



# Universidad Blas Pascal

## Publicaciones de la UBP

### Serie Materiales de Investigación



**Diseño de estrategias de gestión con base  
en la teledetección, para situaciones de  
amenaza producidas por fenómenos  
naturales en territorio argentino.**

**Diana Marina Rodríguez**  
*Licenciatura en Gestión Ambiental*

Directora: Dra. Inés Velasco  
Asesora: Dra. Anabella Ferral

**Diseño de estrategias de gestión con base  
en la teledetección, para situaciones de  
amenaza producidas por fenómenos  
naturales en territorio argentino.**

**Diana Marina Rodríguez**  
*Licenciatura en Gestión Ambiental*

Directora: Dra. Inés Velasco  
Asesora: Dra. Anabella Ferral



---

# Diseño de estrategias de gestión con base en la teledetección, para situaciones de amenaza producidas por fenómenos naturales en territorio argentino.

Por **Diana Marina Rodríguez**. *Licenciatura en Gestión Ambiental*

Directora: Dra. Inés Velasco. Asesora: Dra. Anabella Ferral

## Agradecimientos

A mi queridísima directora de tesis, Dra. Inés Velasco quien me brindó sus valiosos conocimientos y fue mi orientación y guía en la elaboración del presente trabajo.

A la Ing. María del Carmen Díaz Goldfarb y a la Dra. Anabella Ferral por el incentivo que me proporcionaron y la confianza que me brindaron.

A la Dra. Mónica Marino por su apoyo desinteresado.

---

## Dedicatorias

A mi esposo Rubén y a mis hijos, Matías y Lucas, por su comprensión y estímulo, a lo largo de estos cuatro años.

A mis padres por estar ahí, cuando los necesitaba.

A mi hermana del alma, María Laura, por sus abrazos que junto con Arturito me ayudaron a no bajar los brazos, en los momentos más difíciles.

A mi compañera y amiga Carina Bolzi, por el diseño de la carátula de este trabajo y por su incentivo y apoyo incondicional de todos los días.

A mi amigo Jorge Leis, por creer siempre en mí y escucharme en los momentos más difíciles.

A mi compañero Omar y a Claudia de UBP por su ayuda desinteresada y a Soledad Osore del S.M.N por su valioso aporte en parte de este trabajo.

A mis compañeros de trabajo de todos los días, Pedro, Adriana y Carina por el sostén diario y las comidas que me ganaron.

Y a todas las personas que de una u otra forma me hicieron el aguante en la carrera.

# Índice

<b>Resumen</b>	3
<b>Introducción</b>	4
<b>Diseño metodológico</b>	5
<b>Resultados y discusión</b>	6
1. Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre los fundamentos de la teledetección	6
2. Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre fenómenos naturales que perturban y perjudican el ambiente.	10
3. Adquisición y análisis de imágenes para el estudio de fenómenos naturales.	12
3.1 Nivel de procesamiento.	12
3.2 Obtención de algoritmos específicos para la identificación y caracterización de cada fenómeno.	12
3.3 Obtención de índices sintéticos.	12
4. Análisis de fenómenos naturales: métodos y resultados obtenidos.	15
4.1 Tormenta convectiva severa en el NE de Argentina.	15
4.2 Inundaciones en los ríos Paraná inferior y Areco.	17
4.2.1 Inundación en el río Paraná inferior.	17
4.2.2 Inundación en el río Areco.	18
4.3 Detección y monitoreo de incendios forestales en la Provincia de Córdoba.	19
4.3.1 Caso I: Septiembre 2008. Detección de focos de fuego.	19 20
Detección y evaluación de áreas quemadas.	20
4.3.2 Caso II: Septiembre 2011.	21
4.4 Tormentas de polvo.	23
4.5 Tormentas de sal.	25
4.6 Nube de ceniza volcánica.	26
4.7 Presentación y discusión de los resultados obtenidos en cada caso.	28
5. Elaboración de recomendaciones y uso potencial de los resultados obtenidos.	31
6. Conclusiones	33
7. Bibliografía	34

---

## Resumen

Los fenómenos naturales que pueden generar situaciones de riesgo, ya sean ellos de origen atmosférico, geológico o hidrológico pueden ser en cierto grado estudiados mediante la teledetección, ya que suelen ser eventos o procesos recurrentes que dejan evidencias.

El objetivo de este trabajo es probar que las herramientas basadas en la teledetección pueden ser muy útiles para diseñar estrategias de gestión, para situaciones de amenaza producidas por fenómenos naturales en territorio Argentino. La información aportada por la teledetección no sólo es útil para evaluar el impacto de los distintos fenómenos naturales adversos sobre el sistema biogeofísico, sino que también constituye un aporte importante para la toma de decisiones y para la definición de medidas adecuadas a los diversos objetivos de la gestión ambiental. La diversidad de opciones en la elección de imágenes y de aplicaciones, obliga al investigador, técnico o gestor ambiental dedicado a la administración de los diferentes recursos, a realizar un análisis exhaustivo de la oferta existente y de sus costos, labor que requiere de un conocimiento básico de los datos disponibles y de su utilidad. Dentro de una gama de imágenes satelitales actualmente disponibles sin costo, es posible, a través de un procesamiento adecuado, obtener información útil para la toma de decisiones en la gestión de diversas disciplinas como la meteorología, la hidrología, el agro, entre otras, así como también, en tareas logísticas que involucran operaciones aéreas, transporte terrestre y la sanidad de la población.

---

## Introducción

La teledetección espacial está definida como la técnica que permite adquirir imágenes de la Tierra mediante sensores instalados en plataformas espaciales, es decir sensores remotos, asumiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción de energía.

El uso de los datos tomados por los sensores remotos a bordo de satélites corresponde a una tecnología en permanente evolución, con un gran potencial para aportar información muy útil para el estudio de la cobertura de la superficie terrestre y la detección de sus cambios, permitiendo evaluaciones globales sobre superficies diferentes y bajo la acción de agentes naturales y/o antropogénicos. Estos cambios a su vez constituyen una información importante para los tomadores de decisión sobre las políticas ambientales y en el aprovechamiento sustentable de los recursos (Chuvieco, 2002).

Las evidencias dejadas por los fenómenos naturales generadores de situaciones de riesgo pueden registrarse, analizarse e integrarse en los proyectos de planificación ambiental. Si se puede identificar tempranamente la susceptibilidad de la ocurrencia de fenómenos naturales peligrosos y ser considerada en cualquier plan de desarrollo local o regional, entonces se podrán introducir medidas que reduzcan el impacto ambiental, social y económico ante peligros o potenciales desastres.

Los fenómenos naturales de origen puramente atmosférico o combinado, que pueden afectar negativamente al medio ambiente se pueden dar en una amplia gama de escalas de espacio y tiempo, y con características diferentes de acuerdo a su localización geográfica.

Desde el punto de vista de la meteorología, las tormentas adquieren distintas características u organizaciones y una diferencia muy marcada la establecen las latitudes donde se desarrollan. Por ello se las diferencia en tormentas tropicales (ciclones tropicales, huracanes, etc.) y de latitudes medias, siendo en general las primeras las más severas en función de su impacto social y económico más extendido. Sin embargo, las tormentas de latitudes medias también pueden tener localmente impactos muy negativos, cuando asociadas a ellas ocurren tornados, granizo, lluvias intensas, descargas eléctricas y vientos muy fuertes. Ciertas tormentas están acompañadas de alguno de estos fenómenos, otras de varios de ellos y en ocasiones, cuando son extremadamente severas, de todos ellos.

Otro tipo de tormentas, adversas también a la sociedad, pueden ser las tormentas de polvo, arena o sal. Éstas son el resultado de una combinación de fenómenos de origen atmosférico y geológico, ya que se originan cuando vientos de intensidad regular a fuerte, barren superficies de suelos desnudos como pueden ser desiertos, áreas desertificadas o en proceso de serlo, o salinas entre otros.

Los ríos, afectados por la ocurrencia de precipitaciones copiosas en parte o en todo su cauce, pueden exceder a éste y dar lugar a inundaciones que pueden ser eventos verdaderamente catastróficos. Las inundaciones son eventos que se pueden desarrollar en diferentes escalas de tiempo, abarcando desde varios días hasta unas pocas horas. Pero en todos los casos producen diversos perjuicios afectando a la población, el transporte, la agricultura, etc. Sin embargo, en general, involucran fenómenos que pueden ser diagnosticados y previstos siempre y cuando se tenga acceso a información adecuada y actualizada.

En el caso de los incendios forestales o de pastizales, que se producen con cierta frecuencia en distintas zonas de nuestro territorio, la escasez de precipitaciones favorece su desarrollo y la propagación de los vientos actúan como otro factor importante. Las causas que pueden dar lugar a incendios forestales pueden ser diversas pero en todos ellos se dan la existencia de grandes masas de vegetación en concurrencia con períodos más o menos prolongados de sequías. El potencial de un incendio depende de la cantidad de vegetación seca y verde y de su grado de humedad.

En el caso de los fenómenos de origen volcánico el estudio de las cenizas volcánicas es muy importante por sus efectos en el clima y por el peligro que éstas representan para la aviación.

Los fenómenos descritos en los párrafos anteriores, por su localización, severidad y frecuencia afectan de manera adversa o peligrosa a la población, a sus estructuras y a sus actividades en distintas regiones de nuestro territorio. Por lo tanto es necesario diseñar estrategias para la gestión de información generada a través de la teledetección, ante situaciones de amenaza producidas por fenómenos naturales y presentar métodos y resultados, que permitan o faciliten la generación de propuestas basadas en los productos obtenidos para la gestión, en cada caso en particular.

## Diseño Metodológico

Para la concreción de los objetivos planteados se definieron las siguientes etapas:

### **Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre la teledetección:**

Con el fin de realizar una breve descripción de los fundamentos físicos de la teledetección se analizaron los siguientes autores:

Bakst y Yamazaky (2001), Chuvieco (1996), Chuvieco Salinero (2002), Lillesand y Kiefer (1994).

### **Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre fenómenos naturales que perturban y perjudican el ambiente.**

Los fenómenos naturales que perturban y perjudican al medio ambiente son procesos naturales que han operado a lo largo de la historia de la Tierra. Estos fenómenos pueden ser de origen geológico, atmosférico, combinación de ambos u otros que no categorizan en éstos. Una sinopsis de ellos se obtuvo a partir de la revisión de distintas publicaciones:

Abuduwaili J., Liu DongWei, Wu GuangYang (2010), Ahrens (2003), Lindell and Prater (2003), Mattio (2010), Smith (2001).

### **Adquisición y análisis de imágenes para el estudio de fenómenos naturales.**

Para realizar este trabajo se utilizaron datos provenientes del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution) correspondiente a la serie de satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites TERRA y AQUA. Todas las imágenes adquiridas para fines de investigación y monitoreo de fenómenos meteorológicos y naturales son gratuitas. Las imágenes correspondientes al sensor AVHRR fueron recibidas en tiempo real a través de una antena ubicada en el Observatorio Central Buenos Aires (CABA), que depende del Departamento Teledetección y Aplicaciones Ambientales del Servicio Meteorológico Nacional. Las imágenes del sensor MODIS fueron obtenidas a través del sitio MODIS Rapid Response System de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Otros datos disponibles fueron las Estadísticas y Boletines publicados por el Servicio Meteorológico Nacional, registros de estaciones meteorológicas, publicaciones de organismos especializados y crónicas periodísticas.

**Nivel de procesamiento:** Se realizó la navegación y calibración de imágenes satelitales de la serie NOAA, TERRA y AQUA con nivel inicial de procesamiento 1b.

### **Obtención de algoritmos específicos para la identificación y caracterización de cada fenómeno:**

Estos algoritmos se implementaron a partir de las firmas espectrales de cada blanco observado desde el satélite, y según el caso se aplicaron índices sintéticos ya desarrollados y explorados o se establecen relaciones condicionales de valores de reflectancias o emisividad.

### **Análisis de fenómenos naturales: métodos y resultados obtenidos:**

Se analizaron los siguientes fenómenos naturales ocurridos en territorio argentino:

a) Una tormenta convectiva severa en el NE de Argentina, donde ocurre al menos un tornado que deja huellas en el suelo y que son claramente distinguibles en las imágenes tomadas desde satélites.

b) Dos casos de inundación, uno correspondiente a la Cuenca del Plata, y otro en la pequeña Cuenca del Rio Areco en la Provincia de Buenos Aires.

c) Detección y monitoreo de incendios forestales en la Provincia de Córdoba.

d) Dos casos de tormentas, una de polvo y otra de sal, que produjeron una fuerte señal en las respuestas radiométricas, permitiendo su detección, localización y vigilancia con las imágenes de distintos satélites.

e) Nube de ceniza volcánica, originada por la erupción del volcán Puyehue en el Cordón del Cauille.

### **Presentación y discusión de los resultados obtenidos en cada caso.**

Los productos obtenidos en forma de imágenes y gráficos en cada caso, se presentaron discutiendo su validez y alcance.

### **Elaboración de recomendaciones sobre el uso potencial de los productos obtenidos.**

En función de los resultados obtenidos, se identificaron los sectores socio-económicos que podrían ser afectados por los fenómenos estudiados y se dieron algunas recomendaciones de cómo incorporar esta información en los proyectos dirigidos al desarrollo regional sustentable y a la prevención de desastres producidos por fenómenos naturales adversos.

# Resultados y Discusión

## 1. Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre los fundamentos de la teledetección

La bibliografía sobre teledetección es muy amplia, y si bien existen numerosas publicaciones en idioma español, las primeras y más numerosas están en idioma inglés. En este ítem se sintetizan conceptos provenientes de distintos autores como Lillesand y Kiefer (1994), Chuvieco (1996), Bakst y Yamazaky (2001) y Chuvieco Salinero (2002).

La *teledetección* es la ciencia y el arte de detectar, identificar, observar y medir (senzar) propiedades de un objeto o evento sin tomar contacto directo con él. En la teledetección el sensor no está en contacto directo con el objeto o evento observado, por lo que se lo denomina *sensor remoto* (SR). En particular se define a la *teledetección espacial* como la técnica que permite adquirir imágenes de la Tierra mediante sensores instalados en plataformas espaciales, asumiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción de energía, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial o por emisión propia. En el caso particular que los sensores estén a bordo de satélites se la denomina *teledetección satelital*. Esta última es la que se utiliza en la presente tesis.

En un sentido más restricto, la teledetección satelital se refiere a la tecnología de adquirir información de la superficie (continentes-océanos), de la atmósfera (meteorológica y/o climática) y espacial, usando sensores a bordo de satélites. La información desde el objeto o evento (blanco) llega al sensor como *radiación electromagnética* (REM).

La radiación electromagnética se transporta través del espacio como perturbaciones periódicas de los campos eléctricos y magnéticos (*ondas electromagnéticas*).

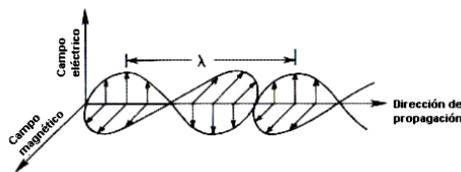


Figura 1. Representación gráfica de una onda electromagnética. Fuente: Velasco (2008).

Las ondas se suelen especificar por su longitud (l) o por su frecuencia (n), que están relacionadas por:

$$v = c\lambda^{-1} = cK \quad (1)$$

donde  $c = 2.99792458 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> es la velocidad de propagación de la luz.

La frecuencia o longitud de una onda electromagnética depende de su fuente. En el mundo físico existe un amplio rango de frecuencias, desde las bajas frecuencias (ondas eléctricas generadas por las líneas de transmisión de energía) hasta las de muy alta frecuencia (rayos gamma originados en los núcleos atómicos). Este rango amplio de frecuencias de las ondas electromagnéticas constituye lo que se denomina *espectro electromagnético*.

