

# La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones

C.M. Di Bella <sup>1,2</sup>, G. Posse <sup>1</sup>, M.E. Beget <sup>1</sup>, M.A. Fischer <sup>1</sup>, N. Mari <sup>1</sup>, S. Veron <sup>1</sup>

(1) Instituto de Clima y Agua - Instituto de Nacional Tecnología Agropecuaria (CIRN-INTA Castelar), Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

➤ Recibido el 29 de julio de 2008, aceptado el 11 de septiembre de 2008.

**Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas* 17(3):39-52.**

Los incendios y las inundaciones son dos de los disturbios que más frecuentemente afectan a la población humana y a los recursos naturales. La teledetección, a través de sensores remotos activos y pasivos, constituye una herramienta muy útil para el desarrollo de sistemas de prevención, seguimiento y evaluación a diferentes escalas espaciales y temporales. En este trabajo se reseñan algunos de los principales avances logrados en el campo de la teledetección de áreas quemadas e inundadas, y en el análisis de sus condiciones predisponentes y de su dinámica posterior a la perturbación. Se ha dado especial énfasis en describir los alcances y las limitaciones de algunos productos derivados de la teledetección que ya están disponibles para los usuarios en general.

Palabras clave: Información espectral, perturbaciones, ecosistemas, fuego, agua

**Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., Veron, S. (2008). Remote sensing as a tool for the prevention, monitoring and evaluation of fires and floods. *Ecosistemas* 17(3):39-52.**

Fires and floods are among the most frequent perturbations that negatively affect human societies and natural resources. The availability of prevention, monitoring and evaluation systems is therefore crucial to diminish their consequences. Active and passive remote sensing instruments are a valuable tool to achieve these goals because they provide information on different spatial and temporal scales. In this article we review the progress experienced in the field of remote sensing of burnt or flooded areas, its predisposing conditions and its post perturbation dynamics. Special emphasis is given to the description of the strengths and weaknesses of some of currently available remote sensing products.

Keywords: Spectral information, disturbs, ecosystems, fire, water

## Introducción

La dinámica actual de cualquier ecosistema es el resultado no sólo de las condiciones ambientales actuales, sino que es influida por las fluctuaciones y perturbaciones del pasado. El término "perturbación" o "disturbio" puede definirse como un evento más o menos discreto en el tiempo y en el espacio que altera la estructura de las poblaciones, de las comunidades o del ecosistema; produciendo cambios en la disponibilidad de recursos o en el ambiente físico (Pickett et al. 1999). Si el ecosistema ha evolucionado con determinados factores de disturbio, y éstos se presentan con cierta recurrencia, los disturbios formarán parte del sistema y existirán mecanismos de recuperación también recurrentes. En estos casos, se considera que el disturbio no es un evento externo al sistema sino que forma parte del mismo. Por esta razón, el disturbio debe ser definido en el contexto de las condiciones naturales y sus variaciones. Para ello se hace una revisión de los conceptos y avances metodológicos existentes en relación a cuestiones prioritarias para la evaluación de éstos dos fenómenos.

Los incendios tienen impacto a nivel local, regional y global. Anualmente, alrededor de 1,14 PgC de biomasa vegetal son consumidos por incendios de origen antrópico (Habert et al. 2007), y alrededor de 400-700 TgCO<sub>2</sub>, 20-80 TgCH<sub>4</sub> y 3-13 TgNO<sub>x</sub>, entre otros gases, son anualmente liberados a la atmósfera como consecuencia de la quema de dicha biomasa (Levine 1996, Habert et al. 2007). Los efectos de los incendios sobre la composición de especies y el balance de energía y agua dependerán principalmente de su severidad y daño. Los principales factores que favorecen el inicio de un incendio están asociados al origen de la energía de activación (naturales o antrópicas), mientras que la combustión, propagación y duración de los incendios son influenciadas principalmente por factores del medio ambiente (e.g. condiciones meteorológicas y topográficas, características del material combustible), e incluso por ciertos factores antrópicos como la accesibilidad y presencia de vías que actúen como calles 'cortafuego'.

Las inundaciones son uno de los fenómenos más dramáticos que afectan tanto a la población humana como a los recursos naturales. Generalmente, se las asocia a eventos meteorológicos extremos aunque muchas veces es la acción humana, con el mal manejo de las cuencas hídricas, la que favorece la ocurrencia y aumenta la duración o la intensidad de las inundaciones. Disponer de herramientas que permitan el seguimiento y mapeo en tiempo real de las áreas afectadas es importante al momento de determinar los alcances de la situación de emergencia, contar con estimaciones del área afectada, disminuir las pérdidas de vidas humanas o brindar información a las autoridades competentes para ajustar su plan de acción. El análisis de eventos históricos de este fenómeno, por su parte, asegura la generación de cartografías de vulnerabilidad para la planificación del uso del territorio.

La teledetección se define como la observación a distancia de los objetos, sin estar en contacto directo con ellos. Montados sobre distintas plataformas, los sensores remotos pasivos capturan la energía electromagnética proveniente del sol que es reflejada, así como la emitida por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda (Visible: 0,4-0,7  $\mu\text{m}$ , Infrarrojo Cercano: 0,7-1,3  $\mu\text{m}$ , Infrarrojo Medio: 1,3-8  $\mu\text{m}$ , Infrarrojo Térmico: 8-14  $\mu\text{m}$ ). Los sensores activos (sistema radar), por su parte, no dependen de la energía electromagnética del sol ni de las propiedades térmicas de la Tierra, sino que generan su propia energía electromagnética que: 1) es transmitida del sensor hacia el terreno independientemente de las condiciones atmosféricas (e.g. nubes); 2) interactúa con el terreno produciendo retrodispersión – energía reirradiada hacia el sensor-; y 3) es registrada por el receptor del sensor. Los principales controles de la retrodispersión captada por el sistema radar son la constante dieléctrica del medio y la rugosidad de la superficie. La constante dieléctrica es una medida de la capacidad de un material (e.g. vegetación, suelo, roca, agua, hielo, etcétera) de conducir energía eléctrica y está influenciado principalmente por su contenido de humedad. A mayor constante dieléctrica mayor será la cantidad de energía retrodispersada. La rugosidad describe la geometría de la interfase entre un sólido y el aire. Cuanto menos rugosa (o más "suave") sea una superficie menor será la retrodispersión debido a que esta superficie se comportará como un reflector especular. A medida que la superficie se vuelve más rugosa, la cantidad de energía reflejada tiende a ser similar en todas las direcciones.

El conocimiento de los patrones espectrales típicos de las distintas coberturas terrestres nos permite interpretar las imágenes provenientes de sensores remotos (ver Paruelo 2008). Por ejemplo, la vegetación vigorosa refleja muy poca energía en la región del visible, debido a la gran absorción por parte de las clorofilas para realizar la fotosíntesis, y refleja una alta proporción de la energía en la región del infrarrojo cercano, debido a la estructura característica de los tejidos de las hojas (Baret 1990; Guyot et al. 1992). Para resaltar estas características se construyen índices como el índice verde normalizado -IVN-, que combina información de la energía reflejada en la banda correspondiente al rojo y al infrarrojo cercano (Rouse et al. 1974; Bannari et al. 1995). Por su parte, el agua absorbe o trasmite la mayor proporción de la energía que recibe en el rango del visible. Cuando el agua es clara, la mayor reflectividad se produce en la banda correspondiente al azul. Si los cuerpos de agua son poco profundos, la energía reflejada dependerá de las características espectrales del fondo, como así también influirán los sedimentos o algas que tengan en suspensión (Bhargava y Marian, 1990 citado por Chuvieco 2002).

