consultadas (INPE y CONAE) para similares períodos, atribuibles a los propios modos de procesar los datos. Así, el sensor Terra presentó 3009 y 3254 FC respectivamente para CONAE e INPE. El sensor Aqua detectó más cantidad de FC que Terra (8407 CONAE Aqua y 4270 INPE Aqua). Siguiendo lo expresado en metodología, los datos presentaron distribución normal (SW: $W=0,64$; $p<0,05$), por lo que se realizó el test de KW, que indicó que las diferencias observadas no resultaron estadísticamente significativas (KW: $H=18,32$; $p=0,1924$; $n=62$; $\alpha=0,05$).

Evaluación de la efectividad de los FC según sensor y fuente de consulta

Considerando el área de validación, los sensores Aqua y Mod01D reportaron la mayor cantidad de FC, y a la vez presentaron un porcentaje de acierto (efectividad) $>90\%$. Debido a la diferencia de períodos disponibles de datos, se compararon solamente en este análisis los años 2006 y 2008 (Tabla III). Los restantes sensores, si bien ofrecen altos porcentajes de acierto, subestiman la ocurrencia de FC. Resultados similares se han reportado en otros estudios (Palacios *et al.*, 2007).

Por otro lado, tomando en cuenta los resultados y contribuciones previas (Zamboni y Aceñolaza, 2005) en el área de estudio, se analizó una situación puntual a partir de incendios

ocurridos en el Parque Nacional Predelta (PNPD; $32^{\circ}03'43''S$, $60^{\circ}38'39''O$; www.protectedplanet.net), espacio natural protegido

inserto en el área de estudio. Tal como se expresa en la Figura 2, el sensor de la ESA (algoritmos 1 y 2) identificó FC para el área correspondiente al PNPD en septiembre de 2004, fecha en la que autoridades del mencionada área protegida declararon haber identificado incendios. Estos FC no fueron detectados por el resto de los sensores, indicando la potencialidad del uso complementario de este tipo de información.

Patrón de ocurrencia de FC del Sensor CONAE Aqua

A partir de los resultados previos, se seleccionaron los datos de FC del sensor CONAE Aqua correspondientes al período 2004-2009, para estudiar su patrón espacio-temporal de ocurrencia. Las medidas descriptivas se aprecian en la Tabla IV, donde destacan los valores más altos para el año 2008. Los resultados de las pruebas de KW, realizadas posteriormente a las pruebas de SW indicaron que, al considerar como criterios de clasificación la variable 'años', existen diferencias significativas ($p<0,0001$; $H=32,5$, $n=72$) entre los diferentes años del período estudiado para los FC detectados por el sensor CONAE Aqua, de acuerdo lo presentado en la Tabla IV. La matriz de resultados de la prueba de KW (Tabla V) indicó entre cuales años se encontraron estas diferencias.

En cuanto al patrón temporal de ocurrencia de los FC del sensor CONAE Aqua, en la Figura 3 se observa la variación desde 2004 a 2009. Los años 2004, 2006 y 2008 presentaron un mayor número de FC, si bien estas diferencias son significativas solo entre algunos de los años, tal como se aprecia en la Tabla V.

Luego de obtenidos los resultados de la prueba de normalidad (SW; $W=0,58$; $p<0,0001$; $n=72$) y considerando solamente la cantidad de FC de acuerdo a los meses en que ocurren, la prueba de KW indicó que no existen diferencias significativas (KW: $H=13,93$; $p=0,2343$; $N=72$). Sin embargo se aprecia que los meses de agosto, septiembre y octubre presentan mayores valores medios de ocurrencia de FC (Figura 4). Al considerar las medianas, los meses de agosto y septiembre son

TABLA II
CANTIDAD DE FOCOS DE CALOR DETECTADOS POR SENSOR Y FUENTE DE CONSULTA*

Fuente	Sensor	Período de estudio	Total
CONAE	Terra	2004 – 2009	3009
	Aqua	2004 – 2009	8407
ESA-ERS	Alg 1	03/1997 – 2009	543
	Alg 2	1997 – 2009	1363
INPE	INPE Aqua	2004 – 2009	4270
	INPE Terra	2004 – 2009	3254
	INPE Goes 12	2004 – 2006	628
	INPE modis 01 D	04/2006 – 2008	5396
	INPE NOAA 12	2004 – 06/2007	2627
	INPE NOAA 12D	03/2005 – 04/2007	38
	INPE NOAA 14	05/2006 – 04/2007	94
	INPE NOAA 15	10/2005 – 2008	267
	INPE NOAA 15D	10/2005 – 09/2009	33
	INPE NOAA 16	12/2004 – 2009	321
	INPE NOAA 16N	10/2008 – 2009	2
	INPE NOAA 17	2006 – 08/2009	404
	INPE NOAA 18	09/2005 – 10/2009	2025
	INPE NOAA 18D	09/2005 – 08/2009	204
	INPE Goes 10	08/2007 – 10/2009	2163

* Se indica el año y/o mes/año correspondiente al período estudiado.