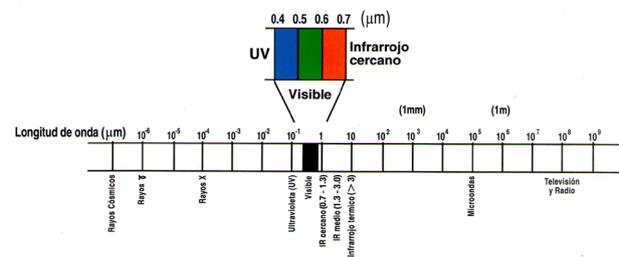


Figura 2. Espectro electromagnético Fuente: CONAE (2005)

El sensor mide la REM (radiación electromagnética), a partir de la cual se obtienen parámetros o propiedades biogeofísicas. Los datos que proveen los SR son en general, una imagen que representa el blanco observado.

Una *imagen* es una representación bidimensional de los objetos de una escena real. Las imágenes captadas por los sensores a bordo de los satélites son representaciones de partes de la superficie terrestre vistas desde el espacio. Estas imágenes son digitales, en tanto que las conocidas como fotografías aéreas son imágenes analógicas. Una imagen digital es un arreglo bidimensional de elementos individuales llamados *píxeles*, ordenados en columnas y renglones y constituyen una *matriz de datos*. Cada píxel de la imagen representa un área de la superficie terrestre y tiene asociado un valor de brillo y una posición en la imagen (x,y).

El valor del brillo representa la energía que llega al sensor que es digitalizada, cuantificada y registrada con un número (ND), que representa un valor promedio para el área cubierta por el píxel. Por razo-

nes de espacio limitado en los sistemas de almacenamiento, el ND se guarda en formato binario. Por ejemplo. Un ND de 8 bits (28) puede variar su valor entre 0 y 255, mientras que un ND de 10 bits (210) varía entre 0 y 1023 valores. El número de bits define la resolución radiométrica de la imagen. Estas imágenes son identificadas como *imágenes crudas*, el ND no tiene unidades y no representa una variable física. A través del proceso conocido como *calibración radiométrica de la imagen*, los ND son transformados en variables físicas como *reflectancia y radiancias*, obteniéndose las denominadas *imágenes calibradas*.

Entre la posición columna-fila (x,y) de cada píxel de la imagen existe una correspondencia uno-a-uno con las coordenadas geográficas (latitud, longitud) de la imagen. Para que una imagen sea realmente útil es necesario que se pueda derivar lo más exactamente posible la localización de cada píxel sobre la superficie. Para esto, es necesario partir de su posición (x,y) en la imagen y conocer los parámetros de la geometría de la imagen y de la órbita del satélite.

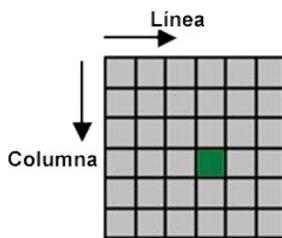


Figura 3. Esquema de una imagen digital  
Fuente: Velasco (2008)

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los sensores a bordo de los satélites observan la superficie de la tierra a través de la atmósfera y los constituyentes de ésta, modifican la información original, por lo cual las imágenes antes de ser analizadas e interpretadas deben ser corregidas. Las modificaciones se deben a los procesos de *absorción y dispersión* que experimenta la radiación electromagnética al atravesar la atmósfera. Estos dos procesos dependen de la longitud de onda de la REM y del tipo de partículas presentes y sus efectos degradan la calidad de la imagen.

Una consecuencia de la absorción atmosférica es que en ciertas bandas de longitud de onda en el espectro electromagnético la radiación emitida desde un blanco está bloqueada por la atmósfera. Las regiones de longitud de onda en el espectro electromagnético utilizable para la teledetección son conocidas como las *ventanas de transmisión atmosférica*. Los sistemas de teledetección son a menudo diseñados

para operar dentro de una o más de las ventanas atmosféricas. Estas ventanas existen en la región de las microondas, en algunas bandas de longitud de onda en el infrarrojo, en toda la región visible (VIS) y parte de las regiones del ultravioleta (UV) cercano.

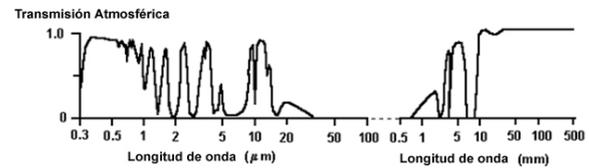


Figura 4. Ubicación de las ventanas atmosféricas (máximos de transmisión) en el espectro electromagnético

Fuente: Velasco (2008)

Las imágenes ópticas dependen de la radiación solar como fuente de iluminación. La absorción reduce la energía solar de forma diferente según las bandas de absorción de los gases que componen la atmósfera. La radiación reflejada también es atenuada al cruzar la atmósfera, dependiendo de la longitud de onda. Así, la absorción modificará la firma espectral aparente del blanco observado.

En la región VIS del espectro electromagnético la absorción es débil, y es más importante en ciertas bandas de la región del IR. Los componentes atmosféricos más importantes en el proceso de absorción son las moléculas de vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las bandas de absorción de estos componentes están, aproximadamente, en la región del espectro comprendida entre el infrarrojo cercano (NIR) y el lejano (FIR) o sea entre 0.7 y 15 µm. En el FIR, la mayoría de la radiación es absorbida por la atmósfera. En la región de las microondas (MW), la atmósfera es prácticamente transparente.

La dispersión de la radiación electromagnética se produce por su interacción con la materia cuyo resultado es una re irradiación de la energía en todas las direcciones. Tanto los componentes gaseosos como el aerosol atmosférico producen dispersión. La ley de la dispersión por las moléculas se debe a Rayleigh (1871), que establece que para partículas de diámetro mucho menor que la longitud de onda la intensidad de la luz dispersada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Así, la luz azul experimenta mayor dispersión que la roja, y esto explica porqué el cielo se ve azul y el sol poniente rojo. La dispersión por las partículas que componen el aerosol atmosférico depende de la forma, tamaño y material de las partículas. Si el diámetro de las partículas es similar o mayor que la longitud de onda de la radiación incidente, la dispersión es conocida como dispersión de Mie. En

general, la dispersión de Mie está concentrada en un pequeño en la dirección y sentido del haz de luz incidente. Para partículas esféricas se puede calcular numéricamente, pero para partículas irregulares su cálculo es muy complicado.

La dispersión atmosférica es solo importante en las regiones del VIS y el NIR. La dispersión producida por los gases y los aerosoles atmosféricos producen una degradación de las imágenes. La más importante se produce por la radiación solar dispersada hacia el sensor sin que haya alcanzado previamente la superficie terrestre, dándole a la imagen una apariencia brumosa, (poco nítida). Este efecto es más importante en la región del azul del espectro visible debido a que la dispersión es muy fuerte para las longitudes de onda más cortas (dispersión de Rayleigh). Hay otro efecto producido por la dispersión, conocido como efecto adyacente, que se produce en el límite entre dos blancos, uno con alto brillo y otro con bajo brillo, que produce un aparente aumento de brillo en la región más oscura y una disminución en la más brillante. Este efecto le da a la imagen un aspecto borroso.

Los sensores remotos según el rango del espectro electromagnético donde operan se los suele denominar sensores *ópticos*, *térmicos* o *de radar*. En esta tesis se usarán datos originados por sensores ópticos y térmicos. Los sensores ópticos detectan la radiación solar reflejada o dispersada desde la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. La región del espectro donde se ubican estos sensores se extiende desde el VIS hasta el infrarrojo de onda corta (short-wave infrared - SWIR). La región del espectro desde el NIR al SWIR es considerada como IR reflectiva, por la doble componente que se da en esta región, de emisión y de reflexión.

La banda del visible se extiende aproximadamente entre los 400 nm (violeta) y los 700 nm (rojo). Los componentes de color están en los siguientes rangos aproximadamente:

- Rojo: 610 - 700 nm
- Naranja: 590 - 610 nm
- Amarillo: 570 - 590 nm
- Verde: 500 - 570 nm
- Azul: 450 - 500 nm
- Índigo: 430 - 450 nm
- Violeta: 400 - 430 nm

Cada material refleja y absorbe en forma diferente en las distintas longitudes de onda, entonces los blancos pueden ser diferenciados por las *reflectancias espectrales* (*firmas espectrales*) registradas en las imágenes. La firma espectral es un gráfico de la

fracción de la radiación solar reflejada en función de la longitud de onda incidente (figura 3) y sirve para reconocer un blanco por su firma. En principio, un blanco puede ser identificado por su firma espectral si el sistema de sensores tiene suficiente resolución espectral para distinguir su espectro del de otros blancos. Esto constituye el fundamento de la teledetección multiespectral.

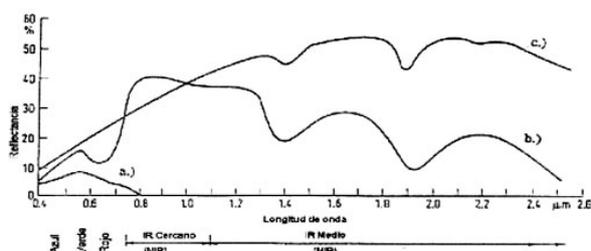


Figura 5. Esquema de firmas espectrales de distintas coberturas: a.) agua, b.) vegetación, c.) suelo desnudo

Fuente: Velasco (2008).

Los sensores térmicos usan el rango del espectro electromagnético denominado Infrarrojo: ubicado entre 0.7 y 300  $\mu\text{m}$ . Esta región está dividida en bandas:

- Near Infrared (NIR): 0.7 - 1.5  $\mu\text{m}$ .
- Short Wavelength Infrared (SWIR): 1.5 - 3  $\mu\text{m}$ .
- Mid Wavelength Infrared (MWIR): 3 - 8  $\mu\text{m}$ .
- Long Wavelength Infrared (LWIR): 8 - 15  $\mu\text{m}$ .
- Far Infrared (FIR) : >15  $\mu\text{m}$ .

Los nombres se han dejado en inglés pues es la forma común de uso en el área de teledetección.

El NIR y el SWIR se conocen también como *Infrarrojos Reflectivos*, debido a su importante componente infrarroja de la radiación solar reflejada desde la superficie terrestre. El MWIR y el LWIR son denominados *Infrarrojos Térmicos*.

La reflectancia del agua clara es generalmente baja, no obstante tiene un máximo en el azul del espectro y decrece cuando aumenta la longitud de onda. El agua turbia, por presencia de sedimentos puede aumentar su reflectancia en el rojo dándole una apariencia en tonos de marrón. La reflectancia del suelo desnudo depende de su composición. En el ejemplo de la figura 5, la reflectancia en el VIS aumenta monótonamente con la longitud de onda lo que le dará a la vista un tono entre amarillo y rojo. Por otra parte, la vegetación es claramente distinguible de otros tipos de cobertura, si se trabaja con imágenes en el rango el VIS y el NIR. En el azul y el rojo la reflexión es baja debido a la absorción de la clorofila que utiliza esta energía para la fotosíntesis y tiene un pico en

el verde que explica la coloración de la vegetación. En la región del NIR, la reflectancia es mucho más alta que en el VIS debido a la estructura celular de las plantas. Así, la vegetación es claramente identificable por sus altos valores en el NIR y bajos en el VIS, propiedad que se usa para la definición de *índices sintéticos de vegetación o simplemente índices de vegetación*.

La *interpretación de las imágenes ópticas* se basa en el conocimiento de las firmas espectrales de los diversos materiales, de origen natural o antropogénico que cubren la superficie terrestre.

En esta tesis se usan *imágenes multiespectrales* provenientes de distintos sistemas satelitales que se detallan más adelante. El número de bandas disponible depende del sistema. Cada banda de una imagen puede ser visualizada individualmente en escala de grises y la combinación de tres bandas simultáneas puede ser visualizada como una imagen compuesta en color. Dependiendo de las longitudes de onda de la banda, la imagen puede ser en *color real* o en *falso color*. La interpretación de estas imágenes en color requiere el conocimiento de las firmas espectrales de los blancos en la escena.

Para desplegar las imágenes en color se usan los tres colores primarios: rojo, verde y azul. Cuando estos colores son combinados en distintas proporciones, producen diferentes colores del espectro visible. Al asociar cada banda espectral a un color (no necesariamente las bandas del visible) se obtiene una imagen color compuesta. Si las bandas de la imagen multiespectral incluyen los colores primarios (rojo, verde, azul), estas tres bandas pueden ser combinadas para producir una imagen color real.

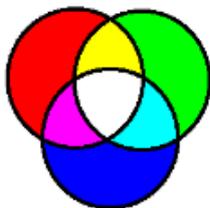


Figura 6. Representación de los colores primarios y sus combinaciones. Fuente: Velasco (2008)

Las bandas de las imágenes multiespectrales se pueden combinar para acentuar áreas con distinta cobertura. Por ejemplo en el caso de la vegetación una combinación puede ser el cociente entre las bandas NIR y RED. Este cociente es conocido por sus siglas en inglés RVI (*Ratio Vegetation Index*).

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \quad (2)$$

Como la vegetación tiene alta reflectancia en el NIR, pero baja en el RED, las áreas cubiertas por vegetación tendrán altos valores de RVI comparados con los de áreas sin vegetación. Otro índice muy usado es el denominado en inglés Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) que se calcula con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots(3)$$

Los valores de este índice oscilan entre 1 y -1, correspondiendo los valores más altos a coberturas con vegetación vigorosa y los negativos pueden corresponder a superficies de agua y/o nubes. La imagen de NDVI puede tomarse como una banda y combinarse con otras bandas de la imagen multiespectral para discriminar distintos tipos de vegetación.

En este trabajo se utilizan, además del NDVI, otros índices, resultado de combinaciones multiespectrales que se explican en más adelante.

La interpretación de las imágenes en el presente trabajo se basa fundamentalmente en la información radiométrica y espectral de las imágenes. Previo a la interpretación, es necesario aplicar técnicas de procesamiento y análisis de las imágenes, para extraer de éstas, la mayor cantidad de información posible. La elección de las técnicas específicas o algoritmos a usar depende del objetivo de cada área de aplicación y proyecto individual.

Previo al análisis es necesario procesar los datos crudos para corregir cualquier distorsión en la imagen por las características del sistema de adquisición y/o de las condiciones en que se toma la imagen. Esta etapa se suele denominar como pre-procesamiento de la imagen.

De acuerdo a las necesidades o requerimientos del usuario, hay algunas correcciones estándar que se pueden realizar en las estaciones receptoras antes que las imágenes sean entregadas al usuario final. Estos procedimientos pueden incluir correcciones radiométricas por alguna respuesta no uniforme del sensor en toda la imagen, y correcciones geométricas para eliminar las distorsiones debidas al ángulo de observación (observación oblicua) y a la rotación terrestre. Los procesamientos siguientes corresponden a lo que se denomina calibración de la imagen, esto es convertir los valores digitales (ND) en valo-

res de una variable física, en general radiancias, de las cuales según las longitudes de onda de las bandas del sensor se pueden derivar reflectancias, temperaturas radiantes u otras variables bio-geofísicas de interés.

Una vez que las imágenes están procesadas, éstas pueden ser transformadas a un sistema de proyección geográfica específico. Para una localización geográfica precisa de un área de la imagen es necesario conocer lo que se denominan puntos de control en superficie cuyas siglas en inglés son (GCP), a este proceso se lo llama georeferenciar. Sobre una imagen georeferenciada en una proyección determinada es posible superponer datos vectoriales que representan límites naturales (costas de lagos, ríos, mares, etc.) o límites políticos (países, provincias, etc.) o vías de comunicación o todo otro tipo de información de interés que esté georeferenciada, y todo este conjunto de información es manejable mediante un sistema de información geográfica (SIG).