A partir de las características espectrales de las distintas coberturas de la superficie terrestre (firma espectral) se han desarrollado diversas aplicaciones asociadas a los eventos de inundación y de incendios. En términos generales, dichas aplicaciones pueden agruparse en: 1) la detección y cuantificación de las áreas afectadas, 2) el seguimiento o evaluación en tiempo real, 3) el análisis post evento, o 4) la prevención y la caracterización de las condiciones predisponentes.

## Incendios

### Detección de focos de calor

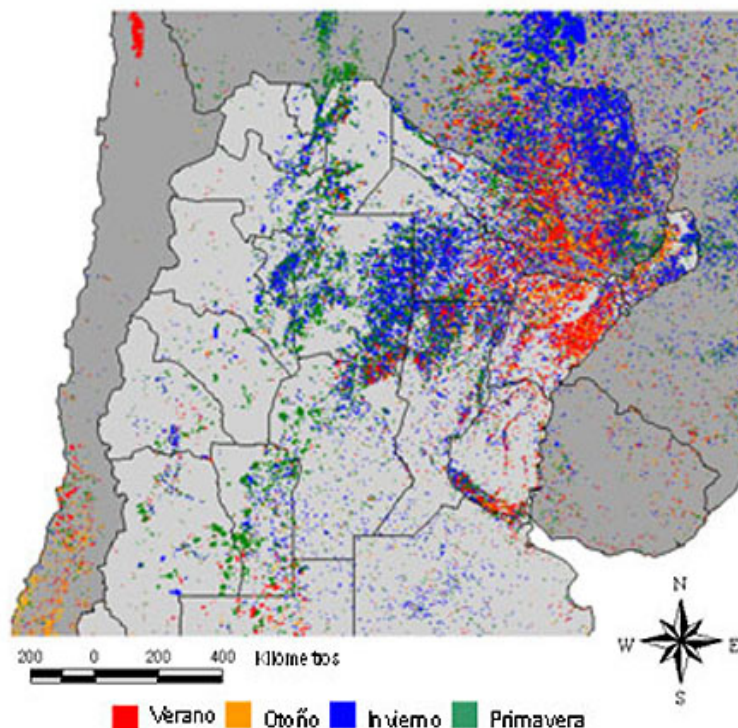
El término '*foco de calor*' se utiliza generalmente para definir un área que presenta una temperatura de superficie anómala. En la mayoría de los casos se asocia la presencia de un foco a la existencia potencial de un fuego o incendio. La detección de focos de calor se basa en la capacidad de algunos sensores remotos de capturar la energía emitida por la superficie en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo medio y térmico. De acuerdo a las temperaturas que alcanzan los incendios (entre 300 °C y 1500 °C de acuerdo al tipo de vegetación, combustible acumulado, condiciones ambientales, entre otras) se establecen los umbrales que permiten identificar los focos de calor (Giglio et al. 1999; 2003). Para evitar falsas detecciones, los algoritmos suelen incorporar el comportamiento espectral de las superficies vecinas (algoritmos contextuales). Por su

parte, la presencia de nubes, el horario de adquisición de la imagen o la geometría de observación pueden ocasionar errores de omisión. Esta metodología también puede mostrar fácilmente errores de sobreestimación del área afectada debido a la capacidad de los sensores de detectar incendios de menor tamaño que la unidad mínima de observación -píxel- e identificar la superficie en su totalidad como afectada.

A pesar de estas limitaciones, los productos de focos de calor generados a partir de distintos sensores y plataformas brindan considerables ventajas asociadas a la resolución espacio-temporal, la disponibilidad, y al nivel de cobertura que ofrecen. Por medio de su utilización se han elaborado cartografías y análisis: globales (Dwyer et al. 1999; 2000; Giglio et al. 2006), continentales (Di Bella et al. 2006), regionales (Justice et al. 2003; Fischer et al. 2007, Di Bella et al. 2008) y locales (Loboda y Csiszar 2007). Así también, a partir de la detección de focos de calor se han podido desarrollar productos que identifican los eventos de incendios (Fischer 2008). Un evento de incendio real, debido a sus características en cuanto a tamaño y duración, puede ser representado por más de un foco de calor. Es decir, los focos continuos en espacio y tiempo son considerados como parte de un mismo evento de incendio. A partir de este producto es posible analizar la frecuencia de incendios de gran tamaño y duración a escalas regionales e incluso globales.

Por su parte, es posible asociar los productos de focos de calor e incendios con cartografías de tipos de vegetación, condiciones climáticas, tipos de uso del suelo, características topográficas, entre otras (Di Bella et al. 2006). De esta forma, es posible conocer y analizar los factores del medio ambiente que influyen la ocurrencia y el comportamiento de los incendios o incluso evaluar la recuperación de los distintos ecosistemas después de su ocurrencia (Di Bella et al. 2006; Mari et al. 2006; Fischer 2008).

Actualmente existen numerosos productos disponibles gratuitamente que son elaborados con el objetivo de cuantificar y representar la ocurrencia de incendios: el 'Fire Information for Resource Management System' (FIRMS) desarrollado por la NASA, integra tecnología de sensores remotos y sistemas de información geográfica -SIG- para realizar productos globales, estacionales, anuales y casi en tiempo real de focos de calor/fuegos a partir de imágenes MODIS; el producto de 'mapas de Focos de Calor' provisto por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE) a partir de la información capturada por el sensor MODIS (**Fig. 1**); los productos de focos de calor generados por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE- (Brasil) a partir del uso de distintos sensores y plataformas satelitales (<http://sigma.cptec.inpe.br/>); y los productos de puntos de calor generados en México por la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad -CONABIO- (<http://www.conabio.gob.mx/>); entre otros.



**Figura 1.** Focos de Calor detectados con el sensor MODIS desde septiembre de 2003 a mayo de 2006 en las distintas estaciones del año (Fuente: CONAE).