TABLA III
EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LAS DETECCIONES DE FC DE DIFERENTES SENSORES Y FUENTES DE CONSULTA, CORRESPONDIENTE AL PERÍODO 2006-2008, Y AL TOTAL (SUMA DE 2006 Y 2008), PARA EL ÁREA DE VALIDACIÓN PROPUESTA

Año	Fuente	Sensor	Detecciones	Precisión	Precisión (%)
2006	CONAE	Aqua	26	22	85
		Terra	0	nc	nc
	ESA	Algoritmo 1	0	nc	nc
		Algoritmo 2	0	nc	nc
	INPE	Aqua	31	19	61
		Terra	1	1	100
Mod01D		22	20	91	
NOAA15		1	0	0	
		NOAA18	18	5	28
	CONAE	Aqua	101	95	94
		Terra	23	22	96
2008	ESA	Algoritmo 1	4	3	75
		Algoritmo 2	5	3	60
	INPE	Aqua	32	32	100
		Terra	23	21	91
		Mod01D	141	129	91
		NOAA15	16	15	94
		NOAA18	82	60	73
CONAE	Aqua	127	117	92	
	Terra	23	22	96	
ESA	Algoritmo 1	4	3	75	
	Algoritmo 2	5	3	60	
Total	CONAE	Aqua	63	51	81
		Terra	24	22	92
	INPE	Mod01D	163	149	91
		NOAA15	17	15	88
		NOAA18	100	65	65

TABLA IV
MEDIDAS DESCRIPTIVAS DE LOS FC DETECTADOS POR EL SENSOR CONAE Aqua PARA EL ÁREA DE ESTUDIO DURANTE EL PERÍODO 2004-2009*

Año	Variable	n	Media	Intervalo de confianza (IC)	Total
2004	Nº de incendios	12	78,17	94,55	938
2005	Nº de incendios	12	22,75	111,11	273
2006	Nº de incendios	12	78,58	126,23	943
2007	Nº de incendios	12	3,58	156,72	43
2008	Nº de incendios	12	130,75	55,92	1569

* Se aprecian asimismo los valores de la prueba de KW para los FC detectados.

los que resaltan. Al incluir como criterio las variables 'año' y 'mes', no se aprecian diferencias significativas ($H=70,78$; $p=0,4777$; $N=72$), si bien destacan los mayores valores de los meses señalados previamente (principalmente agosto, septiembre y octubre, aunque también en enero).

2004 y 2006 se alcanza al 90% de los incendios del Complejo Litoral del Río Paraná para el período de interés (Tabla VI).

La prueba de normalidad indicó que la distribución de los datos de incendios en el período estudiado es no normal ($W=0,77$; $p<0,0001$; $n=60$). Si

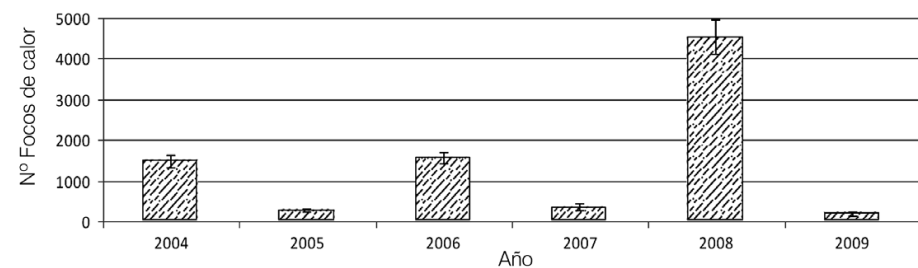


Figura 3. Patrón de distribución temporal de los FC de CONAE Aqua período 2004-2009.