Para ayudar a la interpretación de las imágenes se puede mejorar la apariencia visual de los objetos a través del uso de técnicas de realce. Entre ellas se pueden mencionar las que mejoran el contraste y la aplicación de filtros espaciales para destacar bordes. Estas técnicas se aplican banda por banda. Cuando se trabaja con imágenes multiespectrales se pueden aplicar combinaciones de tres bandas para desplegar la imagen que puede resultar de color natural o falso color dependiendo de las bandas disponibles y de interés. En el caso de las imágenes multiespectrales también es posible aplicar algoritmos que combinan bandas que se denominan índices sintéticos. Un ejemplo de estos es el NDVI citado anteriormente y otros que se utilizan en esta tesis más adelante. También existen herramientas estadísticas que incluyen lo que se conoce genéricamente como técnicas de clasificación de imágenes, que permiten discriminar diferentes tipos de cobertura de la superficie. Ya sea a través de una de estas técnicas o mediante el uso de los índices sintéticos o de alguna variable biogeofísica calculada es posible entonces producir lo que se llama un mapa temático. O sea una representación gráfica clasificada de la escena vista en una imagen. Estos mapas tienen diversas aplicaciones según el objetivo del usuario final y pueden también integrar in SIG.

La detección de cambios temporales en las superficies es una de las aplicaciones más importantes de los datos provistos por los satélites. En esta técnica se aplican prácticamente todos los conceptos mencionados anteriormente. Una síntesis de de varias de ellas puede verse en Lu et al. (2004) y Pacifici et

al. (2007). La forma más generalizada consiste en transformar las imágenes multiespectrales y-multitemporales aplicando índices sintéticos que resalten las coberturas e interés a ser monitoreadas.

## 2. Estudio exploratorio de carácter bibliográfico sobre fenómenos naturales que perturban y perjudican el ambiente.

Los fenómenos naturales que perturban y perjudican al medio ambiente son procesos naturales que han operado a lo largo de la historia de la Tierra. Estos fenómenos pueden ser de origen geológico, atmosférico, combinación de ambos u otros que no categorizan en éstos. Una sinopsis de ellos y que son objeto del presente trabajo se describe a continuación.

Entre los fenómenos de origen atmosféricos se encuentran las tormentas severas que pueden dar lugar al desarrollo lluvias copiosas, descargas eléctricas, vientos muy fuertes y tornados de distintas intensidades. Durante los meses de primavera y verano la región centro y noreste de Argentina experimenta con frecuencia tormentas que, aunque presentan distintos grados de organización (Velasco and Fritsch, 1987; Vila, 2005), suelen estar acompañadas de fenómenos de tiempo severo (Lichtenstein and Schwarzkopf, 1966; Schwarzkopf and Rosso, 1982, Celemin 1984).

Las tormentas de polvo, arena o sal, son originadas por una combinación de vientos fuertes y las características del suelo barrido por éste, como desiertos, salares, potreros en reposo, etc., son otro ejemplo de fenómenos adversos. El origen de las mismas está vinculado, en la mayoría de los casos, a la existencia de grandes superficies desérticas en distintas regiones del planeta (Song et al., 2005; Micklin, 2008). Sin embargo, el progresivo cambio de uso del suelo, como el introducido por el reemplazo de forestación natural por cultivos de granos y actividades de sobrepastoreo han favorecido la aparición de áreas expuestas de suelo en todo el planeta, incluyendo nuestro país (Solbing y Morello, 1997), desde las cuales el viento, dependiendo de su intensidad, puede levantar las partículas del suelo hasta distintas alturas, y a grandes distancias. Las tormentas de sal se diferencian de las tormentas de polvo por su composición química, su granulometría y los procesos de circulación (Abuduwailli et al., 2010).

La OACI (Organización de aviación civil Internacional) publicó en 2010 un documento (AMOFSG/8-SN No. 40) en el que reclama por una clara definición del fenómeno "tormenta de polvo o arena". En ese documento se pueden ver también, además de las definiciones de la OMM (Organización Meteorológica Mundial), las usadas en Canadá, Australia y la AMS (American Meteorological Society). La diferencia entre polvo y arena está determinada por el tamaño de las partículas.

En nuestro país, por sus características geográficas, son más esperables las tormentas de polvo. Por ejemplo, luego de un periodo de sequía sobre regiones de práctica agrícola, con amplios potreros arados, la ocurrencia de vientos fuertes levanta el polvo de la superficie arrastrándolo a grandes alturas, dependiendo de la estabilidad vertical de la atmósfera y sobre grandes áreas dependiendo de la estructura del campo de vientos. Estas tormentas pueden tener distintas organizaciones, ya sea en forma de frente o de remolinos. Su inicio es brusco y producen una marcada disminución de la visibilidad. El proceso de erosión que sufren los potreros arados, en periodos de sequía y subsiguiente ocurrencia de vientos fuertes afectan la calidad de los suelos para futuras explotaciones, por lo que es necesario desarrollar investigaciones conducentes a paliar o mitigar sus efectos (Sivakumar, 2005).

Cuando el cauce de un río recibe más agua de la que su canal puede contener, se desborda sobre sus orillas y ocupa parte o toda su llanura de inundación. Pero en realidad, los desbordamientos son tan comunes que a menos que causen graves daños materiales o víctimas, rara vez pasan de ser tema de paso en los medios de comunicación (Wicander and Monroe, 2000).

La información que puede extraerse de los datos tomados por los sensores remotos ofrece perspectivas muy valiosas tanto para el análisis de los cuerpos de agua como del terreno que los circunda y pueden ser especialmente útiles cuando es necesario estudiar fenómenos que abarcan áreas extensas (Salomonson, 1983 y Kuittinen, 1992). En cualquiera de los casos, es una necesidad fundamental su monitoreo durante las tres fases de un evento de inundación: antes, durante y después, para minimizar su impacto en términos de riesgo para la vida y los daños a la propiedad (Velasco et al., 1998, Gulizia y Velasco, 2009). Si bien estos datos no reemplazan las mediciones in situ en puntos específicos, son un complemento importante de los datos de campo (Campbell, 1987).

Las causas que originan un incendio forestal o rural, pueden ser diversas. Entre ellas se encuentran las intencionadas que pueden estar motivadas por quemas no autorizadas, ilegales e incontroladas de superficies, ya sea para la eliminación de rastrojos o matorrales o para regeneración de pastos (Molina, 1997), negligencias y otras causas accidentales como

las quemas agrícolas autorizadas (pero en las que los autores perdieron el control del fuego extendiéndose éste por la superficie forestal colindante), las colillas y hogueras mal apagadas, quema de basuras y trabajos forestales, y las naturales que se deben casi siempre a la acción de un rayo. Los incendios de esta naturaleza, pueden causar un gran daño ecológico en vastas extensiones de terreno, sobre la flora, la fauna, los recursos hídricos y los suelos y producir daños económicos sobre productos de madera y otros materiales como alambrados, galpones, corrales, viviendas, etc., al mismo tiempo devastan el paisaje, causando un daño especialmente significativo para las zonas turísticas.

La teledetección es una herramienta de gran utilidad en el tema de incendios en ambientes naturales, ya que puede ser aplicada en diferentes aspectos relacionados como la caracterización de las condiciones propicias para su inicio y desarrollo, la detección, seguimiento y/o evaluación en tiempo real, cuantificación de las áreas afectadas, y el análisis posterior al evento (Sione W.F, 2006; Di Bella et al., 2008). La cartografía de áreas quemadas, preparada a partir de la teledetección se ha desarrollado notablemente en los últimos años, debido al creciente interés por obtener una evaluación global de las áreas afectadas por incendios (Arhen et al., 2001; Opazo y Chuvieco, 2007). Con este enfoque global, el sensor más utilizado ha sido el NOAA-AVHRR, gracias a su buena resolución espectral y adecuada frecuencia temporal, si bien en los últimos años se han introducido nuevos sensores que cuentan con una mejor resolución espectral que permiten estudios más detallados, como el sensor MODIS de los satélites TERRA y AQUA (Chuvieco, 2006).

Dentro de los procesos dinámicos internos de la Tierra, los volcanes en erupción son una de las manifestaciones más importantes. En algunas partes del mundo, las erupciones volcánicas son acontecimientos comunes, como es el caso de las Filipinas, Hawai, etc. donde sus pobladores son conocedores de los volcanes y de sus efectos. El vulcanismo se refiere a los procesos por los cuales el magma y los gases asociados ascienden a través de la corteza terrestre y son expulsados sobre la superficie o a la atmósfera (Wicander and Monroe, 2000). En el caso de los fenómenos de origen volcánico el estudio de las cenizas volcánicas es muy importante por sus efectos en el clima y por el peligro que éstas representan para la aviación (Prata, 1989; Ellrod, 2012).

En nuestro país los volcanes activos se sitúan preferentemente en la vecina República de Chile o bien en el límite internacional pero, por el efecto de la circulación atmosférica en latitudes medias, la dis-

persión de cenizas se produce preferentemente sobre el territorio y espacio aéreo argentino. Por lo tanto, es importante evaluar metodologías para desarrollar sistemas de pronóstico de dispersión y depósito de ceniza en nuestra región, que aplicados de manera operativa ayudaría a la toma de decisiones y al planteo de planes de contingencia a fin de evitar mayores catástrofes (Osores, et al., 2012).

Las cenizas volcánicas afectan al sistema climático y constituyen un riesgo potencial para las operaciones aéreas, (Prata, 1989, Ellrod, 2012). Después de una erupción volcánica se inyectan en la atmósfera grandes cantidades de partículas y gases que perturban el balance radiativo y pueden generar problemas en la operabilidad aeronáutica, desde daños en las aeronaves hasta dificultades para las operaciones de aterrizaje y despegue. A esto se añade el impacto que las partículas en suspensión pueden causar en la salud de los seres vivos.

Prata (1989) trabajando con un modelo de transferencia radiativa y las emisiones provenientes de una nube volcánica reciente encontró un efecto reverso en la absorción, con respecto a lo observado sobre nubes de agua y/o hielo, es decir que la emisión de radiación infrarroja en la ventana de los 10µm a los 13µm aumenta al aumentar la longitud de onda. Este efecto es usado para detectar nubes volcánicas, calculando la temperatura de brillo en ambos canales haciendo su diferencia, esta será negativa en presencia de nubes volcánicas. Este método se conoce como el método de “absorción inversa” o “split window” y ha sido aplicado con bastante éxito, pero hay algunos casos de excepción y a medida que se disponen de nuevos sensores, también se están desarrollando nuevas técnicas, con las que se espera obtener estimaciones más precisas sobre el área cubierta por la nube de ceniza, altura de su tope y otros parámetros de interés (Ellrod, 2012).

### **3. Adquisición y análisis de imágenes para el estudio de fenómenos naturales.**

Para este trabajo se utilizan datos provenientes de diferentes sensores: a) el AVHRR (Advanced Very High Resolution) correspondiente a la serie de satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), b) el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites TERRA y AQUA.

Las imágenes tomadas por el sensor AVHRR fueron recibidas en tiempo real a través de una antena ubicada en el Observatorio Central Buenos Aires (CABA), que depende del Departamento Teledetección y Aplicaciones Ambientales del Servicio Meteorológico Nacional. En tanto que las imágenes del sensor MODIS fueron obtenidas a través del sitio MODIS Rapid Response System de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Entre los sensores satelitales utilizados, hay diferencias en la resolución espacial. Aquellos que tienen mayor resolución, obviamente y como queda ilustrado en el presente trabajo, permiten una mejor evaluación y discriminación de las coberturas del suelo y otros elementos. Sin embargo, hay ciertos problemas latentes como son la oportunidad de la pasada del satélite (horario y período de revisita) y el requerimiento de condiciones de cielos con poca nubosidad o despejados dependiendo del objetivo de estudio.

Entre los sensores considerados para este trabajo la menor resolución, 1100 metros, corresponde a los datos AVHRR y mejorando a 500 m, en los datos MODIS. En cambio, en cuanto a la frecuencia de revisita se refiere se pueden obtener mayor frecuencia de las imágenes AVHRR y luego MODIS, por lo tanto la elección más adecuada de datos vuelve a depender del objetivo.

Algunas de las imágenes originales adquiridas estaban en formato crudo, por lo que y previamente a su aplicación fueron calibradas radiométricamente y, además, según la aplicación, fueron georeferenciadas, según se explica en el punto siguiente.

Además de las imágenes, se utilizaron como datos de verdad de terreno, los disponibles en las Estadísticas y Boletines, y los registros de estaciones meteorológicas, publicados por el Servicio Meteorológico Nacional. También se consultaron publicaciones de organismos especializados y crónicas periodísticas que se citan adecuadamente en los ítems donde son utilizadas.

#### **3.1 Nivel de procesamiento**

Las imágenes originales adquiridas, conforman archivos cuyo formato se denomina nivel "1b", lo que implica que las imágenes tienen ya un nivel inicial de procesamiento, pero este varía de sensor en sensor.

En el caso del sensor AVHRR, para cada uno de los cinco canales o bandas, los datos de la imagen son números digitales (ND), que son proporcionales a la energía recibida por el sensor y que a través del proceso de calibración son convertidos a variables físicas, reflectancias o radiancias, según el canal. El archivo contiene, además de los datos necesarios para la calibración, la información necesaria para su localización y datos de telemetría y de geometría satelital y solar.

Los archivos de datos del sensor MODIS, en nivel 1b, contienen valores de radiancias y datos de geolocalización para las 36 bandas generadas por el nivel inicial 1A. Estas imágenes ya están corregidas radiométricamente y calibradas a unidades físicas y vienen acompañadas de datos adicionales que incluyen estimaciones de calidad, de error, y datos de calibración.

#### **3.2 Obtención de algoritmos específicos para la identificación y caracterización de cada fenómeno**

Estos algoritmos se implementan a partir de las firmas espectrales de cada blanco observado desde el satélite, y según el caso se aplican índices sintéticos ya desarrollados y explorados o se establecen relaciones condicionales de valores de reflectancia o emisividad.

#### **3.3 Obtención de índices sintéticos**

En este trabajo, utilizando datos obtenidos con sensores remotos que miden en distintas regiones del espectro electromagnético (Tabla I), se aplican algunos índices (Tabla II), definidos en base a las propiedades reflectivas de las distintas superficies. En forma generalizada, estos índices están definidos por el cociente entre la diferencia de reflectancia entre dos bandas y su suma.

Tabla I. Características de los sensores y bandas

Sensor AVHRR/3		
Banda	Ancho (mm)	Siglas
1	0.580-0.680	VIS
2	0.725-1.000	NIR
3A	1.580-1.640	SWIR
Sensor MODIS		
Banda	Ancho (mm)	Siglas
1	0.620-0.670	VIS
2	0.841-0.876	NIR
6	1.628-1.652	SWIR

Fuente: Elaboración propia

Tabla II. Fórmulas de índices sintéticos

NDVI	$(\text{NIR}-\text{VIS})/(\text{NIR}+\text{VIS})$
NDSI	$(\text{SWIR}-\text{NIR})/(\text{SWIR}+\text{NIR})$
NDWI	$(\text{VIS}-\text{SWIR})/(\text{VIS}+\text{SWIR})$

Fuente: Elaboración propia

El primer índice citado en la Tabla II, es muy conocido por sus siglas en inglés NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), y puede ser traducido como “índice de vegetación de la diferencia normalizada”, ha sido utilizado ampliamente desde hace varios años. Este índice fue introducido por Rouse et al. (1974). Su rango de valores está entre -1 y +1, los valores positivos representan vegetación activa y los cercanos a cero o negativos otro tipo de superficies o coberturas como terreno desnudo/sedimentos, suelo rocoso, asfalto, pavimento, cuerpos de agua, nubes, nieve/hielo y nubes. En este índice se usa la reflectancia de una banda en el rojo (~ 0,66  $\mu\text{m}$ ) y una banda en el infrarrojo cercano (~ 0,86  $\mu\text{m}$ ). La banda del rojo está ubicada en la región donde hay fuerte absorción por la clorofila, mientras que la del infrarrojo cercano está en la meseta de alta reflectancia de los doseles vegetales. Esta firma espectral es exclusiva de la vegetación terrestre fotosintéticamente activa (Colwell, 1974). Trabajos como los de Gates et al. (1965) y Allen y Richardson (1968) indican que las plantas bajo condiciones de estrés tienen menor reflectividad en el infrarrojo cercano y por lo tanto valores bajos de NDVI.