## Cartografía de áreas quemadas

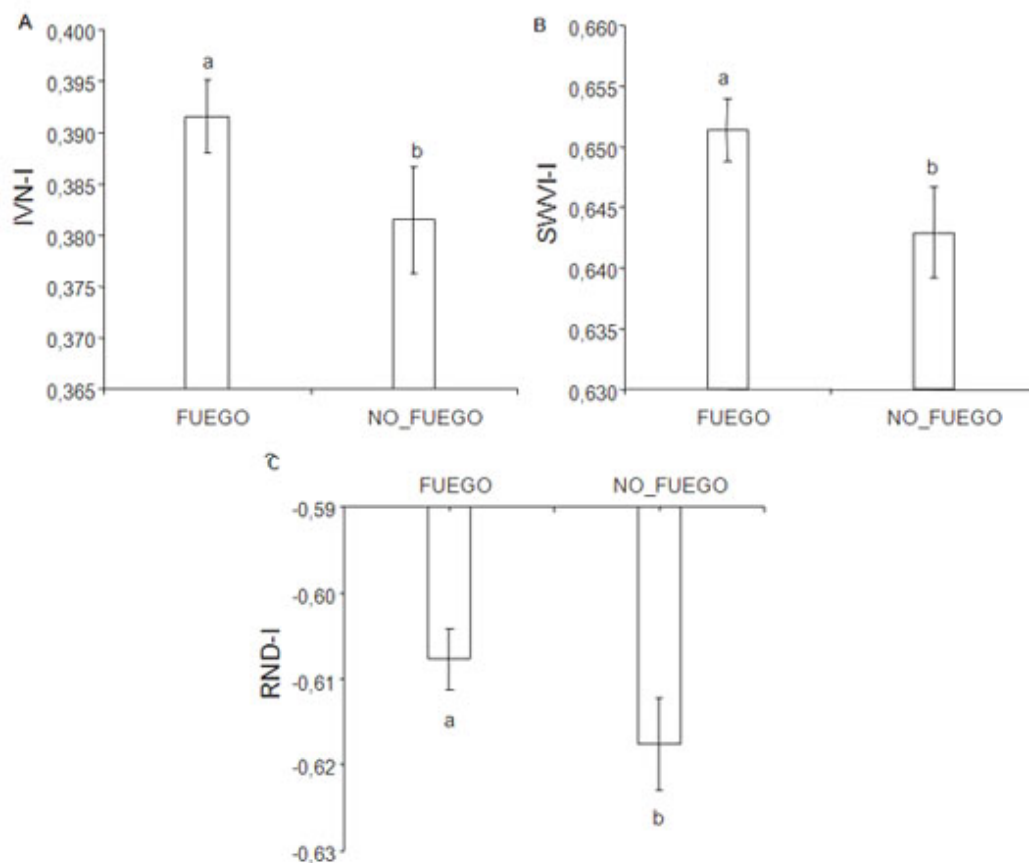
La detección de áreas afectadas por incendios se logra a partir de las diferencias que presentan las firmas espectrales de la vegetación quemada en contraste con la no quemada. Dichas diferencias responden principalmente a la disminución de la capacidad fotosintética de la vegetación (visible), el cambio en su estructura (infrarrojo cercano), la pérdida del contenido hídrico (infrarrojo medio), o incluso en la proporción de cenizas y carbón acumulados en superficie (visible e infrarrojo medio). Tales variaciones se manifiestan mediante un leve aumento de la energía reflejada en el espectro visible, una caída notable en la región del infrarrojo cercano, y un comportamiento más variable en la porción del infrarrojo medio (White et al. 1996 citado por De Santis y Chuvieco 2007). Los avances en las técnicas de detección se basan en la posibilidad de capturar las variaciones espectrales de la vegetación quemada tanto a nivel espacial como multi-temporal. Por otro lado, las mejoras de los sensores en cuanto a calibraciones, correcciones atmosféricas y detección de nubes, han mejorado la calidad de la detección y la cartografía de áreas quemadas (Roy et al. 2005). Diversos algoritmos basados en combinaciones de índices espectrales (e.g. NBR, BAI, IVN) se han desarrollado para la elaboración de productos y cartografías de áreas quemadas a diversas escalas: global, regional y local (Chuvieco et al. 2008). La importancia de estos productos radica en la posibilidad de obtener información de la superficie total quemada, la cantidad de incendios y sus características (tamaño y perímetro), patrones espaciales y dinámicas temporales asociadas al tipo de vegetación afectado e inclusive a los niveles de daño que ocasionaron estas perturbaciones.

Actualmente existen numerosos productos elaborados para detectar las áreas quemadas, entre los cuales podemos mencionar el *Global Burned Area 2000-2007* -L3JRC product- (Grégoire et al. 2003; Tansey et al. 2008), el proyecto AQL2004 desarrollado por la RedLaTIF (Chuvieco et al. 2008), 'GLOBSCAR' (Simons et al. 2004) y 'Áreas Quemadas MODIS' -MOD045- (Justice et al. 2002).

## Peligrosidad de los fuegos

La peligrosidad de ocurrencia de incendios se encuentra asociada a factores predisponentes y disparadores del proceso de combustión. Los primeros se encuentran relacionados con las condiciones del medioambiente -tipo, estado y cantidad de material combustible, viento, temperatura, humedad relativa, etcétera (Lee et al. 2002; Chuvieco 2003). Los segundos, en cambio, se encuentran principalmente ligados a los factores que originan la llama de ignición, y que pueden ser tanto naturales - e.g. rayos, rozamiento entre ramas- como antrópicos -intencional o accidentalmente- (Chuvieco 2003). Las estadísticas globales mencionan que aproximadamente el 90% de los incendios son ocasionados por el hombre. En consecuencia, los estudios de índices de riesgo de incendios deben incorporar, además de variables ambientales -e.g. clima, vegetación, topografía, usos del suelo, etcétera-, variables antrópicas -e.g. distancia a ciudades y a rutas, áreas de campamento, densidad demográfica, etcétera- (Dwyer et al. 2000; Jaiswal et al. 2002). La ponderación de cada una de estas variables es muchas veces subjetiva, inexacta y muy difícil de extrapolar hacia otras regiones. Es por este motivo que gran número de estudios se basan directamente en el desarrollo de cartografías y análisis de los combustibles, mediante técnicas de teledetección. Diversos índices y algoritmos espectrales (IVN: *Índice verde normalizado*, SWVI: *Short Wave Vegetation Index*, FMC: *Fuel Moisture Content*, ARn: *Acumulative Slope*, RND: *Relative NDVI Difference*, SDC: *Suma de Decrementos Crecientes*, entre otros) son utilizados con el objetivo de conocer previamente a la fecha de la ocurrencia de los fuegos de distinta magnitud, la cantidad y el estado del material vegetal combustible, especialmente el contenido de humedad (Chuvieco et al. 2004; Mbow et al. 2004), como así también conocer su evolución en el tiempo -e.g. la evolución del IVN desde la estación de crecimiento, durante la estación invernal hasta el comienzo de la estación de fuegos de la región (Fischer 2008). De esta forma, la información obtenida puede ser utilizada para estimar posteriormente la probabilidad de ocurrencia de incendios, así como también para estimar la peligrosidad de ocurrencia incendios de distinta magnitud (**Fig. 2**).





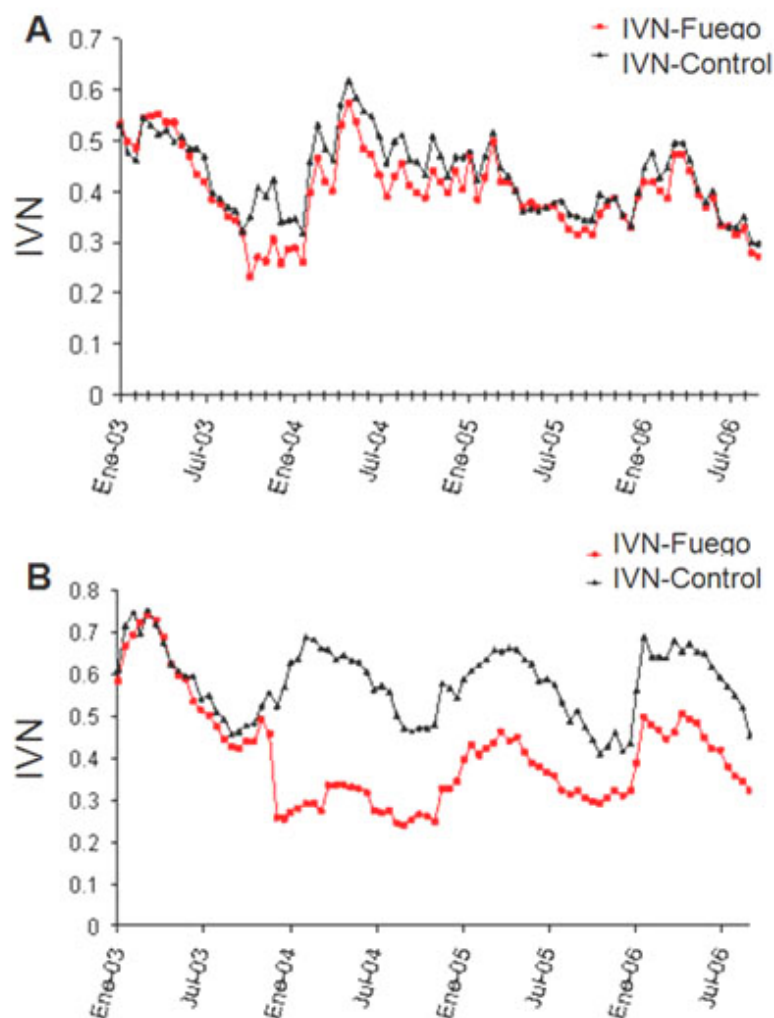
**Figura 2.** Diferencias de la integral (promedio ponderado de los valores entre el comienzo de la estación de crecimiento previa al fuego y la fecha de ocurrencia del fenómeno) del IVN (IVN-I) (A), del SWVI (SWVI-I) (B) y del RND (RND-I)(C) entre sitios afectados por incendios (Fuego) y sitios testigo (No\_Fuego). Letras diferentes para un mismo índice indican diferencias significativas al 5%. (LSD) (Redibujado a partir de Fischer 2008).