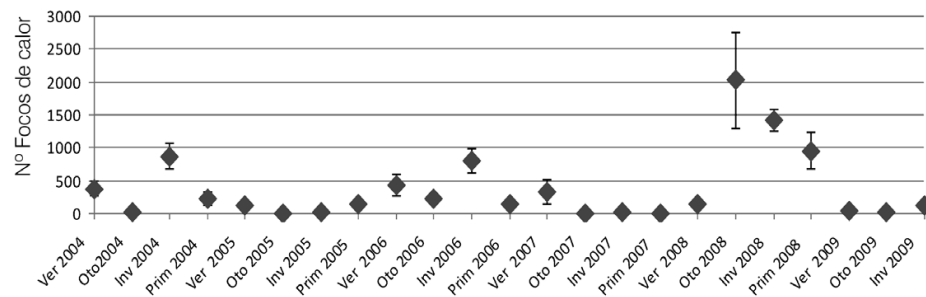


Figura 4. Ocurrencia estacional de FC (Sensor CONAE Aqua) para el período 2004-2009. Corresponde a los números totales de FC por estación climática y año. Las barras de error expresan los intervalos de confianza ($n=60$, $\alpha=0,05$).

Patrón de ocurrencia de incendios a partir de mapas de FC

De acuerdo a los resultados previos, se seleccionó un conjunto de datos de la base de FC del sensor CONAE Aqua, interpretados como 'Incendios ocurridos entre 2004 y 2008 para el Complejo Litoral del Río Paraná'. Bajo el supuesto que incendios de gran tamaño suelen ir unidos a una cubierta vegetal continua y extensa (Huston, 1994), hemos desarrollado un algoritmo que permite interpretar los FC en términos de incendios. Como resultado se identificaron más de 3500 incendios, de los cuales cerca de la mitad ocurrió en el año 2008, mientras que al considerar también los años

bien se aprecia que los años 2005 y 2007 presentaron un número sustancialmente menor de incendios, estas diferencias son

TABLA V
MATRIZ RESULTANTE DE LA PRUEBA KW PARA LOS FC DETECTADOS POR AÑO POR EL SENSOR CONAE Aqua PARA EL ÁREA DE ESTUDIO DURANTE EL PERÍODO 2004-2009

2004	2005	2006	2007	2008	2009
2004			*		*
2005	sd	*		*	
2006	sd		*		*
2007	sd	sd	sd		
2008	sd	sd	sd	sd	*
2009	sd	sd	sd	sd	sd

Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas (DES).

estadísticamente significativas (DES: $H=31,94$; $p<0,0001$; $n=60$) solo entre algunos de los años estudiados (período 2004-2008), tal como se observa en la Tabla VII. No se observaron DES entre los años 2005 y 2006.

Al considerar la ocurrencia mensual de incendios para todo el período estudiado (KW: $H=1,096$; $p=0,4446$; $n=60$) y para cada uno de los años estudiados, no se observan DES (KW: $H=58,86$; $p=0,475$; $n=60$). Si bien estacionalmente se aprecia que cerca de la mitad de los incendios ocurren en invierno (Figura 5), y en primavera para el caso de 2006 (Figura 4) estas diferencias no son estadísticamente significativas (KW: $H=6,83$; $p=0,0769$; $n=60$). En el caso del año 2008, si bien en términos generales se han identificado mayor cantidad de incendios, se ha registrado un aumento de los incendios otoñales, que responden posiblemente a causas diferentes a las del resto de los incendios. En relación a la distribución mensual de incendios, tal como lo refleja la Figura 6, los meses de agosto, septiembre y octubre son los de mayor ocurrencia.

Considerando los patrones temporales de ocurrencia de incendios, la Figura 7 muestra la relación entre número total mensual de incendios detectados y altura del río, para el período 2004-2008. El análisis de correlación de Spearman sugiere que existe una correlación negativa entre los datos de altura media mensual del río y el nú-

TABLA VI
MEDIDAS DESCRIPTIVAS DE LOS INCENDIOS DETECTADOS POR EL SENSOR CONAE Aqua PARA EL ÁREA DE ESTUDIO (PERÍODO 2004-2008)*

Año	Variable	n	Media	Intervalo de confianza (IC)	Total
2004	Nº incendios	12	78,17	94,55	938
2005	Nº incendios	12	22,75	111,11	273
2006	Nº incendios	12	78,58	126,23	943
2007	Nº incendios	12	3,58	156,72	43
2008	Nº incendios	12	130,75	55,92	1569

* Se indican los valores medios, desvíos estándar (DE), mínimos, máximos y totales de incendios por año.