Otro índice ampliamente usado, es el denominado “índice de agua de la diferencia normalizada”, siendo sus siglas en inglés NDWI (Normalized Difference Water Index). Éste fue propuesto por McFeeters (1996), para delinear fundamentalmente cuerpos de agua y realzar su presencia en las imágenes Landsat MSS, y simultáneamente eliminar los rasgos del suelo y de la vegetación. Este índice puede ser útil también para el análisis de turbidez del agua o de su calidad, sin embargo, al igual que ocurre con el índice NDVI, que no puede separar tipos de vegetación pero si cuantificarla, el NDWI permite cuantificar la turbidez pero sin distinguir la componente, por ejemplo, clorofila o sedimentos. Li y Sheng (2008) buscando un uso universal del NDWI, usaron imá-

genes Landsat, cubriendo todo el globo terrestre, y encontraron que si bien este índice tiene altos valores para las superficies con agua, respecto a otras superficies éste varía con las condiciones del agua, por ejemplo, agua dulce, agua salada, agua en hielo y agua en nieve, siendo los valores más altos para la primera y decreciendo sucesivamente. En cambio la vegetación y los suelos desnudos tienen valores muy bajos de NDWI, permitiendo así la delineación de las superficies de agua.

Si bien estos resultados son válidos casi universalmente, hay algunas excepciones como las sombras producidas por nubes o montañas y ciertos suelos que pueden ser confundidos con agua Gao (1996) usó este índice para detectar estrés por sequía en la vegetación, ya que como es sabido, el agua absorbe en la región de las SWIR, ya sea desde una superficie libre o desde el interior de las células de las plantas. Tanto este autor como otros autores, por ejemplo Gu et al. (2007), han usado en forma combinada los índices NDVI y NDWI de acuerdo a sus objetivos, obteniendo mejores resultados que con el uso individual de ellos.

Para discriminar entre suelos desnudos, de suelos con vegetación y cuerpos de agua (Supannika et al., 2009) usaron el Normalized Difference Soil Index (NDSI) o en castellano “índice de suelo de la diferencia normalizada”. Nombrar este índice solamente por sus siglas puede llevar a confusión ya que en la bibliografía es más frecuentemente usado para referirse al Normalized Difference Snow Index (Índice de nieve de la diferencia normalizada).

En la Tabla II se presentan las fórmulas generales utilizadas para el cálculo de los diferentes índices utilizados. Hay que tener presente, sin embargo, que los rangos espectrales difieren ligeramente según el sensor, ver Tabla I.

En términos generales, el índice NDVI tiene valores relativamente altos, en los suelos con abundante cobertura vegetal, en cambio el NDSI, tiene valores algo más bajos y en valor absoluto, alrededor del cero, en los suelos desnudos, y por otra parte NDWI, en las superficies con agua, tiene valores positivos más bien altos y por el contrario los valores el NDVI son muy bajos sobre agua, a menos que haya algo de vegetación u otro residuo que tenga mayor reflectancia en el NIR.

A partir del conocimiento de los índices anteriores, Takeuchi y Yasuoka (2004) propusieron una composición en falso color, asignando el NDSI al cañón rojo, el NDVI al verde y el NDWI al azul, y usaron las siglas NDXI para identificar el resultado de esa

composición, que denominaron Normalized vegetation, soil and water index (índice normalizado de vegetación, suelo y agua).

Todos los índices descritos pueden ser calculados con los datos tomados por los sensores que utilizan las bandas del espectro visible (rojo), NIR y SWIR. Estos índices son útiles para diferenciar los suelos con mayor vegetación, de los suelos con menos vegetación, zonas urbanas y cuerpos de agua, facilitando la preparación de máscaras y/o de mapas temáticos mediante medios automatizados. Resultan especialmente útiles cuando se deben dar respuestas rápidas ante la ocurrencia de una emergencia y la demanda de los entes responsables de la gestión correspondiente.

---

#### 4. Análisis de fenómenos naturales: métodos y resultados obtenidos.

##### 4.1 Tormenta convectiva severa en el NE de Argentina

Durante el transcurso del año 2009 un gran sector del territorio argentino estuvo afectado por una intensa sequía, mientras que otras regiones menores experimentaron tormentas muy severas que produjeron lluvias localmente intensas y hasta tornados. En el NE de Argentina, el 7 de septiembre, se registraron tormentas muy severas acompañadas de la ocurrencia de tornados que afectaron la zona selvática de la provincia de Misiones y un área lindante en Brasil. El tornado sobre esta provincia afectó gravemente a la comuna de San Pedro, produciendo la muerte de 10 personas, más de 40 heridos, ocasionó daños que se califican como devastadores, dejando cientos de personas sin techo (fuente: Cruz Roja Argentina). El fenómeno fue clasificado por los especialistas como tornado de intensidad F4 en la escala Fujita, al que se asocian velocidades de viento entre 320 y 420 km/h.

La figura 7 es una imagen térmica (satélite NOAA-17, 07/09/09, 20:30 hora local), en la que se aplicó una técnica de realce para destacar los valores en el rango de temperaturas de  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $-62^{\circ}\text{C}$ . El recuadro amarillo destaca la zona donde se produjo más tarde el tornado que azotó la comuna de San Pedro, (Misiones), y los topes de nubes alcanzaron grandes alturas llegando a registrarse en las imágenes valores de temperatura tan bajos como  $-87,3^{\circ}\text{C}$ . Esta imagen puede tomarse como representativa del tipo de tormenta convectiva severa que puede dar origen a tornados.

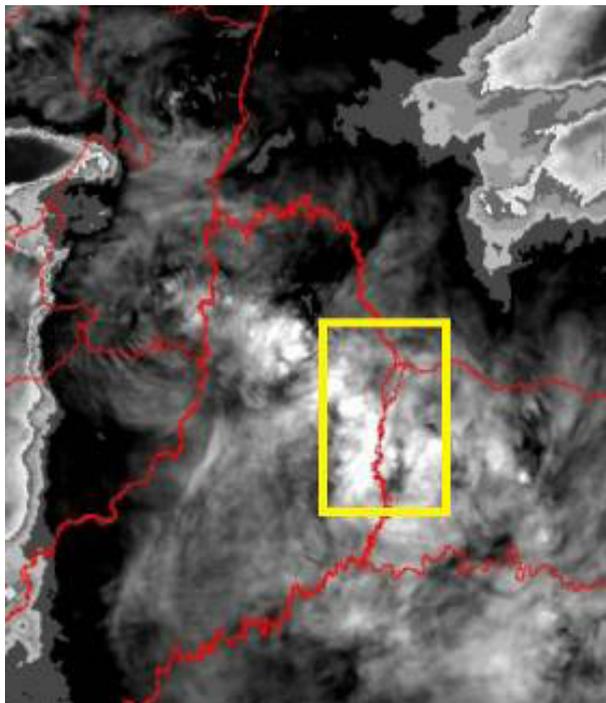
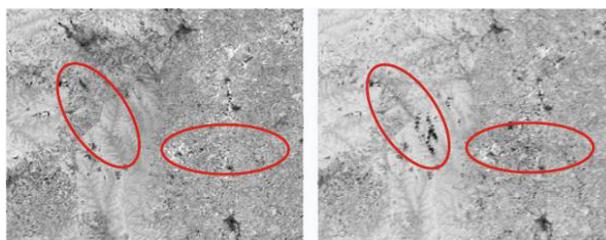


Figura 7. Imagen realizada NOAA-17 20:30 HOA  
Fuente: Elaboración propia

Para identificar y analizar la traza del tornado se utilizó como técnica de “detección de cambios”, la que se basa en determinar las modificaciones que sufre la vegetación por la acción de los vientos intensos asociados al tornado.

En este caso se obtuvieron las imágenes de NDVI, usando datos del sensor MODIS (AQUA) con 250 m de resolución, una correspondiente al 31/08/09 a las 17:30 UTC (anterior al evento) y otra del 14/09/09 a las 17:45 UTC (posterior al mismo). En las figuras 8 a) y b), imágenes de NDVI, los óvalos en rojo destacan las áreas sobre las que se produjeron tornados. Los grises claros corresponden a valores altos del índice y los oscuros a valores bajos. En la figura 8b) se puede apreciar un aumento de las áreas con color gris oscuro y negro producto de la disminución de los valores de NDVI, debidos a los daños ocasionados por los efectos del tornado sobre la vegetación.



a) 31/08/09                      b) 14/09/09  
Figura 8. NDVI, a) previa a la ocurrencia del tornado y b) post-tornado. Fuente: Elaboración propia

La figura 9, muestra una imagen de la diferencia de los NDVI entre las dos fechas consideradas. En ésta (ovalo izquierdo) se puede observar el rastro del paso del tornado por el daño producido en la vegetación de la superficie (en gris más oscuro y negro). De acuerdo a éstos se desprende que el tornado se desplazó en dirección noroeste a sudeste, a lo largo de aproximadamente 24 km. Esta trayectoria seguida por el tornado pasa al norte de la localidad de Tobuna e ingresa al Parque Provincial “El Piñalito”. En el óvalo de la derecha se observa otra franja menos definida en las cercanías de Guaraciaba, Brasil, de unos 22 Km. de largo.

En la Figura 10, para facilitar la ubicación de las áreas afectadas, se presenta la imagen anterior con el límite internacional que separa Argentina de Brasil, en verde, y las localidades anteriormente mencionadas.

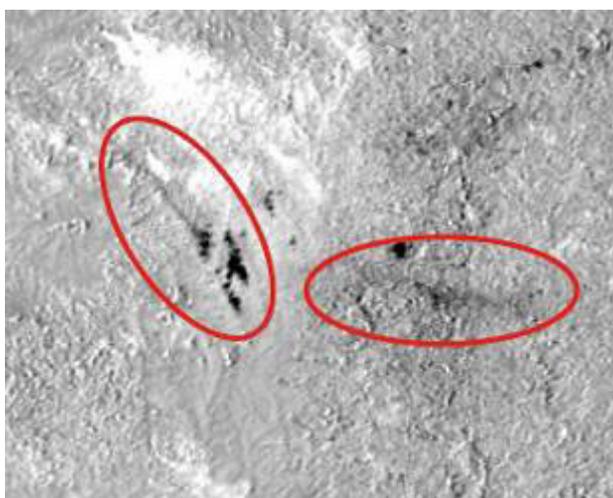


Figura 9. Imagen diferencia de NDVI  
Fuente: Elaboración propia

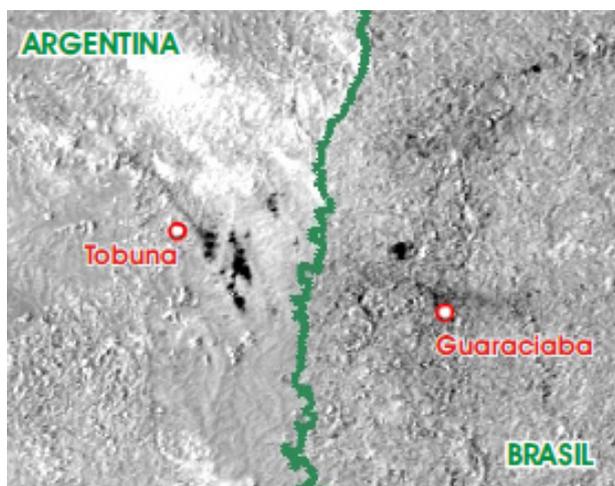


Figura 10, ídem figura 9, con capa del límite internacional y localidades. Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Inundaciones en los ríos Paraná inferior y Areco (provincia de Buenos Aires).

### 4.2.1 Inundación en el río Paraná inferior

A partir del mes de diciembre de 2006, comenzó un período de lluvias copiosas en las nacientes del río Paraná en territorio brasileño y como consecuencia de ello, se inició una onda de crecida que fue propagándose aguas abajo en los primeros meses del año 2007, sumado a esto se produjeron importantes lluvias principalmente a partir de la tercera década de marzo de ese año, donde los máximos totales de lluvia acumulada se observaron en las cuencas de los ríos Paraná inferior y Uruguay inferior.

Los valores de precipitación de esta década fueron mayores a 350 mm en la zona mencionada (figura 11). Como consecuencia se produjo el aumento del caudal de los ríos Paraná y Gualeguay que suscitaron graves inundaciones en las ciudades de Santa Fe, Rosario, Gualeguay y en las islas del Delta, lo que trajo aparejado perjuicios socio económicos, que requirieron la asistencia de distintos organismos nacionales.

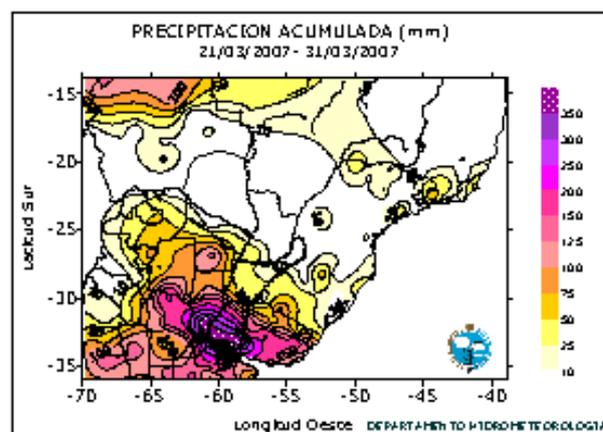


Figura 11. Precipitación acumulada para la tercera década de marzo de 2007

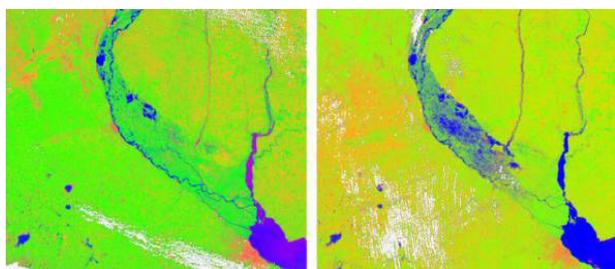
Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Año 2007

En este caso se utilizaron cuatro imágenes del sensor MODIS (TERRA) de 500 m de resolución espacial correspondientes a las siguientes fechas: 13/01/07 14:05 UTC, 20/03/07 13:55 UTC, 03/04/07 14:05 UTC y 28/09/07 23:49 UTC, para monitorear un área que incluye el río Paraná Inferior desde la ciudad de Diamante hasta su desembocadura en el Río de la Plata. A partir de esos datos, se calculó el índice NDXI para cada fecha, obteniéndose un mapa temático por fecha, lo que permitió seguir la evolución de los cuerpos de agua desde una etapa previa a una posterior a la inundación.

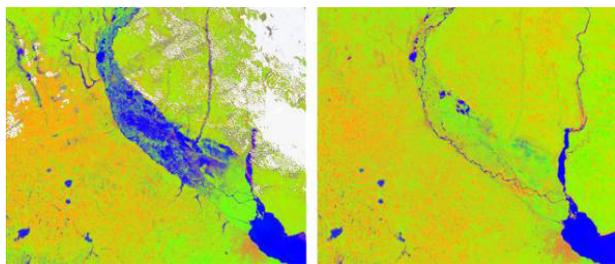
En las figuras 12a) a 12d) se muestran las imágenes de NDXI obtenidas para cada fecha, donde en color

azul aparecen las superficies de agua, en verde las superficies con vegetación, y los naranjas suaves representan suelos con poca o ninguna cobertura vegetal, y el naranja más oscuro las zonas urbanas. Las nubes aparecen en grises y blanco, ya que en este caso no fueron previamente filtradas o enmascaradas.