### Efectos post-fuego sobre la vegetación

Los efectos del fuego sobre la vegetación responden al impacto directo del contacto de las llamas con los órganos vitales de las plantas, principalmente hojas, tallo y raíz. De los principales componentes, las hojas son las más comprometidas, ya que se daña la estructura celular, y consecuentemente la actividad fotosintética de la planta.

A escala menos detallada, los efectos del fuego son evidentes a nivel de ecosistema, implicando modificaciones estructurales y funcionales de la cobertura vegetal. La teledetección se ha utilizado ampliamente para el seguimiento de las condiciones de la vegetación post-fuego a distintas escalas, principalmente para determinar el nivel de severidad (Key y Benson 2005), la pérdida de cobertura vegetal (Miller y Yool 2002) y la tasa de recuperación de las comunidades vegetales (Diaz Delgado et al. 2003). Un elemento común dentro de este tipo de estudios es la utilización de información espectral en forma de índices y bandas espectrales que han demostrado tener distintos niveles de correlación con parámetros biofísicos de la vegetación, como la cantidad de biomasa, la actividad fotosintética, la productividad y el contenido hídrico (Huete 1987; Paruelo 1998; De Santis y Chuvieco 2007).

Estudios realizados por el grupo de fuegos del Instituto de Clima y Agua (INTA, Argentina), mediante el uso de índices espectrales (IVN, dNBR), indican que los mayores potenciales de recuperación del IVN corresponden a coberturas herbáceas y arbustivas. En áreas boscosas, sin embargo, los niveles de recuperación observados han sido significativamente menores, como consecuencia de los niveles de severidad que estos eventos alcanzan en dichas coberturas (**Fig. 3**).



**Figura 3.** Evolución del IVN para sitios quemados (Fuego) y no quemados (control). Arbustales abiertos en La Pampa, Argentina (A) y Bosques caducos en Santiago del Estero, Argentina (B) (Fuente: Mari et al. 2007).

## Inundaciones

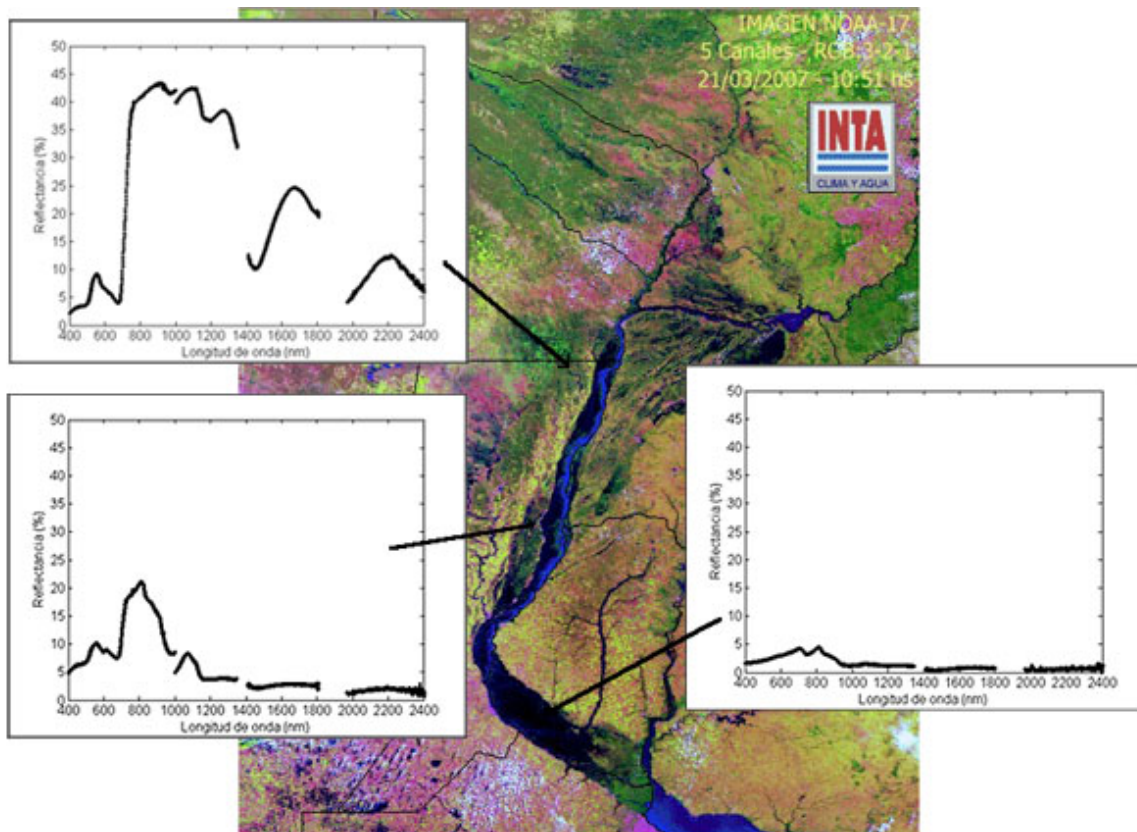
### Detección y cuantificación de áreas inundadas

La información satelital es utilizada habitualmente como una herramienta que permite realizar cartografías de áreas afectadas por el agua. La mayoría de las veces es necesario integrarla con otros tipos de información, conformando un sistema de información geográfica. Las aplicaciones más comúnmente abordadas con estas herramientas son: la modelización de flujos en ríos y arroyos (Overton 2005; Weissling et al. 2007); el análisis de riesgos de inundación (Kuligowski 2006; Rahman et al. 2007), el estudio de la vegetación en humedales (Hamilton et al. 2004; Kandus et al. 2006), la cartografía y el seguimiento de inundaciones (Bonn y Dixon 2005; Buehler et al. 2006), el seguimiento de las inundaciones sobre áreas urbanas (Di Martino et al. 2007), la evaluación de daños post-inundación (Du et al. 2006; Csornai et al. 2007), el estudio de vegetación afectada por las inundaciones (Herrera et al. 2005) o el seguimiento de la humedad del suelo (Jin et al. 2007).