TABLA VII
MATRIZ RESULTANTE DE LA PRUEBA KW PARA INCENDIOS DETECTADOS POR EL SENSOR CONAE Aqua, PERÍODO 2004-2008

2004	2005	2006	2007	2008
2004	*		*	
2005	sd			*
2006	sd	sd	*	
2007	sd	sd	sd	*
2008	sd	sd	sd	sd

Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas (DES).

mero de incendios ocurridos en el período 2004-2008 (correlación Spearman= -0,39, $p=0,0023$, $n=60$).

Características de los incendios (2004-2008)

En cuanto a las características de los incendios, la duración media fue de 1,96h, con un máximo de 35h e incendios de un tiempo medio de duración <1h, alcanzando los incendios de abril a octubre de 2008 las 80-100h de duración máxima (Figura 8). En abril 2008 las duraciones máximas de los incendios fueron cercanas a las 260h. En promedio para el período, la duración fue mayor en los meses de verano y de invierno-primavera. El pico en el mes de abril corresponde a los altos valores de abril 2008, y los de febrero a los de 2006.

La cantidad media de FC por incendio fue <4 (Figura 9), a excepción de abril 2008 (12 focos por incendio de promedio y máximo de 500). Esto indica la existencia de incendios de diverso tamaño y duración, de acuerdo a los criterios de Huston (1994), quien expresa que a mayor agrupación de FC se asume mayor 'tamaño' del incendio.

Discusión

Focos de calor por sensor y fuente consultada

En relación a la disponibilidad de mapas de FC, los datos de la ESA, si bien subestiman la ocurrencia de incendios, proporcionan información de forma regular desde el año 1997, mientras que sensores de INPE y CONAE lo hacen a partir de 2003. Algunos de los sensores de INPE han dejado de proveer información, por lo que su empleo se ve limitado para aquellos estudios que requieren de series históricas. La comparación de la información provista por diferentes sensores se ve limitada por la disponibilidad temporal de dichos datos. De todos modos, el uso de la información provista por los diferentes sensores puede generar sinergias positivas al ser empleada de forma complementaria.

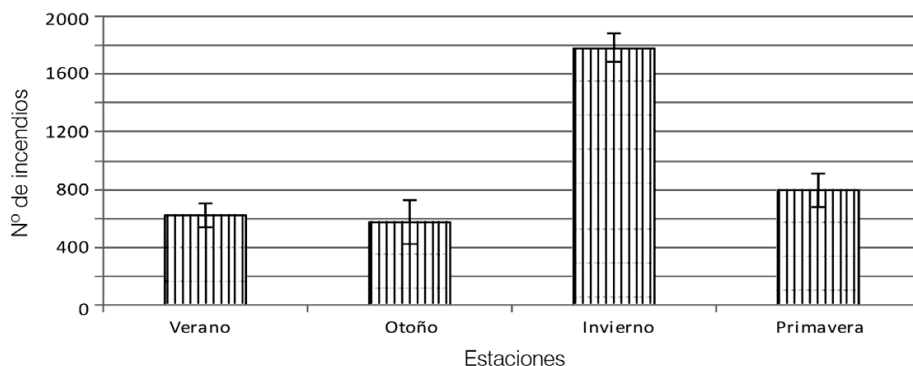


Figura 5. Ocurrencia estacional de incendios (CONAE-Aqua, 2004-2008). Las barras de error expresan los intervalos de confianza ($n=15$, $\alpha=0,05$). Se presentan los valores totales de incendios por estación climática para el período estudiado.

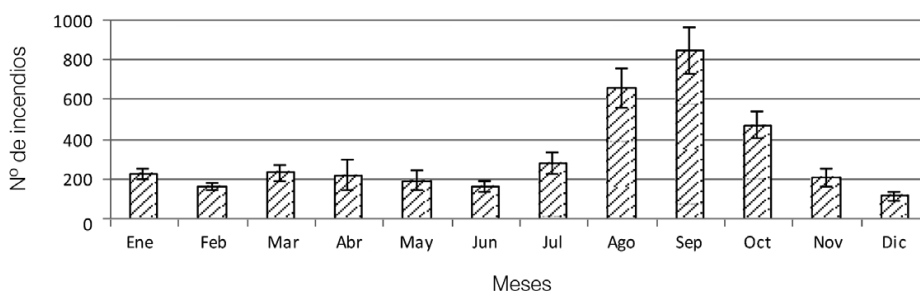


Figura 6. Ocurrencia mensual de incendios (CONAE Aqua, 2004-2008). Las barras de error expresan los intervalos de confianza ($n=15$, $\alpha=0,05$). Se presentan los valores totales de incendios por mes para el período estudiado.