Una simple inspección visual de estas imágenes permite ver la evolución de los cursos de los ríos principales en el área y en particular en el valle de inundación del río Paraná en su tramo inferior. Además, estas imágenes permiten estimar la extensión de las áreas afectadas por la inundación y pueden ser utilizadas para establecer áreas vulnerables que pueden ser afectadas periódicamente por inundaciones.



a) 13/01/07 pre-inundación      b) 20/03/07 inicio inundación



c) 03/04/07 inundación plena      d) 28/09/2007 – bajante

Figura 12. Imágenes de NDXI sensor MODIS (TERRA).

Fuente: Elaboración propia

Este caso es un claro ejemplo de la utilidad de las imágenes satelitales para evaluar las superficies inundadas y monitorear su evolución con el tiempo, cuando se aplica un procesamiento adecuado de la información original. Los resultados aportan datos útiles para la realización de inventarios sobre las áreas que pueden ser afectadas periódicamente por inundaciones. Esta información puede ser utilizada por los organismos responsables de la planificación y ordenamiento ambiental.

#### 4.2.2 Inundación en el río Areco

En Argentina, en alguna zona de la gran llanura Chaco Pampeana, casi todos los años se produce una inundación que deja su secuela de daños en poblados, en las vías de comunicación y en la actividad agropecuaria en general. La causa de estas inunda-

ciones tiene origen meteorológico, ya que cuando se producen lluvias copiosas sobre relieves muy planos, se saturan rápidamente los suelos, las áreas deprimidas y las lagunas. Los ríos y arroyos que surcan la provincia de Buenos Aires no son caudalosos, en general desembocan en el Río Paraná, en el Río de la Plata o en el Océano Atlántico y son altamente sensibles a las lluvias repentinas y extremas o regulares y persistentes.

En este caso el análisis se focaliza en el río Areco (figura 13). Este río, de acuerdo a la información de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/MapaCuencas.html>), pertenece a la cuenca de arroyos del NE de Buenos Aires y corre por la denominada subregión húmeda pampeana. Esta subregión, topográficamente, es una extensa llanura con ligeras ondulaciones, que al estar surcada por el río Areco y algunos pequeños arroyos la convierte en una zona apta para las explotaciones agrícolas y ganaderas en cualquiera de sus manifestaciones. Además, el sector del río cuando atraviesa la localidad de San Antonio de Areco, da marco a un excelente desarrollo turístico, dadas las características históricas de la ciudad y las alternativas que brindan sus instalaciones para la vida al aire libre, incluyendo la pesca deportiva.

Sin embargo, estas actividades pueden ser repentinamente alteradas cuando por la ocurrencia de lluvias localmente intensas, el río sale de su cauce afectando el área circundante y todo lo que encuentra aguas abajo. En este punto se hace un análisis de la inundación ocurrida, en esta cuenca durante el verano 2009-2010. El desborde del mismo produjo graves daños en el poblado de San Antonio de Areco y el corte de una importante autopista.

El caso presentado, es un ejemplo donde se usa el índice NDXI, en una cuenca menor para estimar los cambios producidos por una crecida y consecuente desborde del río Areco. Los datos utilizados fueron obtenidos por el sensor MODIS (TERRA) en 250 m y 500 m de resolución espacial para las siguientes fechas: 08/10/09 14:10 UTC, 27/12/09 14:10 UTC, y 14/01/10 14:00 UTC.

Para mejorar la resolución espacial de los mapas clasificados, se aplicó la técnica de fusión (HSV - Hue Saturation Value) usando la banda 2 (NIR), con 250 m de resolución, lo que permitió mejorar notablemente la delimitación de las zonas inundadas. Los detalles de esta técnica pueden verse, por ejemplo, en Lillesand and Kiefer (1994), Chuvieco (1996), Sabins (1997).

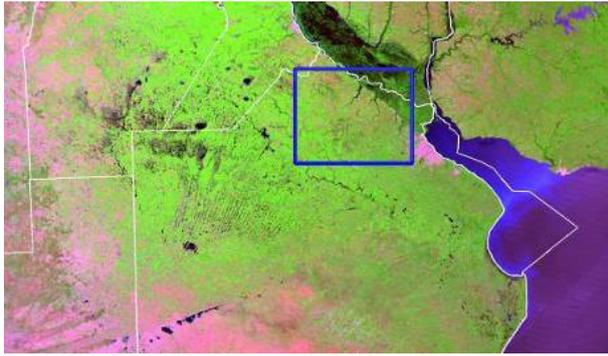
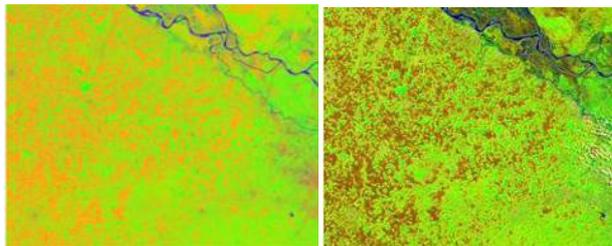
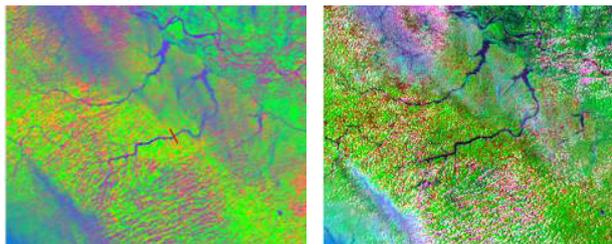


Figura 13. El recuadro azul enmarca la cuenca del Río Areco, en el NE de la provincia de Buenos Aires. Imagen MODIS (TERRA) 14/01/10, 14:00 UTC, RGB (721). Fuente: Elaboración propia

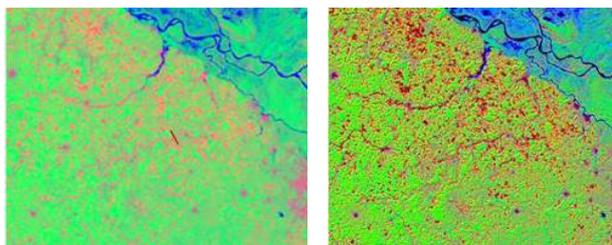
En la figura 14 se muestra una secuencia de imágenes del área recuadrada en la figura 13, para tres fechas, en las cuales se puede observar la región antes del episodio de inundación, durante y después. En las imágenes de la columna izquierda (NDXI con 500m de resolución), los tonos naranja corresponden a suelo desnudo o con escasa cobertura vegetal y/o vegetación seca. Las imágenes de la columna derecha corresponden a las mismas escenas pero con su resolución espacial incrementada por el proceso de fusión.



a) 8/10/09



b) 27/12/09



c) 14/01/10

Figura 14. Columna izquierda: NDXI original con 500 m de resolución, derecha: imagen fusión con 250 m. a) condiciones previas a la inundación: 08/10/09, 14:10 UTC, b) durante la inundación: 27/12/09, 14:10 UTC y c) después la inundación: 14/01/10, 14:00 UTC. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 15 se presentan las respuestas de los índices a lo largo de la transecta (línea) que cruza el río Areco. La transecta se identifica en rojo en la figura 14b), izquierda, los valores del NDVI (verde) son bajos sobre el cauce del río (cercanos a 0) coincidiendo con una respuesta alta de NDWI (azul) con un valor máximo de 0.3. El índice de suelo (NDSI), graficado en blanco, muestra un mínimo en coincidencia con un máximo de índice de vegetación (NDVI) y un mínimo de NDWI. Los tres índices en conjunto reflejan muy bien los cambios de cobertura a lo largo de la transecta.

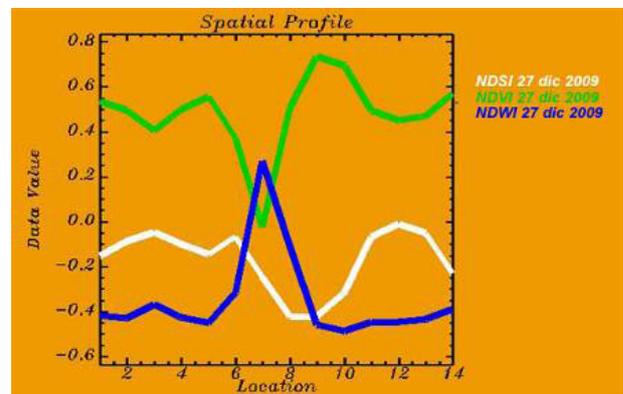


Figura 15. Transecta correspondiente al 27/12/09, ver figura 14b) izquierda. Fuente: Elaboración Propia

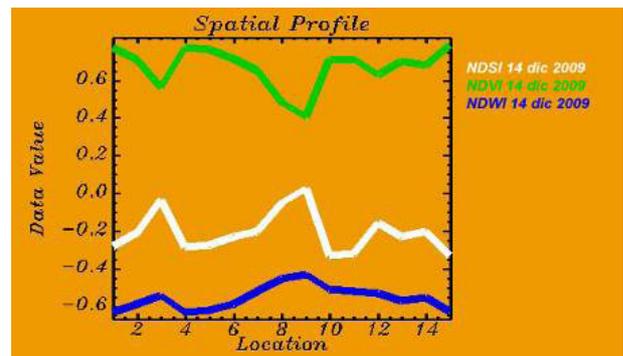


Figura 16. Ídem figura 15c) para el 14/01/10. Fuente: Elaboración Propia

### 4.3 Detección y monitoreo de incendios forestales en la Provincia de Córdoba.

#### 4.3.1 Caso I. Septiembre 2008.

El incendio estudiado en este punto, se desarrolló en las Sierras Chicas de la provincia de Córdoba (Argentina) durante el inicio del mes de septiembre de 2008. De acuerdo a los datos oficiales del Ministerio de Gobierno, Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF), durante los meses de agosto y septiembre el índice de riesgo de incendio era muy alto en la Provincia de Córdoba y esta tuvo alerta roja de incendios durante los días 1, 2 y 3 de septiembre de 2008. El incendio estudiado estuvo descontrolado, en gran parte por las condiciones atmosféricas, ya que la temperatura en esos días alcanzó los 35°C, los vientos oscilaron entre 35 y 60 kilómetros por hora y el bajo porcentaje de humedad fue muy bajo, contribuyendo así a generar condiciones muy propicias para favorecer su desarrollo y propagación.

Según lo informado por los medios periodísticos el fuego consumió decenas de hectáreas de pastizales naturales y arbustos, algunas especies de árboles añejos en la zona serrana de Carlos Paz. En Monte Buey afectó sembradíos de trigo y soja, y provocó la huida despavorida de numerosa fauna autóctona por las llamas, provocando también la evacuación de más de 125 personas en diferentes puntos de las serranías por el peligro y el humo reinante en distintas zonas, afortunadamente no se registraron víctimas. Las consecuencias de los incendios se hicieron sentir en la ciudad de Córdoba, donde hubo presencia de humo y lluvia de cenizas, por lo que el Aeropuerto Internacional Ambrosio Taravella fue cerrado por algunas horas. También en distintas oportunidades, varias rutas nacionales por la cercanía de las llamas y el humo que reducía la visibilidad y tornaba peligrosa la circulación debió cerrarse.

Las zonas afectadas por los distintos focos de incendios fueron varias. La de Candonga en Ascochinga (a 40 kilómetros al noroeste de la Capital), fue uno de los principales lugares más afectados, donde las llamas arrasaron cerca de dos mil hectáreas de pastizales. Otras zonas fueron la de Ongamira, San Jorge, Bajo de Olmos, La Paz, Santa Catalina La Pampa (a 3 Km. de Ascochinga), Los Terrones, el sector del Dique Los Alzanes, el Uritorco, la zona de Capilla del Monte, La Cumbre, La Granja, Carlos Paz Sierra y en Monte Buey (a unos 265 kilómetros al sur de la Capital). En Alta Gracia, Despeñaderos, La Falda, La Calera y Jesús María son otras localidades donde también se registraron distintos focos.

Para la detección de focos de fuego y la evaluación del área dañada por éstos se aplicaron técnicas de teledetección que combinan el uso de bandas espectrales en el rango del visible y del infrarrojo reflectivo del sensor AVHRR/3 (Tabla III). Las imágenes utilizadas fueron las correspondientes al satélite NOAA-18 del año 2008, con una resolución espacial de 1000 m para los días 0/09/08 a las 18:09 UTC, 02/09/08 17:59 UTC, y 03/09/08 17:48 UTC. Las mismas fueron calibradas y convertidas a valores de radiancia y reflectancia y georreferenciadas en proyección Mercator.

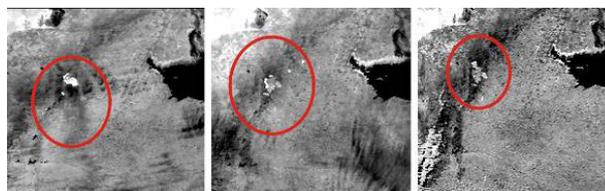
Tabla III. Características de las imágenes.

Sensor AVHRR/3		
Banda	Ancho (µm)	Siglas
1	0.580-0.680	VIS
2	0.725-1.000	NIR
3B	3.550-3.930	MIR

Fuente: Elaboración propia

#### Detección de focos de fuego

Los focos de incendio tienen un alto valor de radiancia en la banda 3B (Tabla VI). Los que se estudian en este caso aparecen enmarcados por óvalos rojos en las figuras 17a) a 17c). Hay otros sectores en la imagen, que si bien tienen un alto valor de radiancia en esta banda, tienen valores muy bajos en las otras dos, por lo que una composición color de ellas puede resaltar estas diferencias como se explica más abajo.



a) 01/09/08      b) 02/09/08      c) 03/09/08

Figura 17. Imágenes MIR (Banda 3B).

Fuente: Elaboración propia

Con una combinación en falso color de las tres bandas, con la 3B (MIR) en el rojo, la 2 (NIR) en el verde y la 1 (VIS) en el azul (figura 18), se obtiene una imagen donde es posible apreciar visualmente el foco de incendio (rojo) y su columna de humo (celeste). Las nubes que irradian fuertemente en el VIS y NIR, pero débilmente en el MIR debido a la presencia de la fase hielo, aparecen en color cian y en celeste la nube de humo. En color blanco se observan las nubes que irradian fuertemente en las tres bandas (nubes de topos menos fríos). Sin embargo, hay que notar que también aparecen blancas las zonas de suelos con alta salinidad, debido a que sobre la sal la respuesta es igualmente alta en las tres bandas. En cambio donde predomina la cobertura vegetal debido a la alta respuesta en el NIR, su apa-

riencia es de color verde, en tanto que los rosados representan superficies con escasa o ninguna cobertura vegetal, y el agua aparece oscura por su baja respuesta en las tres bandas. La pluma de humo en la imagen del día 1, está muy definida y extendida hacia el sur, indicando la ocurrencia de vientos fuertes del sector norte. En cambio, al día siguiente el viento rotó a la dirección opuesta, y prevalece en esa dirección el día 3.

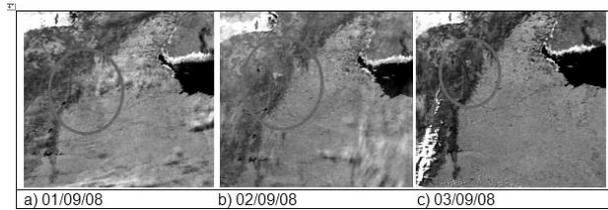


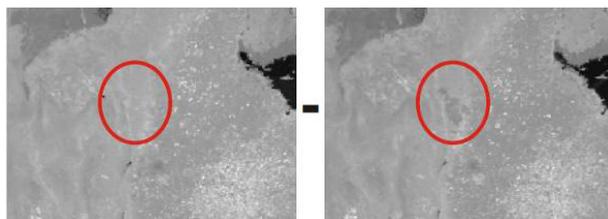
Figura 18. RGB (MIR, NIR, VIS)  
Fuente: Elaboración propia

### Detección y evaluación de áreas quemadas

Los efectos de los incendios sobre la cubierta vegetal son muy dependientes del nivel de severidad del fuego (De Santis et al. 2006). En este ítem se evalúa el área afectada a través del deterioro experimentado por la vegetación natural característica de la zona.