La presencia de agua en superficie puede ser detectada tanto por sensores pasivos como por activos. El agua líquida tiene la propiedad de absorber fuertemente la radiación en la porción del infrarrojo medio del espectro electromagnético. En consecuencia, la reflectancia en dicha porción es cercana a cero. Por el contrario, la magnitud de la energía reflejada en las porciones del visible y del infrarrojo cercano puede presentar mayor variabilidad. Dicha variabilidad dependerá de la reflectancia del suelo que se encuentra sumergido, de la profundidad de la lámina de agua, y de la cantidad y propiedades ópticas de las partículas en suspensión (Baret 1990). En aguas poco profundas, el aporte de la reflectancia del material del fondo es mayor, por lo tanto la reflectancia del cuerpo de agua será mayor a medida que la capa de agua es más profunda. La abundancia de componentes ópticamente activos, como el fitoplancton, los minerales suspendidos y el carbono orgánico disuelto afectan

directamente la turbidez del agua (Bilge et al. 2003). De esta manera, los cuerpos de agua más turbia presentan mayor reflectancia en las bandas del visible.

El primer objetivo al realizar un estudio que involucre áreas inundadas es cuantificar la superficie afectada. En tal sentido, será necesario confeccionar un mapa del área de estudio donde exista una clasificación de al menos dos clases: píxeles inundados y no inundados. Según la extensión del área de estudio, la disponibilidad de imágenes, las características de las clases y la precisión requerida, el mapeo se realizará en base a imágenes de baja o alta resolución espacial (**Fig. 4**). Por ejemplo, el sensor AVHRR (a bordo de los satélites meteorológicos de la serie NOAA), resulta muy útil para el seguimiento de eventos a escala regional, debido a su alta frecuencia de pasaje y a su moderada resolución espacial. Este satélite provee información adecuada para el seguimiento de áreas inundadas, generación de alertas, estimación de daños y manejo del agua en exceso. Es importante destacar que el siniestro deberá ocupar un área significativamente mayor a la resolución espacial de estos satélites ( $1\text{km}^2$  por píxel). Si se requiere estudiar áreas más pequeñas, un área urbana o realizar cálculos más precisos de las áreas afectadas, serán necesarias imágenes de mayor resolución espacial. El satélite Landsat, en tal sentido, brinda información a mayor resolución espacial ( $30 \times 30 \text{m}^2$ ). Esta información permite generar mapeos más detallados, por ejemplo: barrios y caminos afectados, rutas en peligro, entre otros. Se pueden detectar efectos sobre el escurrimiento del agua producto de canales clandestinos, obras nuevas, rutas y vías de ferrocarril. Si se agrega información de curvas de nivel, es posible prever problemas de drenaje. La disponibilidad de datos actuales de usos del suelo permite estimar también las pérdidas actuales y potenciales de producción. Respecto de las imágenes NOAA AVHRR, las imágenes Landsat requieren mayor tiempo de procesamiento y el tiempo de re-visita a un sitio en particular es de 16 días (debido a la órbita que describe alrededor de la tierra). Con una resolución intermedia entre estos dos tipos de sensores, el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo de los satélites AQUA y TERRA también resulta muy útil para detectar agua, principalmente a partir de la información de la banda 5.



**Figura 4.** Sobre un imagen NOAA AVHRR del mes de Marzo de 2007, se ejemplifica las firmas espectrales de tres situaciones hídricas diferentes: A) áreas de vegetación sobre suelo sin exceso de agua B) áreas con vegetación inundada y C) cuerpo de agua.

El análisis de una serie temporal de imágenes permite realizar un seguimiento de la duración de una inundación y estudiar su evolución posibilitando la generación de un alerta antes de la ocurrencia del evento. Al igual que en el punto anterior, esto se puede analizar a diferentes escalas, según los requerimientos particulares del caso. Las imágenes de alta resolución son útiles para realizar mapas de riesgo, delimitando zonas inundables de manera detallada. El análisis del registro histórico de eventos de inundación permite delimitar áreas anegables bajo distintos escenarios. Para ello, se debe llevar un registro de las

zonas que resultan afectadas por inundaciones de diferente intensidad. Este análisis puede realizarse para lotes particulares, cooperativas o unidades administrativas completas.

Si bien se han mencionado hasta el momento algunas aplicaciones de los sensores pasivos, los sensores activos son potencialmente muy útiles para el estudio de áreas inundadas. La utilidad no sólo se debe a su capacidad para identificar superficies cubiertas por agua y estimar el nivel de anegamiento, sino también porque esta capacidad no se ve necesariamente disminuida por la presencia de nubes o vegetación. Rasid y Pramanik (1993) identificaron a la presencia de nubes como el principal impedimento para el estudio de inundaciones en Bangladesh a partir de imágenes provistas por sensores pasivos (e.g. NOAA-AVHRR). Así también Sano et al. (2007) documentaron que en la selva amazónica entre 1984 y 2003 en promedio hubo solamente una imagen Landsat con menos del 10% de cobertura de nubes por año.

El principal mecanismo involucrado en la identificación de áreas inundadas a partir de información radar es el drástico cambio en la rugosidad de la superficie. Un cuerpo de agua presenta una superficie muy poco rugosa (suave) en la cual las microondas provenientes del radar que impactan de manera oblicua son reflejadas especularmente alejándose de la antena. Por lo tanto, la retrodispersión captada por el radar será mucho más baja en áreas cubiertas por agua que en áreas cubiertas por vegetación o suelo desnudo. Basados en estas características, Lowry et al. (1979) delimitaron la extensión del área inundada en Manicota (Canadá), Sipple et al. (1994) lo hicieron a lo largo del río Amazonas (Brasil), y Teti et al. (1993) en el centro oeste de Estados Unidos durante las inundaciones del 1993. Las principales dificultades encontradas en la delimitación de áreas cubiertas por agua ocurren cuando el viento o la vegetación acuática modifican la rugosidad de ésta.

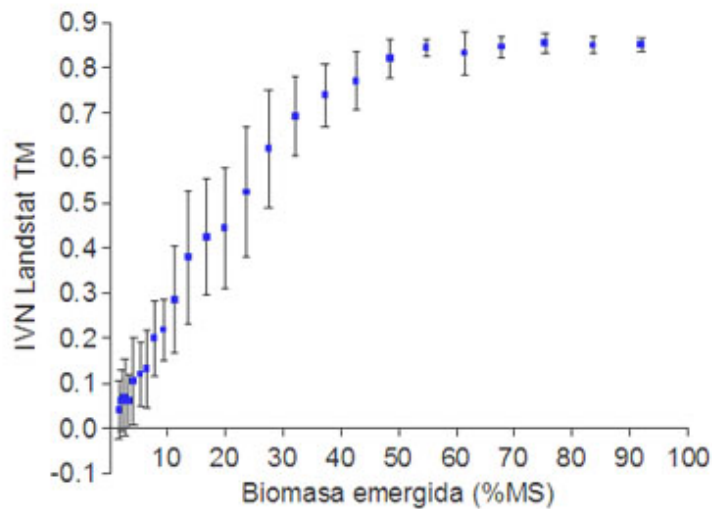
Además de conocer la extensión del área inundada, contar con información sobre el nivel del agua resulta fundamental para la gestión de inundaciones (Smith 1997). Mediante técnicas de interferometría –i.e. proceso por el cual imágenes radar de un mismo lugar son registradas por antenas en diferentes sitios o momentos, permitiendo determinar con mucha precisión la posición tridimensional de los objetos en la superficie-, Alsdorf et al. (2000) observaron cambios de hasta 2 a 5 cm por día en el nivel del agua de ríos afluentes del Amazonas a partir de información de radar en 3 frecuencias distintas. Grings et al. (2006) utilizaron información radar polarimétrica-(i.e. plano de propagación de la onda electromagnética emitida por el radar- y modelos de transferencia radiativa) para estimar el nivel del agua en ambientes dominados por juncos de la cuenca del Río de la Plata (Argentina). Estos autores simularon la retrodispersión generada por canopeos de juncos de diferentes alturas asumiendo que dichas diferencias están dadas por el nivel del agua. Así la inversión del modelo permitió determinar el nivel del agua con una precisión aceptable.