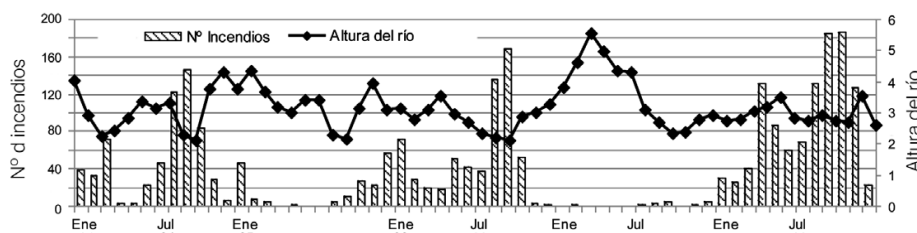


Figura 7. Patrón mensual de ocurrencia de incendios en relación a la altura del río Paraná en la localidad de estudio, para el período 2004-2008.

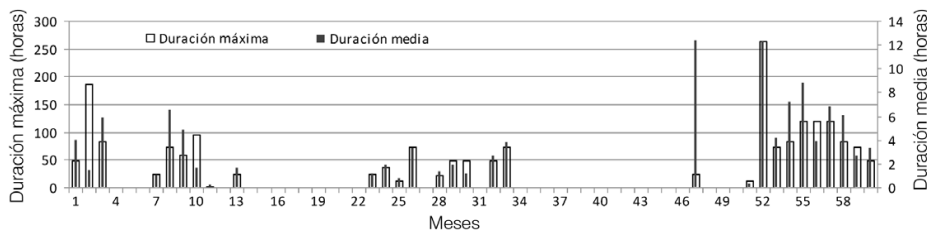


Figura 8. Duración máxima (escala izquierda) y media (escala derecha) de incendios, expresado en horas, por mes, para el período de estudio.

Considerando la disponibilidad, accesibilidad, calidad de información, entre otros parámetros, y de acuerdo a los resultados de la evaluación de las detecciones de los diferentes sensores, se puede afirmar que el sensor Aqua (provisto por la CONAE) es adecuado para estudiar la ocurrencia de FC en el Complejo

Litoral del Río Paraná. Resultados similares han sido reportados en otros estudios (Palacios *et al.*, 2007).

Patrones de ocurrencia de incendios

El algoritmo construido permitió interpretar como incendios los FC.

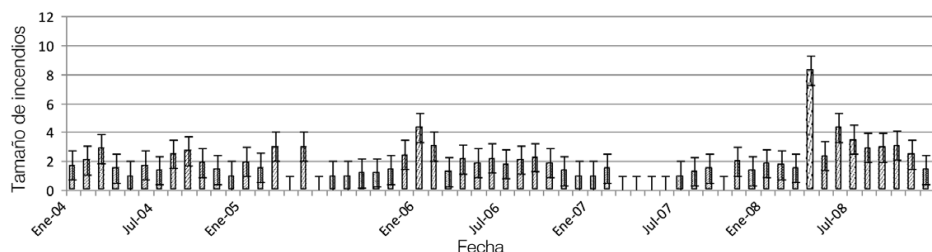


Figura 9. Tamaño medio de incendios, expresado en número de FC por grupo de incendio, por mes, para el período de estudio. Las barras de error indican los intervalos de confianza ($\alpha=0,05$). Se observa que la barra de error correspondiente al mes de abril de 2008 presentó un IC de 30, por lo que no ha sido incluido completamente en el gráfico.

La información del área de estudio disponible, generada tanto por el grupo de trabajo como por autores mencionados en el apartado de materiales y métodos, es fundamental para ajustar los protocolos de procesamiento de datos.

Se identificaron patrones espaciales y temporales de ocurrencia de incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná. Los patrones de ocurrencia deben ser estudiados en relación a otros procesos con fuerte incidencia regional, como es el caso de la disponibilidad de agua en el ecosistema (representada principalmente por el régimen fluvial y de precipitaciones). El conocimiento de las características de ocurrencia de los incendios, tales como su duración, principales fisonomías afectadas, tamaño, recurrencia y otras propiedades, permiten tipificar incendios, estableciendo intervalos y umbrales propios para el Complejo Litoral.