Las imágenes utilizadas del satélite NOAA-18 con mil metros de resolución espacial, corresponden al 24 de agosto de 2008 a las 17:52 UTC (situación previa a los incendios) y al 22 de septiembre de 2008 a las 17:51 UTC (situación posterior a los mismos). Para su elección se evaluó que la zona de estudio se encontrara en el cenit de la órbita satelital y con condiciones de poca o ninguna nubosidad. Posteriormente se calculó el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) para las imágenes seleccionadas.

Las figuras 19 a) y b) muestran las imágenes de NDVI para las dos fechas consideradas. Una simple inspección visual de estas dos imágenes permite observar la disminución del valor de NDVI en la zona afectada por el incendio.



a) Imagen previa 24/08/08 b) Imagen posterior, 22/09/08  
Figura 19: Imágenes de NDVI  
Fuente: Elaboración propia

La imagen diferencia de las dos anteriores (figura 20) permite apreciar el área donde la vegetación resultó afectada por el fuego y efectuar su cálculo. Éste arrojó una estimación de aproximadamente 70 mil hectáreas.



Figura 20. Imagen diferencia NDVI. Fuente: Elaboración propia

Para una mejor localización del área afectada se muestra en la figura 21, la imagen de la figura 20 con los límites de la provincia de Córdoba en rojo y de los departamentos en blanco.

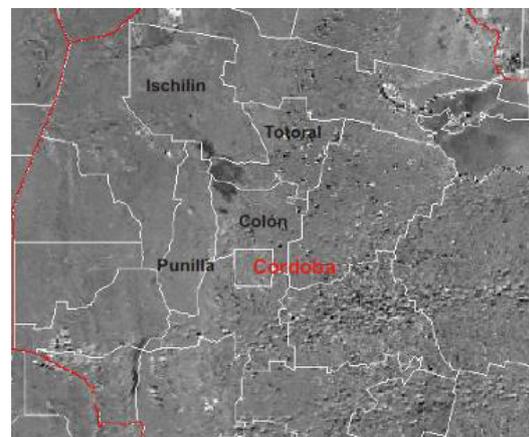


Figura 21. Ídem figura 20, con capa de límites de provincias y departamentos. Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2 Caso II: Septiembre 2011

En el caso de este incendio se estudia, en particular, la nube de humo. Más adelante se hace un análisis comparativo entre éstas nubes de humo y las nubes de sal. La ocurrencia de ambos tipos de nubes produce la presencia de partículas en la atmósfera que pueden tener un impacto negativo en distintas actividades socio-económicas y en la salud de las personas.

En la figura 22 a), MODIS (AQUA) del 4 de septiembre de 2011 a las 17:40 UTC, se puede ver una imagen donde se aprecian numerosos focos de calor en color rojo. En algunos de ellos, se puede observar

asociada, una pluma de humo alejándose hacia el norte, por la ocurrencia del viento de dirección sur que afecta la región. En las figuras 22 b), c) y d) se muestra la misma escena para dos bandas reflectivas (B1 y B3) y una banda térmica (B31), sobre las cuales están indicadas dos transectas sobre las que se analiza la nube de humo.

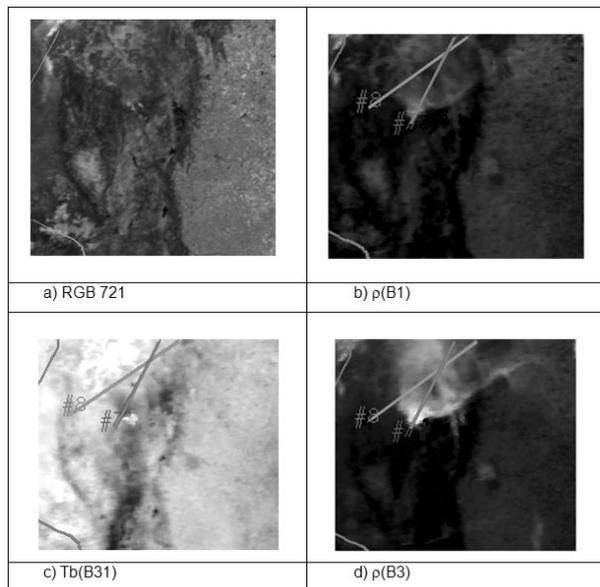


Figura 22. Incendio forestal en las Sierras de Córdoba. Imagen sensor MODIS (AQUA) del 04/09/11. Los segmentos (transectas) marcados en color verde (#8) y bordó (#7), identifican las líneas sobre las cuales se obtuvieron los perfiles de las distintas variables. Fuente: Elaboración propia

Sobre la transecta 7 se puede apreciar un marcado aumento de la reflectividad tanto en la banda 1 (0.645 μm) como en la banda 3 (0.469 μm) sobre lo que sería la el hongo de la nube de humo, En cambio en la temperatura se observa una disminución de la misma, que refleja la altura que alcanza la nube, que se forma por condensación del vapor de agua sobre las partículas liberadas por la combustión. La transecta 8, cruza la nube de humo sobre un sector en que ésta es menos densa, y sus oscilaciones acusan las oscilaciones en el espesor de la nube de humo, visibles claramente en la imagen respectiva. La reflectancia en la B3 es mayor que en la banda 1, esto también se observa sobre la transecta 7 fuera del área del hongo de humo. Hsu et al. (2004), señalan que si las nubes no son muy espesas, la contribución desde la superficie a la señal que llega al sensor puede ser importante debido la reflectividad del suelo, y como los suelos de zonas áridas y semiáridas aparecen menos brillantes en las longitudes de onda más cortas, esto explicaría la mayor reflectancia observada con la B3. Debido al poco espesor de la pluma de humo, en la temperatura se puede observar también el efecto de emisión en infrarrojo desde superficie (figuras 23 c y f). En el caso de la transecta 7 (color rojo), el pico de máxima reflectancia en la B1 correspondiente a la figura 23 a) y en la B3 a la figura 23 b), coincide con el hongo de humo emergente del foco de incendio, que se eleva en la atmósfera y tiene un espesor óptico mucho mayor que la pluma, impidiendo el paso de radiación infrarroja desde los niveles bajos y el tope también alcanza mayor altura y consiguientemente tiene menor temperatura, aunque esta pueda ser mayor que la del aire del entorno en ese mismo nivel.

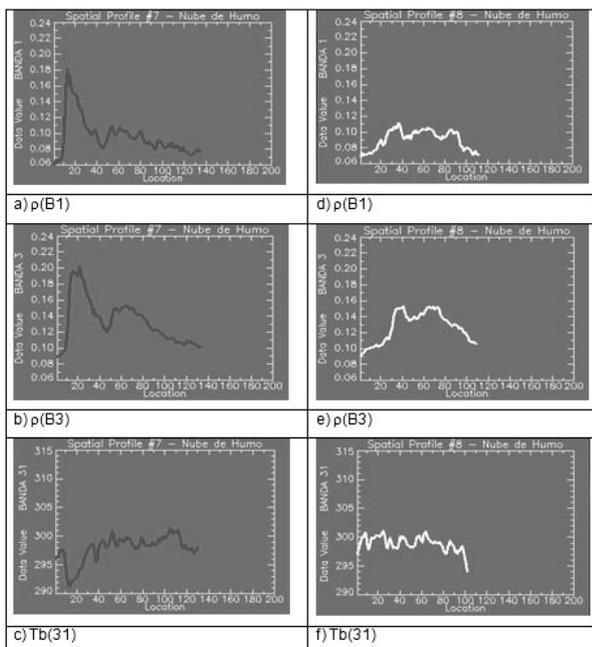


Figura 23. Perfiles sobre las transectas identificadas como 7 y 8 en la figura 22 b), c) y d). Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Tormentas de polvo

En la figura 24 se puede observar la tormenta de polvo que se desarrolló durante el 22 de noviembre de 2011 en el sur de la provincia de Buenos Aires. Este evento fue capturado por el sensor MODIS (TERRA) y la imagen es cortesía de Jeff Schmaltz de la NASA, LANCE/EOSDIS MODIS Rapid Response Team, GSFC, <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=76527>. Esta tormenta también fue observada y fotografiada por los astronautas desde la “International Space Station (ISS)”, <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=76638>.

Estas imágenes muestran una nube de polvo fino que fue levantado desde superficie por el viento sobre el este de la provincia de Río Negro y sudoeste de la provincia de Buenos Aires. La nube se desplaza hacia el océano Atlántico adquiriendo una rotación antihoraria y vuelve parcialmente sobre el territorio este de Buenos Aires debido a la presencia de un sistema de alta presión sobre el mar. En horas de la tarde la nube persiste y a las 18:30 UTC es capturada por el sensor MODIS (AQUA) (figura 25a). Esta imagen, con resoluciones de 500 y 1000 m, fue recibida en el Departamento Teledetección y Aplicaciones Ambientales del Servicio Meteorológico Nacional.



Figura 24. Imagen en color natural, 22/11/11, sensor MODIS (TERRA). Fuente: NASA. Año 2011

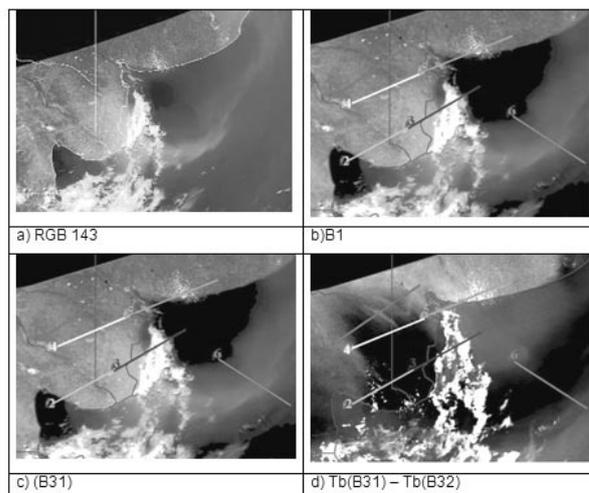


Figura 25. Imagen de la tormenta de polvo 22/11/11, 18:30 UTC., sensor MODIS (AQUA). Los segmentos (transectas) marcados en color identifican las líneas sobre las cuales se obtuvieron los perfiles de las distintas variables. Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 a) y b) se puede observar la nube de polvo, que se distingue más claramente sobre el océano, como un velo en azul claro en la figura 25 a), o grisáceo en 25 b) que se extiende por debajo de las nubes más altas y más brillantes que aparecen en color blanco. En la figura 25 c) el polvo es casi totalmente imperceptible, pero aparece muy bien resaltado en la imagen 25 d) por los valores negativos que toma la diferencia  $Tb(B31) - Tb(B32)$ . En este caso fueron analizadas las respuestas espectrales desde las distintas superficies sobre numerosas transectas. A modo de ejemplo se muestran acá solo dos, (figura 26), identificadas con los números 4 (amarillo) y 6 (rosa) en las figuras 25 b), c) y d). La transecta 4 (amarillo), es representativa de la nube de polvo sobre el continente y la 6 (rosa) sobre el océano. Más abajo se presenta un análisis de los gráficos de la figura 26.

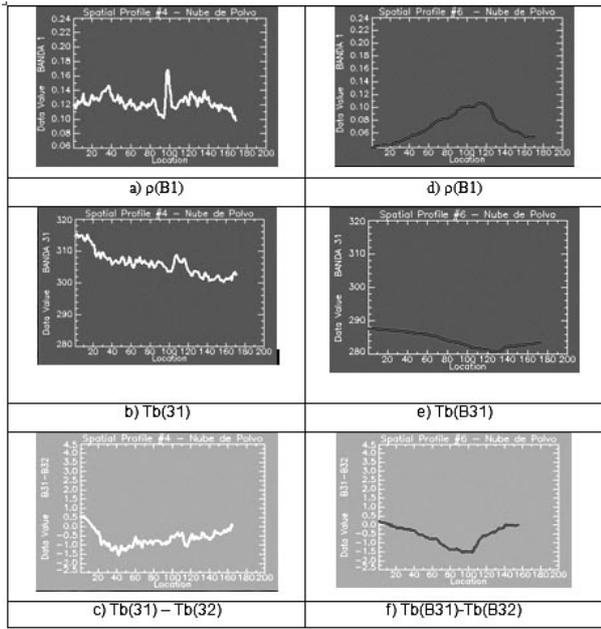


Figura 26. Perfiles sobre las transectas de las figuras 25 b), c) y d). Fuente: Elaboración propia

En la figura 26 a), se puede ver que la nube de polvo sobre terreno tiene una reflectancia media oscilante, que no se destaca del fondo, excepto un pequeño mínimo y máximo inmediatos en la posición 100, correspondiente el mínimo a la sombra de la pequeña nube que produce el máximo. En cambio, sobre el océano, figura 26 b), se nota claramente un aumento de la reflectancia de la nube de polvo contrastando con los bajos valores del fondo de agua, pero cuyos valores máximos no superan los observados sobre el continente, aún en el sector donde la nube aparenta mayor espesor óptico. Esta diferencia podría deberse en parte a que la nube de polvo sobre el océano ya es menos densa que cerca de su fuente de origen, pero también a que el fondo sobre el continente también aporta brillo, a la inversa que sobre el océano. En el caso del perfil de temperatura, figuras 26 c) y 26 d), se puede observar que los valores de temperatura radiante,  $T_b(31)$ , sobre el continente son sensiblemente mayores que sobre el océano. Esto es justificable ya que la nube de polvo es semitransparente y cierta energía desde el fondo emana desde la nube, siendo mucho mayor desde el terreno que está a mayor temperatura que la superficie del océano. En el caso de los perfiles de la diferencia de temperaturas,  $T_b(B31) - T_b(B32)$ , figuras 26 c) y 26 f), se puede observar que esta se hace negativa sobre la nube de polvo, coincidiendo con lo observado en la figura 25 d). Sin embargo, y por las mismas condiciones ya mencionadas, nube semitransparente sobre fondos distintos, producen que la diferencia,  $T_b(B31) - T_b(B32)$ , sea más negativa para polvo sobre el océano.

A las 18:00 UTC, las tres estaciones meteorológicas del SMN (figura 27) en las proximidades del evento reportaban la siguiente información:

San Antonio Oeste Aero: TEMP:  $30.4^\circ$  /HUMEDAD: 13% /VIENTO: WNW 20 kt /VISIB: 20 KM /TIEMPO PRES: Visibilidad reducida por humo, quemazón o ceniza volcánica.

Viedma: TEMP:  $31.6^\circ$  /HUMEDAD: 17% /VIENTO: NW 14 kt /VISIB: 800 MTS /TIEMPO PRES: Visibilidad reducida por humo, quemazón o ceniza volcánica.

Bahía Blanca: TEMP:  $29.2^\circ$  /HUMEDAD: 22% /VIENTO: NW 10 kt /VISIB: 15 KM. No informa tiempo presente.

Fuente: Datos facilitados por el Banco de Datos del SMN.

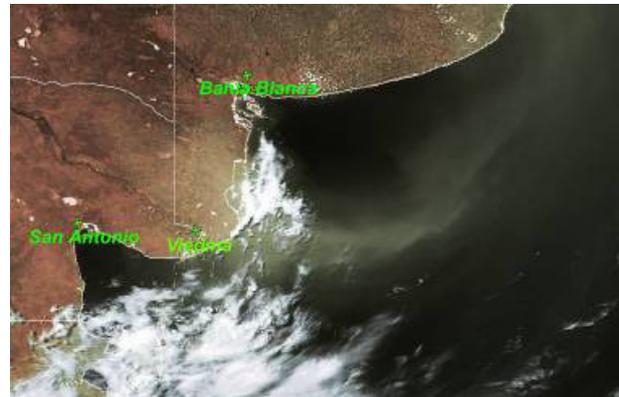


Figura 27. Imagen de la tormenta de polvo 22/11/11, 18:30 UTC., sensor MODIS (AQUA). Ubicación de estaciones meteorológicas Fuente: Elaboración propia

Estos reportes de tiempo presente son ambiguos, porque si bien informan correctamente una disminución de visibilidad, su origen puede ser diverso. A la hora de transmitir la información, por ejemplo, a las autoridades responsables de emitir avisos o alertas a la población, es importante conocer su origen, pues puede tener involucrados otros riesgos. Además, en cuanto a las estadísticas climáticas, se refiere, este fenómeno no estaría registrado.