Los radares montados en satélites que están disponibles actualmente (Radarsat 2, ALOS-PALSAR, COSMO-SKYMED y ENVISAT y próximamente RISAT y SAOCOM) permiten asegurar la provisión de imágenes en el mediano plazo. Además, tanto la cantidad como la calidad de esta información es muy superior a la de los primeros sensores disponibles. Por lo tanto, es de esperar que en el futuro los radares ocupen un lugar central en la detección de inundaciones.

### Caracterización de canopeos inundados

En la sección anterior se ha documentado el uso de la información satelital para, básicamente, clasificar áreas inundadas. Sin embargo, en determinados ecosistemas, como los humedales, estos dos componentes –la vegetación y el agua superficial- se encuentran interactuando naturalmente. En ese caso, la teledetección presenta ciertas limitaciones si el objetivo es estudiar un componente del sistema en forma individual. Por ejemplo, algunos autores han abordado el problema utilizando índices calculados a partir de la información espectral. Xiao et al. (2005) utilizaron imágenes MODIS para clasificar lotes sembrados con arroz bajo inundación. La clasificación fue realizada a partir de una comparación temporal del IVN y de un índice relacionado con el espesor de agua equivalente ( $\text{g H}_2\text{O m}^{-2}$ ). Este último índice superaba al IVN durante el período de inundación –el trasplante y las primeras etapas de crecimiento del cultivo-, de manera que el seguimiento temporal del área permitía clasificar los lotes sembrados con arroz. En humedales de pastizales andinos en Bolivia, Moreau et al. (2003) encontraron que el IVN estaba positivamente relacionado con la biomasa húmeda total. Estos ambientes presentan una cobertura aérea vegetal mayor al 80% durante todo el año o la mayor parte de él, lo que implica que el agua presente como fondo no contribuyó en gran medida a la respuesta espectral de los canopeos. Sin embargo, en un estudio experimental con canopeos de Rye grass perenne (*Lolium perenne* L.) inundados a diferentes niveles, se encontró que la respuesta espectral de los canopeos dependía de la proporción de biomasa que estaba por encima del nivel de agua (Beget y Di Bella 2007) (**Fig. 5**). Cuando más del 40% del canopeo se encontraba sumergido en el agua, la respuesta espectral difería significativamente de la de los canopeos sin agua. A partir de esa proporción de biomasa sumergida, los índices de vegetación no se relacionaban con la biomasa presente. De esta manera, en sistemas naturales, donde las áreas bajas del paisaje se inundan periódicamente, el agua superficial debe tenerse en cuenta como una posible limitación en la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación a partir de índices espectrales.





**Figura 5.** Respuesta del IVN de un canopeo de *Ryegrass perenne* en función de la biomasa emergida (%MS). El IVN fue calculado a partir de las bandas de Landsat TM. Las barras corresponden a 1 desvío estándar (Adaptado de Beget y Di Bella 2007).

Beget et al. (2007) presentaron el marco experimental para el desarrollo de un modelo de transferencia radiativa (Radiative Transfer Models -RTM) para canopeos inundados. Estos autores midieron la respuesta espectral de canopeos artificiales de *Pittosporum tobira* de diferente área foliar y con tres niveles de inundación (0, 5 y 13 cm de agua). Cuando se aumentó el nivel de anegamiento en 5 cm, sólo se produjo una disminución en la reflectancia en el infrarrojo cercano y medio en los canopeos de menor área foliar. Los canopeos que presentaban altas cobertura aérea y densidad foliar no mostraron alteraciones en la respuesta espectral a partir del agregado de agua. En el caso de los canopeos totalmente sumergidos se observaron muy pocas diferencias entre las situaciones de distinto índice de área foliar. No obstante se observó que la presencia de agua introducía un importante componente especular a la reflectancia de los canopeos.

En el caso de la utilización de los sensores activos de radar para el estudio de la inundación en áreas vegetadas – particularmente con la presencia de árboles- se puede producir, dependiendo de la frecuencia y el tipo de vegetación, un aumento en la señal captada por la antena. Este efecto fue originalmente documentado por Richards et al. (1987) y ocurre debido a un aumento en el mecanismo de dispersión de doble rebote. Es decir, la presencia de árboles genera que la onda electromagnética (OEM) reflejada especularmente por el agua interactúe con los troncos de los árboles rebotando nuevamente en dirección al sensor radar (Hess et al. 1990). La magnitud del aumento en la señal retrodispersada dependerá de la cantidad de vegetación (Pope et al. 1994). De hecho, un canopeo denso y con muchos estratos puede llegar a suprimir completamente la señal del agua en superficie. A su vez, el efecto de una cantidad de vegetación dada sobre la OEM dependerá de la frecuencia de operación del radar. A menor frecuencia, la atenuación por las hojas de los árboles será menor y por lo tanto, el aumento debido al doble rebote entre el agua y los troncos de los árboles será mayor (Hess et al. 1990).

Muchos autores combinaron la información de sensores pasivos y activos para estudiar ambientes de vegetación inundada. Por ejemplo, Töyrä et al. (2002) utilizaron imágenes de los sensores a bordo de RADARSAT y SPOT para mapear la extensión de los humedales de Peace–Athabasca en Canadá. Li et al. (1995) mostraron que combinar la información registrada por ERS-SAR y LANDSAT TM aumentaba la precisión de la clasificación de áreas de humedal respecto al uso individual de la información de cada uno de estos sensores.

#### Efectos post-inundación

En sistemas naturales, la primera consecuencia de una inundación es la generación de condiciones de hipoxia o anoxia, y en consecuencia, la disminución de la conductancia estomática y la fotosíntesis neta. A los pocos días comienzan a manifestarse cambios fisiológicos, detectables visualmente y a través de sensores remotos. De persistir las condiciones, es esperable la muerte de ciertas especies vegetales no adaptadas (Mommer y Visser 2005), lo que provoca cambios en la diversidad ecológica y alteraciones en el ciclo del carbono y de los nutrientes en el suelo.

Los sensores remotos permiten evaluar ciertos tipos de consecuencias como cambios en la productividad primaria neta aérea (PPNA) y en la fenología de los diferentes cultivos. Es muy común analizar la productividad primaria o el estado fenológico de la vegetación utilizando índices espectrales (e.g. IVN) directamente relacionado con la actividad fotosintética de los canopeos

(ver en este número, Alcaraz-Segura et al. 2008; Cabello et al. 2008; Fernandez y Piñeiro 2008; Paruelo 2008). Si un evento de inundación provoca un daño permanente en la vegetación, este daño se manifestará en una disminución del IVN aún luego de que el agua se retire.