La ocurrencia de incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná es estacional invernal, aunque se han identificado otros períodos (otoño, primavera). Los incendios se caracterizan por ser de pequeño tamaño y corta duración, siendo mayores y más largos en los meses de temperaturas más altas. Los incendios ocurridos entre abril y octubre de 2008 se diferencian de los restantes por temporalidad de ocurrencia, su mayor tamaño y duración. La relativamente alta variabilidad (tanto intra como interanual) de los datos se adjudica en parte a la heterogeneidad ambiental y al accionar de factores (físicos, químicos, ambientales, antrópicos) asociados a la ocurrencia de los incendios.

Considerando la geopolítica en la que se integra el área de estudio, se ha obtenido información que indica que la mayoría de los incendios del Complejo Litoral de inundación ocurren en los departamentos de Islas del Ibicuy, Gualeguay y Victoria, provincia de Entre Ríos. Esta información debería tenerse en cuenta a la hora de la asignación de recursos para la gestión de incendios.

Estos resultados preliminares sugieren que los datos de FC emplea-

dos son adecuados para la detección de incendios ocurridos en el Complejo Litoral del Río Paraná, demostrando su importancia como una herramienta para la gestión de incendios (España, 2002).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Universidad Autónoma de Entre ríos (PIDA 1207-1208), ACTIER, PID-CONICET and ANPCyT. Los autores agradecen a CONAE, INPE, ESA, USDA y NASA por proveer los datos espaciales, y a UADER-FCyT-CeReGeo y CI-CyTTP-CONICET por proporcionar los recursos requeridos para la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

Aceñolaza PG, Povedano H, Manzano AS, Muñoz JDD, Areta I, Ronchi Virgolini AL (2004) Biodiversidad del Parque Nacional Pre-Delta. INSUGEO-CONICET. Tucumán, Argentina. Serie *Miscelánea* 12: 169-184.

Aceñolaza PG, Sione W, Kalesnik F, Serafini C (2005) Determinación de unidades homogéneas de vegetación en el Parque Nacional Pre-Delta (Argentina). INSUGEO-CONICET. Tucumán, Argentina. Serie *Miscelánea* 14: 81-90.

Aceñolaza PG, Zamboni LP, Gallardo JF (2006) Ciclos biogeoquímicos de bosques de la llanura de inundación del río Paraná (Argentina): Aporte de hojarasca. En Gallardo Lancho JF (Ed.) *Medioambiente en Iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los Albores del sXXI*. Tomo 2. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Badajoz, España. pp. 529-536.

Aceñolaza PG, Zamboni LP, Gallardo JF (2007) Estimación de Carbono en tres bosques de la llanura aluvial del Bajo Paraná (R. Argentina). En Gallardo Lancho JF (Ed.) *La Captura de Carbono en Ecosistemas Terrestres Iberoamericanos*. Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España. 39-45.

Aceñolaza PG, Povedano HS, Manzano AS, Rodríguez E, Sánchez L, Ronchi AL, Jiménez E, Demonte D, Marchetti Z (2008a) Biodiversidad de la región superior del Complejo Deltaico del Río Paraná. INSUGEO-CONICET. Tucumán, Argentina. Serie *Miscelánea* 17: 127-152.

Aceñolaza PG, Zamboni LP, Sione WF, Kalesnik (2008b) Caracterización de la región superior del Complejo Litoral del Río Paraná: Grandes

unidades de ambiente INSUGEO-CONICET. Tucumán, Argentina. Serie *Miscelánea* 17(2): 293-308.

Aceñolaza PG, Zamboni LP, Gallardo Lancho JF (2009) Ciclos biogeoquímicos de bosques de la llanura de inundación del Río Paraná (Argentina): Aporte de hojarasca. *Bosque* 30: 135-145.

Aceñolaza PG, Zamboni LP, Rodríguez E, Gallardo JF (2010) Litterfall production in forests located at the Pre-delta area of the Paraná River (Argentina). *Ann. For. Sci.* 67: 311-315.

Allgöwer B, Carlson JD, van Wagendonk JW (2003) Introduction to fire danger rating and remote sensing -Will remote sensing enhance wildland fire danger rating? En Chuvieco E (Ed.) *Wildland Fire Danger. Estimation and Mapping*. Series in Remote Sensing, Vol. 4. Singapur. pp. 1-19.

Anaya JA (2009) *Estimación Mensual de Emisiones por Biomasa Quemada para Colombia Basado en Imágenes de Satélite*. Tesis. Universidad de Alcalá. España. 181 pp.

Ayazn JSM, Carlson JD, Alexander M, Tolhurst K, Morgan G, Sneeuwjagt R (2003) Current methods to assess fire danger potential. En Chuvieco E (Ed.) *Wildland Fire Danger. Estimation and Mapping*. Series in Remote Sensing, Vol. 4. Singapur. pp. 21-61.