Cuando cesa el viento que levanta el polvo desde superficie, el remanente adquiere las características de lo que se categoriza como una nube de polvo, cuya persistencia dependerá de la estabilidad vertical de la atmósfera y de la intensidad viento en el nivel de la nube.

#### 4.5 Tormentas de sal

La laguna de Mar Chiquita ubicada en el NE de la provincia de Córdoba es el lago más grande de Argentina y el quinto lago salado más grande del mundo. Según el Centro de Zoología Aplicada de la Universidad Nacional de Córdoba la superficie de la laguna ha oscilado a lo largo de los años, y en las tres últimas décadas esta variación ha sido documentada con imágenes de satélite. Estas oscilaciones de la superficie de agua se manifiestan muy fuertemente en la costa norte debido a que tiene pendientes muy suaves dejando expuestas importantes superficies cubiertas de sal. Cuando estas superficies son barridas por vientos fuertes como en este caso (superior a los 50 km/h), la sal es levantada del suelo en forma de plumas de sal que llegan a grandes distancias.

La imagen captada por el sensor MODIS (AQUA) el 4 de septiembre de 2011, a las 17:40 UTC (figura 28a), permite observar la presencia de extensas y densas nubes de sal sobre la laguna y zonas aledañas. Si bien el caso presentado aquí se da en condiciones climáticas excepcionales, las tormentas de sal, en las proximidades de esta laguna son un fenómeno recurrente.

Una simple inspección visual de esta imagen permite apreciar las nubes de sal que se formaron cuando el viento localmente fuerte barrió las superficies expuestas en las costas de la laguna, principalmente las localizadas en la costa norte. En la figura 28 b) y c) se muestran para la misma escena las imágenes correspondientes a la reflectancia en B1 y temperatura de brillo en la B31. Si bien se han analizado todos los perfiles que sobre varias transectas se muestran en la figura 28, sólo se incluyen aquí las que se consideran más representativas.

La transecta 1 (en rojo), está tomada sobre la superficie de agua de la laguna, la 4 (en amarillo) sobre la pluma de sal y a modo ilustrativo y para comparación la 5 (en celeste) sobre las salinas de Ambargasta.

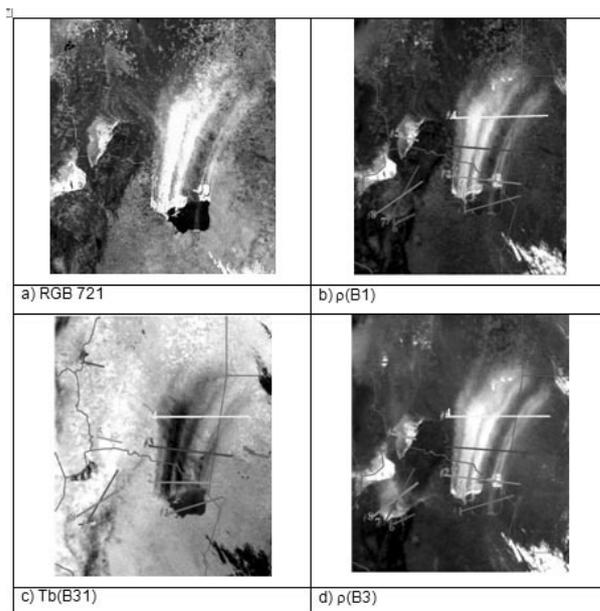


Figura 28. Nubes de sal 04/09/11

Fuente: Elaboración propia

La transecta 1 (en rojo) atraviesa la laguna de Mar Chiquita, aproximadamente de SW a NE, cruzando dos nubes de sal pequeñas que se originan en las costas del sur, lo que produce un aumento de la reflectancia en la banda 1 (0.645 μm). En cambio el perfil de temperatura radiante, Tb (31), no las acusa. El descenso de temperatura obedece a que la radiación IR emitida desde la superficie de agua es menor que desde los terrenos circundantes y es notable como define el corte transversal lo que sería la depresión que ocupa la laguna.

Resultados similares fueron encontrados por Velasco et al., (1997) trabajando con datos AVHRR-NOAA 14. La transecta 4 (en amarillo), sobre una nube de sal con fondo de terreno muestra un aumento marcado de la reflectividad, acompañado de un descenso de la temperatura radiante. Esto probablemente se deba al bloqueo de radiación IR saliente de la superficie por la nube, más espesa que la anterior, y que a su vez está emitiendo desde un nivel más alto y consecuentemente a una temperatura menor que la del suelo. Resultados similares fueron encontrados por Velasco et al. (2011). En contraste, en la transecta 5 (en celeste), que atraviesa las Salinas de Ambargasta en la Provincia de Santiago del Estero, se puede notar que si bien la reflectividad sobre su superficie aumenta a niveles semejantes al de la nube de sal, la temperatura no desciende cuando aumenta la reflectancia, más aún, aumenta en respuesta a una disminución de ésta, que puede deberse a un aumento de humedad en la superficie o presencia de agua (figura 29 a) y b)).

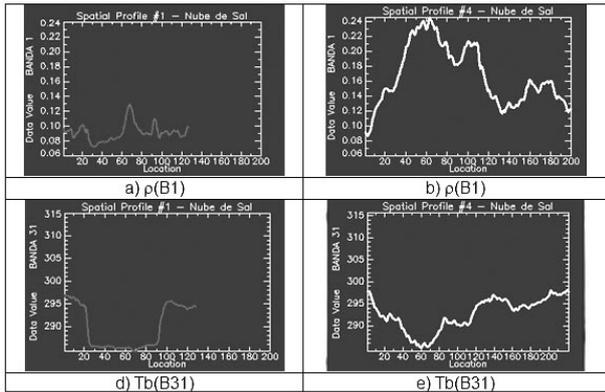


Figura 29. Perfiles de reflectancias y temperaturas sobre las transectas 1 y 4 (nubes de sal) mostradas en las figuras 28 b) y c). Fuente: Elaboración propia

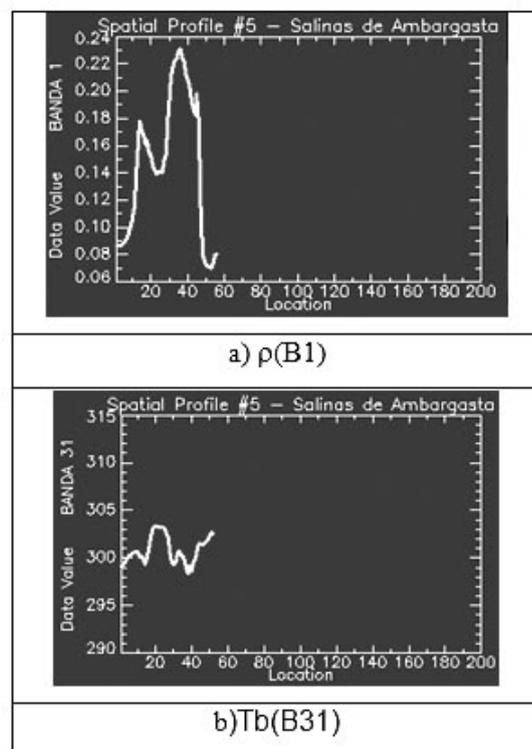


Figura 30. Ídem figura 29, ahora sobre la transecta 5 (salinas de Amargasta) mostradas en las figuras 28 b) y c). Fuente: Elaboración propia

A las 18:00 UTC de esta fecha, algunas estaciones meteorológicas (figura 31) localizadas en las cercanías de donde se observaban las nubes de humo y sal enviaron los siguientes reportes:

Ceres: TEMP: 22.2° / HUMEDAD: 41% / VIENTO: S 30 kt / VISIB: 3 KM / TIEMPO PRES: Polvo o arena levantados por el viento en la estación pero ausencia de torbellino.

Villa María del Río Seco: TEMP: 21.4° / HUMEDAD: 27% / VIENTO: SSE 13 kt / VISIB: 15 KM / TIEMPO PRES: Bruma.

Córdoba Observatorio.: TEMP: 19.8° / HUMEDAD: 35% / VIENTO: S 17 kt / VISIB: 6 KM / TIEMPO PRES: Polvo o arena levantados por el viento en la estación pero ausencia de torbellino.

Pilar Observatorio.: TEMP: 19.5° / HUMEDAD: 12% / VIENTO: S 15 kt / VISIB: 10 KM / TIEMPO PRES: Polvo o arena levantados por el viento en la estación pero ausencia de torbellino.

Villa Dolores: TEMP: 21.2° / HUMEDAD: 5% / VIENTO: S 11 kt / VISIB: 10 KM / TIEMPO PRES: Visibilidad reducida por humo, quemazón o ceniza volcánica.

Fuente: datos facilitados por el Banco de Datos del SMN.



Figura 31. 04/09/11 NOAA-18 (AVHRR). Ubicación de estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia

En este caso, como en el de la tormenta de polvo sobre la provincia de Buenos Aires, si bien estos datos permiten corroborar las condiciones meteorológicas que suelen acompañar a estas nubes, los datos de tiempo presente no son representativos del fenómeno observado, tal como se discute en el documento de la OACI (AMOFSG/8-SN No. 40 – 2010). Esta falta de información, aparte de no brindar la que es útil para la comunidad en tiempo real, dificulta la preparación de las estadísticas climatológicas y de mapas e riesgo. Los sensores remotos y las técnicas derivadas para identificar estos sistemas pueden llenar ese hueco brindando herramientas objetivas para la categorización de estos fenómenos meteorológicos.

#### 4.6 Nube de ceniza volcánica

El volcán Puyehue ubicado en el Cordón del Cauce en Chile, entró en erupción durante la tarde del 4 de junio de 2011. En la figura 32 se muestra una imagen en color natural capturada por el sensor MODIS(AQUA) el 6 de junio de 2011, en la que se puede observar la presencia de la pluma de ceniza que originada sobre Chile, alcanzó la costa Argentina y se extendió sobre el océano Atlántico.

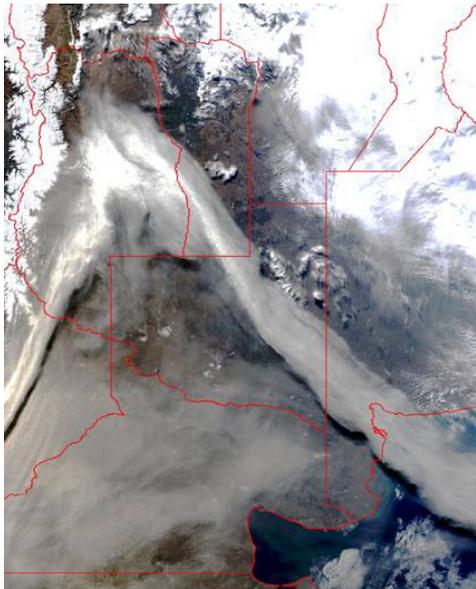


Figura 32. 06/06/11 AQUA (MODIS) RGB 143. Nube de ceniza volcánica. Fuente: Elaboración propia

En este trabajo se realizó la detección de la ceniza volcánica usando los datos de la imagen citada. La misma fue calibrada para obtener los valores de emitancia de las B31 (11.03  $\mu\text{m}$ ) y B32 (12.02  $\mu\text{m}$ ), a partir de los cuales se obtienen las temperaturas de brillo ( $T_b$ ) respectivas y la reflectancia ( $r$ ) de la B1 (0.645  $\mu\text{m}$ ).

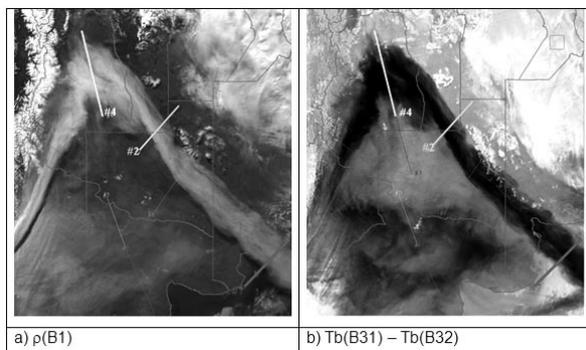


Figura 33. 06/06/11. AQUA (MODIS) Nube de ceniza volcánica: a) imagen reflectiva, b) imagen “split Window”.

En las figuras 33 a) y b), de la misma escena de la figura 32, se presenta la imagen reflectiva B1 (0.645  $\mu\text{m}$ ) y la imagen de diferencia de temperatura  $T(B31) - T(B32)$ , también a veces referida como “split Window”. En la imagen reflectiva correspondiente a la B1 (0.645  $\mu\text{m}$ ), la nube volcánica, aunque se destaca del fondo, no es tan brillante como la nieve o algunas nubes de agua y/o hielo. En cambio en la imagen 33 b), la presencia de ceniza aparece en general oscura, debido a los valores negativos de la diferencia de temperatura. Sin embargo, sobre Neuquén, esto no es tan notable, probablemente porque la nube puede contener cristales de hielo o puede haber alguna capa de nubes superpuesta.

Para tres de las transectas marcadas en la figura 33, la 2 (verde), la 4 (amarilla) y la 7 (roja), se muestran en la figura 34 las respuestas de las distintas variables. Si bien sobre todas las transectas se observan comportamientos generales similares, también hay variaciones que responden no sólo a la presencia de la nube de ceniza, con distinto espesor, sino también a la existencia de nubes de agua y/o hielo. Los máximos de reflectividad se corresponden con los mínimos de temperatura como es usual sobre las nubes. Sin embargo, los valores de “split window” que son negativos sobre la nube de ceniza, sobre las otras nubes son cercanos a cero, como se puede observar en el primer sector de la transecta 7. Este comportamiento permite la identificación y el monitoreo de las nubes de ceniza volcánica cuando se dispone de sensores que miden en dos bandas dentro de la ventana atmosférica ubicada entre los 10 y los 12  $\mu\text{m}$ .

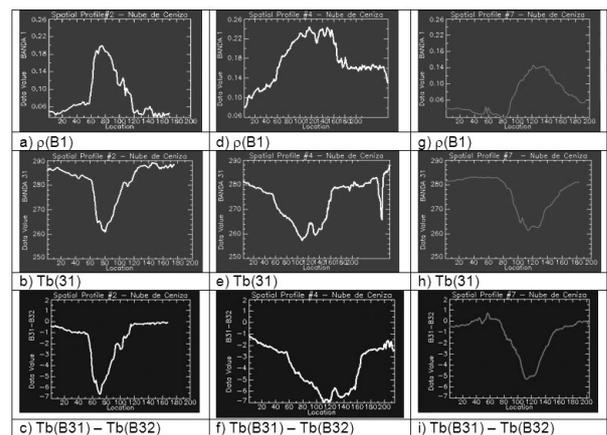


Figura 34. Perfiles sobre las transectas 2, (primer columna) 4 (segunda columna) y 7 (tercer columna), indicadas sobre las figuras 33 a) y b). Fuente: Elaboración propia

#### 4.7 Presentación y discusión de los resultados obtenidos en cada caso

En este trabajo se prueba como la teledetección por satélite puede contribuir en forma notable a la detección de diversos fenómenos naturales adversos, a su seguimiento y a la evaluación de las zonas afectadas, proveyendo datos de amplias áreas de difícil acceso y con una cierta periodicidad. Combinar esta información con el conjunto de datos provenientes de otras fuentes, por ejemplo en un sistema de información geográfica (SIG), proporciona una herramienta única para relacionar los fenómenos naturales adversos con otros aspectos socioeconómicos.