Por otro lado, en algunos sistemas, la influencia del agua puede modelar no sólo la fenología de la vegetación sino el paisaje en su conjunto. La presencia del agua puede ser constante o cíclica. Incluso puede ser un factor decisivo en el origen de los suelos de un paisaje o región (suelos hidromórficos). Este origen o presencia recurrente otorga características propias, en primer lugar a la geomorfología y en segundo lugar, a la vegetación existente (Hamilton et al. 2004; Rahman et al. 2007). Esto es característico en humedales y deltas, donde es común integrar información satelital proveniente de sensores activos y pasivos (Kandus et al. 2006). Posse et al. (2005) han descripto la dinámica de canopeos en diferentes paisajes dentro de una misma región. Los paisajes se diferencian en este caso por el origen de sus suelos y el relieve. La dinámica vegetal y la manera en que otros factores meteorológicos influyen sobre ella difieren entre distintos paisajes. Del mismo modo, la Depresión del Salado en la Provincia de Buenos Aires (Argentina), es un paisaje que ocupa 6 millones de hectáreas, modelado por la recurrencia de inundaciones de diferente intensidad, muy importante para la producción de ganado bovino, en el que se debe tener en cuenta la presencia de agua. Debido a la existencia de un microrelieve (diferencias de altura de unos pocos centímetros (Perelman et al. 2001) es común que durante el invierno existan parches inundados y parches sin inundar. Es aquí donde la estimación de la productividad primaria a través de sensores remotos (una herramienta que ha cobrado mucho protagonismo en las últimas décadas) debe tener en cuenta, de alguna manera, la existencia de vegetación sumergida, que de todos modos, es utilizada por el ganado como alimento. La presencia de agua podría provocar subestimaciones de la biomasa verde disponible (Beget y Di Bella 2007), provocando una subutilización del recurso forrajero (Fig. 5).

## Conclusiones

Los sensores remotos resultan en una herramienta muy útil, precisa y económica para el seguimiento de los ecosistemas a distintas escalas espaciales y temporales. La selección de un determinado tipo de sensor dependerá de la resolución espacial requerida, de las características espectrales del fenómeno a estudiar y de su entorno, de la recurrencia con la que se decida estudiarlo o de la disponibilidad de medios económicos e informáticos para tratar la información obtenida, entre otros. El conocimiento de estas herramientas por parte de los usuarios finales resultará de significativa importancia al momento de decidir la aplicabilidad de los distintos productos disponibles en la actualidad.

A pesar de las limitaciones que puede presentar la teledetección para la detección, la cuantificación y la evaluación de los distintos fenómenos de inundación e incendio, no existe otra herramienta con estas capacidades. Capacidades que están asociadas a la disponibilidad global de información en tiempo real, a la objetividad en la toma de datos y finalmente, a la existencia de información en series temporales de más de 20 años.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a todos los integrantes del Area de Teledetección y SIG del Instituto de Clima y Agua (INTA) por sus comentarios y sugerencias. Agradecemos especialmente las sugerencias realizadas por los revisores anónimos que ayudaron a mejorar el manuscrito. Las aplicaciones desarrolladas por los autores fueron financiadas por el Inter-American Institute for Global Change Research (CRN-2031 - US NSF GEO-0452325), el INTA (AERN4 y AERN4642) y el MINCyT (PICT 08-13931 y PICT N° 32415).

## Referencias

- Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3):108-117.
- Alsdorf, D.E., Melack, J. M., Dunne, T., Mertes, L.A. Hess, L.L. Smith, L.C. 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature* 404:174-177.
- Bannari, A., Morin, D. Bonn, F. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 13:95-120.
- Baret, F. 1990. Factors and mechanism governing canopy spectral reflectance: application for Agriculture. *Technical note*. INRA, Avignon.
- Beget, M.E. Di Bella, C.M. 2007. Flooding: The effect of water depth on the spectral response of grass canopies. *Journal of Hydrology* 335:285-294.

- Beget, M.E., Baret, F., Di Bella, C. M. Hanocq, J.F. 2007. The Flooding Pampa Grasslands: a Radiative transfer model approach. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 355-360 , Bs. As, Argentina.
- Bilge, F., Yazici, B., Dogeroglu, T. Ayday, C. 2003. Statistical evaluation of remotely sensed data for water quality monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 24:5317-5326.
- Bonn, F. Dixon, R. 2005. Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with RADARSAT-1 data. *Natural Hazards* 35:377-393.
- Buehler, Y.A., Kellenberger, T.W., Small, D. Itten, K.I. 2006. Rapid mapping with remote sensing data during flooding 2005 in Switzerland by object-based methods: A case study WIT. *Transactions on Ecology and the Environment* 89:391-400.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Altesor, A., Delibes, M., Baeza, S., Liras, E. 2008. Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. *Ecosistemas* 17(3):53-63.
- Csornai, G., Suba, Zs., Naidor, G., Laiszloi, I. Wirnhardt, C. 2007. Disaster monitoring with the integrated utilization of Envisat and other satellite data sets in the 2004-2006 period in Hungary. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP (SP-636).
- Chuvieco, E. 2002. *Teledeteccion ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Edit. Ariel Ciencia. España.
- Chuvieco E. 2003. Wildland fire danger. Estimation and mapping. The role of remote sensing data. Series in Remote Sensing. University of Alcalá, Spain.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martin, P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J. Pérez, F. 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment* 92:322-331.
- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C., Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., Gonzalez Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csitzar, I., Kapandegi, J., Bastarika, A. Libonati, R. 2008. Global Burned-Land Estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications* 18:64-79.
- De Santis, A. Chuvieco, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment* 108:422-435.
- Di Bella, C.M., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. Pinnock, S. 2006. Fire density controls in South America. *Global Ecology and Biogeography* 15:192-199.
- Di Bella, C.M., Fischer, M.A. Mari, NA. 2008. Teledetección satelital y fuego en áreas naturales. *Ciencia Hoy* 18:104.
- Di Martino, G., Iodice, A., Riccio, D. Ruello, G. 2007. Monitoring of flooding in urban areas. *Urban Remote Sensing Joint Event*: 1-5.
- Díaz Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. 2003. Influence of fire severity on plant regeneration through remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24:1751-1763.
- Du, C., Yan, F. Liu, J. 2006. Uncertainty analysis of flood disaster assessment using remote sensing data. *International Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*: 1071-1073.
- Dwyer, E., Grégoire, J.M., Pereira J.M.C. 2000. Climate and vegetation as driving factors in global fire activity. En: Innes, J.I., Beniston, M. Verstraete, M.M. (eds), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, pp: 171-191. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Dwyer, E., Pereira, J.M.C., Grégoire, J.M., DaCanara, C.C. 1999. Characterization of the spatio-temporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993. *Journal of Biogeography* 27:57-69.
- Fernández, N., Piñeiro, G. 2008. La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales. *Ecosistemas* 17(3):64-78.