Bó RF (2006) Ecorregión Delta e islas del Paraná. En Brown A, Martínez Ortiz U, Acerbi M, Corcuera J (Eds.) *La Situación Ambiental de la Argentina 2005*. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. pp. 131-143.

Brown JK, Smith JK (2000) *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Flora*. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-42-Vol. 2. Rocky Mountain Research Station. Ogden, UT, EEUU. 257 pp.

Chuvieco E (2002) *Teledetección Ambiental*. Ariel. Barcelona, España. 568 pp.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW (2008) *InfoStat versión 2008*. Grupo InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Drago EC (2007) The physical dynamics of the river-lake floodplain system. En Iriondo MH, Paggi JC, Prma MJ (Eds.) *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. Springer. Berlin, Alemania. pp. 83-122.

España M (2002) *Información Espacial para la Gestión de Desastres: La Experiencia de la CONAE*. www.conae.gov.ar/WEB_Emergencias/Links_del_Cuerpo_Principal/Gestion_Desastres_Experiencia_Argentina.htm

Franceschi EA, Torres PS, Lewis JP (2010) Diversidad de la vegetación durante su recuperación tras una creciente extraordinaria del Río Paraná Medio (Argentina). *Int. J. Trop. Biol.* 58: 707-716.

Giglio L, Descloitres J, Justice C, Kaufman Y (2003) An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Int. J. Rem. Sens. Env.* 87: 273-282.

Hardtke LA, del Valle HF, Sione W (2011) Spatial distribution of wildfire risk in the Monte biome (Patagonia, Argentina). *J. Maps* 2011: 588-599.

Huston M (1994) *Biological Diversity: The Coexistence of Species on Changing Landscapes*. Cambridge University Press. Nueva York, EEUU. 681 pp.

INPE (2010) http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/v_anterior/documentos/relat_goes.htm

Iriondo M (2004) The littoral complex at the Paraná mouth. *Quat. Int.* 114. 143-154.

Iriondo MH (2007) Geomorphology. En Iriondo MH, Paggi JC, Prma MJ (Eds.) *The Middle Pa-*

- raná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. Springer, Berlin, Alemania. pp. 33-51.
- Kandus P, Malvárez AI, Madanes N (2003) Estudio de las comunidades de plantas herbáceas de las Islas Bonaerenses del Bajo Delta del Río Paraná (Argentina). *Darwiniana* 41: 1-16.
- Li Z, Fraser R, Jin J, Abuelgasim AA, Csiszar I, Gong P, Pu R, Hao W (2003) Evaluation of algorithms for fire detection and mapping across North America from satellite. *J. Geophys. Res.* 108: 4076.
- Malvárez AI (1999) El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En Malvárez AI (Ed.) *Tópicos sobre Humedales Subtropicales y Templados de Sudamérica*. MAB/UNESCO. Montevideo, Uruguay. pp. 35-53 pp.
- Palacios T, Villegas Z, Pinto C (2007) *Comparación de la Detección de Focos de Calor en Bolivia Usando Diferentes Fuentes (Período 2005-2006)*. Proyecto BOLFOR/Instituto Boliviano de Investigación Forestal. Santa Cruz, Bolivia. 40 pp.
- Pratolongo P, Kandus P, Brinson MM (2008) Net aboveground primary production and biomass dynamics of *Schoenoplectus californicus* (Cyperaceae) marshes growing under different hydrological conditions. *Darwiniana* 46: 258-269.
- R Development Core Team (2008) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. ISBN 3-900051-07-0. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. www.R-project.org.
- Rodríguez E, Aceñolaza P, Muñoz JDD, Marchetti Z (2007) Actualización de la lista florística del Parque Nacional Pre-Delta. *Bol. Soc. Arg. Bot.* 42: 97.
- Sione W, Aceñolaza P, Zamboni LP, del Valle HF, Serafini C, Gallardo Lancho JF (2009) Aplicaciones de la teledetección en la estimación de las emisiones de CO₂ a quemas de áreas insulares en el Complejo Litoral del Río Paraná (Argentina). En Alves JC, Conti, ME (Eds.) *Emisiones de Gases Efecto Invernadero en Ecosistemas Iberoamericanos*. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Salamanca, España. pp. 255-272.
- SMN (2011) Servicio Meteorológico Nacional. Argentina www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=50
- Vicari R, Kandus P, Pratolongo P, Burghi M (2006) Alteración en el almacenaje de carbono por la intervención humana de los sistemas naturales en el Bajo delta del Río Paraná. Su importancia en el balance emisión-sumidero de CO₂ atmosférico. En Brown A, Martínez Ortiz U, Acerbi M, Corcuera J (Eds.) *La Situación Ambiental de la Argentina 2005*. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. pp. 161-163.
- Zamboni P, Aceñolaza P (2004) Aporte al conocimiento de ciclos de materia orgánica (MO) en formaciones boscosas de la llanura de inundación del río Paraná. INSUGEO-CONICET. Tucumán, Argentina. Serie *Miscelánea* 12: 161-168.
- Zamboni P, Aceñolaza P (2005a) Aporte al conocimiento de la dinámica de materia orgánica en bosques de la porción baja de la Cuenca del Plata. Humedales Fluviales de América del Sur. Hacia un Manejo Sustentable. Fundación ProTEGER. Santa Fe, Argentina. pp. 535-541.
- Zamboni LP, Aceñolaza PG (2005b) *Efectos del Fuego sobre la Biomasa Vegetal en un Área del Predelta del río Paraná. (Entre Ríos, Argentina)*. Boletín de la Sociedad Argentinas de Botánica. 90 pp.

SPATIO-TEMPORAL FIRE PATTERNS IN THE OF THE PARANÁ RIVER COASTAL COMPLEX

Lisandra Pamela Zamboni, Fernando R. Tentor, Walter F. Sione, Leonardo Hardtke, Héctor F. Del Valle, Ignacio Quignard and Pablo G. Aceñolaza

SUMMARY

Fire occurrences at the of Parana River Coastal Complex during the 2004-2008 period were studied through hotspot data analysis. Spatial information from different remote sensors (MODIS, ERS, Goes, NOAA) and sources (CONAE, ESA, INPE) was evaluated. The MODIS Aqua sensor (downloaded and processed by CONAE), showed a high hotspot detection performance. For this sensor, an algorithm was developed that allows the interpretation of hotspot data as fire, applying previous knowledge of the fire behavior in the study area. Maps, tables and figures were elaborated. Descriptive statistics, normality (Shapiro Willks) and variance tests (Kruskal Wallis)

were carried out. No statistically significant differences (SSD) were founded between hotspots and fire occurrence to different months and seasons. SSD were found between 2004, 2006 and 2008 on the one hand, and 2005 and 2007 on the other. Taking into account these results, fires at the Paraná River Coastal Complex are, in general, of short duration and small extent, with a seasonal pattern of occurrence (in spring-summer), and vary from year to year. Exceptional periods (2008) can be identified by the changes of these parameters. This information is presented as a suitable tool for the study and management of fire in the study area.

PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DE INCÊNDIOS NO COMPLEXO LITORAL DO RIO PARANÁ

Lisandra Pamela Zamboni, Fernando R. Tentor, Walter F. Sione, Leonardo Hardtke, Héctor F. Del Valle, Ignacio Quignard e Pablo G. Aceñolaza

RESUMO

Tem-se estudado a ocorrência de incêndios no Complexo Litoral do Rio Paraná, Argentina (período 2004-2008), mediante a análise de focos de calor (FC). Avaliou-se informação espacial de diferentes sensores remotos (MODIS, ERS, Goes, NOAA) descarregados de diferentes fontes de consulta (CONAE, ESA, INPE). Os dados do sensor MODIS Aqua (descarregados e processados por CONAE) apresentaram a maior eficiência na detecção de FC. Para este sensor se desenvolveu um algoritmo que permitiu agrupar FC e interpretá-los como incêndios, integrando conhecimento prévio da região e do comportamento do fogo na área de estudo. Obtiveram-se mapas, tabelas e figuras. Realizaram-se estatísticas descritivas, teste de norma-

lidade (Shapiro Willks) e variação (Kruskal Wallis). Não se observaram diferenças estatisticamente significativas (DES) entre os FC e incêndios ocorridos nos diferentes meses ou estações estudadas. Encontraram-se DES entre os anos 2004, 2006 e 2008, e os anos 2005 e 2007. Tomando em conta os resultados obtidos, os incêndios do Complexo Litoral do Rio Paraná são em geral de curta duração e pequeno tamanho, com um padrão primavera-estival de ocorrência, e seu número varia significativamente entre anos. Períodos excepcionais, como o ano 2008, podem ser identificados pela variação de estes parâmetros. Esta informação se apresenta como uma ferramenta apropriada para o manejo do fogo na região.