- Fischer, M.A. 2008. *Condiciones de la vegetación que favorecen la ocurrencia, propagación y duración de los incendios en la Región Semiárida Argentina*. Tesis Magister of Science, Universidad de Buenos Aires, , Buenos Aires, Argentina.
- Fischer, M.A., Di Bella C.M., Jobbágy, E.G. 2007. Factores que controlan la distribución espacio-temporal de los incendios en la Región Semiárida Argentina. En: *XII Congreso de la Asociación Española de teledetección*, Bs. As, Argentina.
- Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87:273-282.
- Giglio L., Kendall J.D., Justice C.O. 1999. Evaluation of global detection algorithms using simulated AVHRR infrared data. *International Journal of Remote Sensing* 20:1947-1985.
- Giglio, L., van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J., Kasibhatla, P.S. 2006. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6:957-974.
- Grégoire, J.M., Tansey, K., Silva, J.M.N. 2003. The GBA2000 initiative: developing a global burn area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24:1369–1379.
- Grings, F. M., Ferrazzoli, P., Jacobo-Berlles, J.C., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Pratolongo, P. Kandus, P. 2006. Monitoring flood condition in marshes using EM models and ENVISAT ASAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:936-942.
- Guyot, G., Baret, F. Jacquemoud, S. 1992. Imaging spectroscopy for vegetation studies. En: Toselli, F. y Bodechtel, J. (eds.), *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, pp: 145-165. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Habert, H., Erb, K.H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C., Gingrich, S., Lucht, W. Fischer-Kowaski, M. 2007. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104:12942–12947.
- Hamilton, S.K., Sippel, S.J., Melack, J.M. 2004. Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: The Llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia). *Hydrological Processes* 18:2103-2116.
- Herrera, L.P., Hermida, V.G., Martínez, G.A., Laterra, P., Maceira, N. 2005. Remote sensing assessment of *Paspalum quadrifarium* grasslands in the Flooding Pampa, Argentina. *Rangeland Ecology and Management* 58:406-412.
- Hess, L.L., Melack, J.M. Simonett, D.S. 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy. A review. *International Journal of Remote Sensing* 11:1313-1325.
- Huete, A.R. 1987. Spectral signatures and vegetation indices. II Reunión del Grupo de Trabajo de Teledetección, CDIT, Valencia.
- Jaiswal, R.K., Mukherjee, S., Raju, K.D., Saxena, R. 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4:1-10.
- Jin, Y.Q., Yan, F. 2007. A change detection algorithm for terrain surface moisture mapping based on multi-year passive microwave remote sensing (Examples of SSM/I and TMI Channels). *Hydrological Processes* 21:1918-1924.
- Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D.P., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. 2002. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment* 83:244-262.
- Justice, C.O., Smith, R., Malcolm, G.A., Csiszar, I. 2003. A review of current space-based fire monitoring in Australia and the GOF/GOLD program for international coordination. *International Journal of Wildland Fire* 12:247–258.
- Kandus, P., Karszenbaum, H., Salvia, M., Gonzalez Trilla, G., Pratolongo, P., Grings, F.M., Zoffoli, L. Ferrazzoli, P. 2006. Multiscale-multisensor approach in studying wetlands of the Paranai river Delta Region in Argentina. European Space Agency (Special Publication). *ESA SP (SP-634)*.



- Key, C.H., Benson, N. 2005. Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. En: Lutes D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Gangi L.J. (eds) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. *General Technical Report* RMRS-GTR-164-CD: LA1-LA51. United States Department of Agriculture, Rocky Mountain Research Station, Ogden, Utah, USA.
- Kuligowski, R.J. 2006. Satellite rainfall estimates for global flood monitoring and prediction. Proceedings of SPIE. *The International Society for Optical Engineering* 6412.
- Lee, B.S., Alexander, M.E., Hawkes, B.C., Lynham, T.J., Stocks, B.J., Englefield, P. 2002. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada. *Computers and Electronics in Agriculture* 37:185–198.
- Levine, J.S. 1996. *Biomass burning and global change: remote sensing, modeling and inventory developments, and biomass burning in Africa*. Volume 1. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England 551.
- Li, C., Brisco, B., Brown, R.J., Wang, J., McDonald, J. 1995. SAR/TM wetland identification in the Lake St. Clair Delta. 17th Canadian Symposium on Remote Sensing: 60–64.
- Loboda, T., Csiszar, I. 2007. Reconstruction of fire spread within wildland fire events in Northern Eurasia from the MODIS active fire product. *Global and Planetary Change* 56:258-273.
- Lowry, R.T., Mudry, N., Langham, E.J. 1981. A preliminary analysis of SAR mapping of the Manitoba flood, May 1979. Satellite hydrology; Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing: 316-323.
- Mari, N., Kanpandegi, J.A., Di Bella, C.M., Fischer, M.A., Ferrer F. 2007. Respuesta espectral de la vegetación quemada para distintos ecosistemas de la Argentina. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata, Argentina.
- Mari, N.A., Di Bella, C.M., Casañas, H. 2006. Estudio de la ocurrencia de incendios en el Valle de Punilla, Córdoba Argentina. XXII Reunión Argentina de Ecología, Córdoba, Argentina.
- Mbow, C., Goïta, K. Bénié, G. 2004. Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 91:1–13.
- Miller, A.B., Yool, S.R. 2002. Mapping forest post fire canopy consumption in several overstorey types using multitemporal Landsat. *Remote Sensing of Environment* 82:481-496.
- Mommer, L., Visser, E.J.W. 2005. Underwater photosynthesis in flooded terrestrial plants: a matter of leaf plasticity. *Annals of Botany* 96:581-589.
- Moreau, S., Bosseno, R., Fa Gu, X., Baret, F. 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 85:516-529.
- Overton, I.C. 2005. Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating GIS, remote sensing and hydrological models. *River Research and Applications* 21:991-1001.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.
- Paruelo, J.M., Lauenroth, W.K. 1998. Interannual variability of the NDVI curves and their climatic controls in North american shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25:721-733
- Perelman, S., León, R.J.C., Oesterheld, M. 2001. Cross-scale vegetation patterns of Flooding Pampa Grasslands. *Journal of Ecology* 89:562–577.
- Pickett S.T.A., Wu J., Cadenasso M.L., 1999. Patch dynamics and the ecology of disturbed ground: a framework for synthesis. En: Walker L.R. (ed.). *Ecosystems of the world: ecosystems of disturbed ground*, pp 707-722. Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands.
- Pope, K.O., Rey-Benayas, J.M., Paris, J.F. 1994. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the central American tropics. *Remote Sensing of the Environment* 48:205-219.

- Posse, G., Oesterheld, M., Di Bella, C.M. 2005. Landscape, soil and meteorological influences on canopy dynamics. *Applied Vegetation Science* 8:49-56.
- Rahman, S., Rahman, H., Keramat, M. 2007. Study on the seasonal changes of land cover and their impact on surface albedo in the northwestern part of Bangladesh using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 28:1001-1022.
- Rasid, H., Pramanik, M.A.H. 1993. Areal extent of the 1988 Flood in Bangladesh: how much did the satellite imagery show?. *Natural Hazards* 8:189-200.
- Richards, J.A, Woodgate, P.W., Skidmore, A.K. 1987. An explanation of enhanced radar backscattering from flooded forests. *International Journal of Remote Sensing* 8:1093-1100.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. pp. 301–317. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Greenbelt: NASA), SP-351.
- Roy, D., Jin, Y., Lewis, P., Justice C. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment* 97:137-162.
- Sano, E.E., Ferreira, L.G., Asner, G.P., Steinke, E.T. 2007. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing* 28:2739-2752.
- Simon, M., Plummer, S., Fierens, F., Hoelzemann, J., Arino, O. 2004. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 109, doi.:10.1029/2003JD003622.
- Sipple, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M., Choudhury, B.J. 1994. Determination of inundation area in the Amazon river floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. *Remote Sensing of Environment* 48:70-76.
- Smith, L.C. 1997. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. *Hydrological Processes* 11:1427-1439.
- Tansey, K., Grégoire, J.M.C., Defourny, P., Leigh, R., Pekel, van Bogaert, E., Bartholomé, E., Bontemps, S. 2008. A new, global, multi-annual (2000-2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals. *Geophysical Research Letters* 35:000-000. doi.:10.1029/2007GL031567
- Teti, J.G., Ilsemann, F.J., Verdi, J.S., Boerner, W.M., Krasznay, S.K. 1993. Application of the polarimetric matched image filter to the assessment of SAR data from the Mississippi flood region. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation, *IEEE International* 3:1368-1370.
- Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L.W., Prowse, T. D. 2002. A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrological Processes* 16:1569-1581.
- Weissling, B.P., Xie, H., Murray, K.E. 2007. A multitemporal remote sensing approach to parsimonious streamflow modeling in a southcentral Texas watershed, USA. *Hydrology and Earth System Sciences* 4:1-33.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Froking, S., Li, C., Salas, W., Moore III, B. 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* 95:480-492.