Los fenómenos adversos considerados en este trabajo tienen una fuerte componente de origen meteorológico, pero en algunos casos son el resultado de una combinación de factores meteorológicos con factores geológicos (actividad volcánica), hidrográficos (cuencas, lagunas), climáticos (sequías) y de acciones antrópicas (incendios iniciados voluntariamente o por negligencia, deforestación, manejo del recurso agua). Para cada uno de ellos se obtuvieron mediante la teledetección, productos finales que para ser incorporados en las distintas fases de una gestión requieren de trabajos en equipo de técnicos o profesionales responsables de cada una de las fases.

En el caso de una tormenta convectiva severa que afectó la región NE de Argentina, a través de la teledetección se pudo determinar la traza que dejó un tornado asociado a esta. La traza evidencia el daño producido en la cobertura vegetal, aparte de los que fueron registrados in situ en el área urbana de San Pedro. Por otra parte es muy importante la observación realizada por las inspecciones de campo en regiones rurales, áreas silvestres y otras zonas deshabitadas. Sin embargo, esta tarea puede ser complicada debido a que algunos lugares son prácticamente inaccesibles por medio de automóvil o a pie. Por otro lado, es común que el daño en regiones remotas pase desapercibido, de manera que los equipos de inspección no saben dónde y qué rastros deben buscar. Aquí es donde los datos provistos por distintos sensores remotos son de gran utilidad, en especial los de la serie GOES, NOAA, TERRA y AQUA debido a la disponibilidad de datos y ocurrencia de revisita.

Por otro lado, están los problemas relacionados con los seguros de vivienda y de producción rural. Las compañías aseguradoras utilizan los informes del Servicio Meteorológico Nacional, los cuales se basan en las inspecciones de campo, datos de precipitaciones, campo de vientos, etc. Sin embargo, para zonas remotas o inaccesibles, sólo se puede tener información a través de la tecnología aportada por

los sensores remotos, para poder evaluar los reclamos de seguro enviados por las víctimas de un tornado. Esta información también serviría de prueba para los pobladores de zonas aisladas que reclaman ante las compañías de seguro. Mediante el uso de un SIG, se puede integrar la información del terreno, junto con la evaluación visual del paisaje, datos de campo, datos meteorológicos y las imágenes satelitales anteriores al evento y posteriores al mismo con resoluciones espaciales convenientes. Ésta es una herramienta eficiente para poder cuantificar los daños en los lugares afectados por el evento. Así, los datos suministrados por estos sistemas, podrían ser utilizados por los organismos encargados de la planificación y gestión ambiental para desarrollar políticas sustentables y generar así, planes de apoyo y contingencia para los sectores más vulnerables.

Como se mostró en este trabajo y en otros, en el sector de los recursos hídricos, la teledetección juega un rol determinante y los sensores remotos permiten obtener información para realizar la evaluación y monitoreo de las cuencas hidrográficas, que es un tema de gran importancia por constituir la unidad básica para la gestión del recurso agua.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de las inundaciones en el río Paraná inferior y en el río Areco es posible concluir que a partir de la obtención de índices sintéticos con imágenes provenientes de diferentes plataformas satelitales se puede obtener a través de la clasificación de imágenes una serie de mapas para estimar la extensión de las áreas afectadas por la inundación y pueden ser utilizadas para establecer áreas vulnerables que pueden ser afectadas periódicamente por inundaciones.

Como en los casos anteriores, esta información se puede incorporar en un SIG, donde se incluyan entre otros, datos topográficos de la zona afectada, precipitaciones, balance hídrico, pendientes del terreno, etc. Estos datos, al estar ubicados con coordenadas geográficas facilitan al municipio u otras unidades gubernamentales tener un conocimiento del grado de afectación que tendrá un área determinada por desbordes. Esta información también puede ser de suma utilidad para los productores agropecuarios de la zona que suelen explotar los valles de inundación para algunos tipos de siembra o de engorde de animales, para que puedan tomar decisiones oportunas y correctas ante el riesgo de una crecida.

Los incendios suelen constituir una de las principales causas de la devastación de masas forestales, así como también de otros tipos de vegetación entre ellos pastizales y montes. Como ya es sabido, estos

desastres involucran sistemas sociales y económicos que afectan a los ecosistemas regionales de manera abrumadora. Las consecuencias son siempre negativas, ya que además de las pérdidas sociales y económicas, se produce la emisión de gases como el metano, dióxido y monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno que se manifiestan en alteraciones significativas en el clima y en la atmósfera en distintas escalas. En este trabajo se presentan algunas herramientas para la detección y seguimiento de incendios en áreas rurales, a través de la detección de focos de calor y de nubes de humo y, además, para la evaluación de las áreas afectadas. Esta información en tiempo real puede ser de utilidad para las autoridades responsables del control y manejo del fuego, y la evaluación de las áreas quemadas, según que estén o no protegidas por seguro, también constituyen un dato importante.

Desde este trabajo se recomienda a los organismos encargados de la gestión del recurso suelo (comenzando por los Municipios), o un conjunto de municipios asociados RAMA (Red Argentina de Municipios Autosustentables), propongan la adquisición de un sistema experto basado en la teledetección, para detectar y monitorear el riesgo semanal o mensual de ocurrencia de incendios forestales, que permita a los organismos que estén involucrados en la lucha contra el fuego utilizar esta herramienta al momento de la toma de decisiones críticas.

La correspondencia entre las áreas incendiadas y el riesgo de incendio asociado alienta a profundizar el estudio de esta herramienta para su puesta en funcionamiento de manera operativa dentro de un SIG. Este último permite relacionar dicha información a otras fuentes de datos (meteorológicos, tipos de vegetación, topografía, medios de comunicación, combustibilidad de la biomasa, etc.) que seguramente harán más confiable y precisa la información transmitida a los organismos encargados de la gestión ambiental y que están involucrados en la lucha y prevención de incendios.

La presencia de partículas en el aire, que puede llegar a reducir considerablemente la visibilidad en las diferentes vías de comunicación, terrestres y/o aéreas, puede tener su origen en una combinación de fenómenos de distinto origen como se muestra en este trabajo. Así se analizaron nubes de humo, de sal, de polvo y de cenizas volcánicas. Estos eventos, de acuerdo a su severidad pueden también introducir alteraciones en el clima si modifican el balance de radiación.

En el caso de las tormentas o nubes de sal, hay que considerar además, que éstas pueden tener consecuencias negativas sobre los cultivos, los suelos y la salud de la población, sobre todo en el área cercana a la laguna de Mar Chiquita, donde se dan con mayor frecuencia. Por lo tanto, es muy importante estudiar el impacto que las posibles consecuencias que sobre su nivel tienen las varias derivaciones de agua que se hacen sobre el río Dulce en Santiago del Estero, las que sustraen parte del caudal que ingresa a la laguna y que comprometen todo el ecosistema de la región, dejando grandes superficies de sal expuestas.

En este sentido, el problema de las tormentas de sal debe ser considerado en los estudios de impacto ambiental (EIA) que deberían realizar los organismos de control, para evaluar las extracciones de agua en el río Dulce y sus impactos ambientales a todo el ecosistema regional.

Para una mejor comprensión de la naturaleza, formación y posibles impactos de las nubes de sal se recomienda realizar trabajos de investigación que contemplen, además del uso de los datos provistos por satélites, la incorporación de datos in situ y el uso de modelos de transferencia radiativa. Además, se podría implementar la utilización de modelos numéricos que ayudarían a su mejor comprensión y pronóstico.

A raíz de un accidente de aviación ocurrido en 1982, por fallas en sus motores al encontrarse con una nube de ceniza volcánica procedente del Monte Galunggung en Indonesia, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) creó en el año 1987, en coordinación con la OMM (Organización Meteorológica Mundial) y otros países asociados, el sistema de Vigilancia de los volcanes en las aerovías internacionales. En Argentina funciona uno de esos centros, que cuando se produce una erupción emite un aviso a partir de observaciones efectuadas por satélite y desde tierra, informes de piloto y modelos de predicción meteorológica que permiten calcular la dirección de los vientos, la ceniza volcánica y en qué medida se dispersarán esas nubes con el transcurso del tiempo.

Las cenizas volcánicas analizadas en este trabajo se originaron en la erupción del volcán Puyehue ubicado en el Cordón del Caulle en Chile y son las que se observaban dos días después del inicio de la erupción. En este trabajo se probó que a través de una imagen de diferencia de temperatura  $T_b(B31) - T_b(B32)$ , se pueden identificar claramente estas nubes de las de agua o hielo. Entonces, a partir de este re-

sultado se recomienda incluir en forma operativa la obtención de esta imagen diferencia. Para poder utilizar este algoritmo en nuestro país, será necesario actualizar los sistemas de recepción correspondientes a los satélites de órbita polar y las constelaciones asociadas a éstos.

Cada uno de los productos obtenidos por teledetección en este trabajo son ejemplos de distintos fenómenos naturales adversos que pueden repetirse en el tiempo con algunas variantes. Los registros históricos de datos satelitales están a disposición de sus potenciales usuarios y a partir de ellos y con las técnicas descritas pueden generarse bases de información que permitan establecer cuales zonas del país son más vulnerables ante los fenómenos estudiados en este trabajo en virtud de su frecuencia y severidad. Cada uno de ellos por separado impacta de manera negativa en las diversas actividades económicas del país, como la agricultura y las explotaciones forestales, el transporte aéreo y terrestre y la salud de la población.

Sin embargo, los productos derivados por la teledetección no se limitan a los ejemplos presentados en este trabajo, ya que su aplicación permite un mejor conocimiento de numerosos problemas ambientales en distintas escalas espaciales y temporales. Esta herramienta ofrece ventajas indiscutibles frente a otros medios de observación como las observaciones de campo, aunque más que sustituirlos, los complementa.

Por lo tanto, es importante que los municipios como unidad básica de gestión local, así como también las provincias y la nación, tengan en cuenta en su planificación estratégica, implementar el uso de esta herramienta que constituye una alternativa eficiente, económica y rápida para la evaluación de potenciales riesgos, así como la cuantificación de los mismos.

---

## 5. Elaboración de recomendaciones y uso potencial de los resultados obtenidos.

En este trabajo se utilizaron imágenes captadas con sensores ubicados a bordo de distintos satélites en oportunidad de la ocurrencia de varios fenómenos naturales adversos. Los resultados obtenidos están relacionados con:

La detección y monitoreo de tormentas severas y evaluación de los daños que pueden provocar en superficie. El monitoreo de inundaciones.

La detección y monitoreo de focos de fuego.

La detección y evaluación de tormentas de polvo y sal. El estudio de las características de las nubes de polvo, de sal, de humo y de cenizas volcánicas.

En el primer caso, a través del uso del índice de vegetación NDVI, calculado con imágenes obtenidas con el sensor AVHRR/3 (NOAA-17), se mostró que es posible determinar la traza de los tornados en superficie, evaluando el daño que produjeron en la vegetación. En este caso en particular, el fenómeno se produjo en una zona caracterizada por una cobertura vegetal densa (selva tropical), lo que facilitó su detección a través de los cambios observados en el NDVI. Esta técnica también es aplicable cuando el fenómeno se registra sobre áreas con cultivos. Dada la escala espacial característica de los tornados, una mejor evaluación de los daños se obtendría usando imágenes con mayor resolución espacial. Sin embargo, no se puede dejar de considerar que la posibilidad de detectar y analizar este o cualquier otro fenómeno natural, depende de la oportunidad de la pasada de un satélite.

Para el monitoreo de inundaciones, en función de la oferta de imágenes, se recurrió al uso de aquellas que poseían mayor resolución espacial y espectral, obtenidas a través del sensor MODIS (TERRA). Con estos datos fue posible la obtención de tres índices sintéticos (NDVI, NDWI y NDSI) a partir de las bandas espectrales y posteriormente a través de una composición en falso color del índice NDXI.

En el caso de la inundación del río Paraná inferior, la aplicación en forma multitemporal del NDXI permitió obtener, primero, una apreciación visual de los cambios experimentados en el valle de inundación del río, y segundo generar datos que permiten evaluar las áreas inundadas. Por consiguiente, estos resultados aportan datos útiles, por ejemplo, para la realización de inventarios sobre las áreas que pueden ser afectadas periódicamente por inundaciones. En el caso del río Areco, de dimensiones mucho

menores, para la detección y monitoreo de la inundación, se utilizó la misma técnica que para el río Paraná, pero se mejoró la resolución de la imagen de NDXI a través del proceso de fusión con una banda de mayor resolución, lo que permitió una mejor delimitación del área afectada.

El análisis multitemporal de los diversos índices sobre una transecta que cruza el río, permite analizar la evolución del cauce y su entorno. Todo este tipo de información contribuye a mejorar el conocimiento del régimen de estos ríos y evaluar los beneficios y riesgos involucrados en las potenciales explotaciones ya sean para turismo, como agrícolas o de transporte.

La detección de focos de fuego fue posible mediante el uso de los datos de las bandas reflectivas de las imágenes obtenidas con el sensor AVHRR/3 (NOAA-18). Los focos de fuego tienen una alta reflectancia en la banda del MIR, pero baja reflectancia en el VIR y NIR. Esta segunda característica permite separarlos de otros objetos que pueden ser altamente reflectivos en las tres bandas. Además, a través de una composición falso color de estas bandas se puede distinguir claramente el foco de calor y la nube de humo asociada.

Por otra parte, a través del análisis de ésta se podría estimar la dirección e intensidad del viento reinante y consecuentemente la dirección en la cual se podrían propagar las llamas o ser transportadas las brasas, favoreciendo la expansión del incendio.

Con los mismos datos, es posible obtener la imagen de NDVI, para una fecha anterior y una fecha posterior al incendio. Con la última se puede apreciar y estimar el área afectada por el fuego, notando el descenso del valor del NDVI, y al igual que para el caso del tornado ésta se puede estimar a través de la diferencia de las imágenes de NDVI entre la fecha previa y posterior al evento.

El espesor de las nubes de humo, depende en parte del material disponible para la combustión, que forma originalmente una nube en forma de hongo, que se extiende en la vertical dependiendo de la estabilidad vertical de la atmósfera y del viento reinante. Si la intensidad de éste, es de regular a fuerte se desprende del hongo una nube con forma de pluma. El análisis de un caso de este tipo se realizó usando dos bandas reflectivas y una térmica, del sensor MODIS. Este permitió ver que las propiedades ópticas de las

nubes de humo se diferencian claramente de las nubes formadas por gotitas de agua o cristales de hielo.

Como ejemplo de tormenta de polvo se analizó un caso que fue capturado con el sensor MODIS (TERRA) en horas de la mañana y por el MODIS (AQUA) durante la tarde. Como esta nube cubría parte del territorio patagónico y también se extendía sobre el océano, se analizó su comportamiento espectral en las dos regiones. En ambos casos, por ser estas nubes de poco espesor, el fondo (suelo o agua) se manifestaba modificando las respuestas propias de las nubes de polvo, que a su vez se diferencian de las nubes de agua y/o hielo. Conocer las propiedades espectrales de los distintos tipos de nubes es de gran importancia, cuando los datos que interesan son los de superficie y hay que estar seguros que los cambios en ella no responden a presencia de nubes.

Las nubes o tormentas de sal tienen respuestas espectrales, que como se muestra en el caso analizado en este trabajo, las permite diferenciar de otras nubes de agua o hielo, aunque todas en general, si tienen cierto espesor, van a ser brillantes en las bandas reflectivas de cualquier sensor. A su vez, haciendo un análisis comparativo con las nubes de polvo y humo, también se nota una diferencia en las respuestas espectrales. Así, a través de la espectrometría es posible detectar la presencia y el origen de las partículas que pueden estar presentes en la atmósfera y que afectan de distinta manera la obtención de productos con imágenes. Un caso concreto sería el NDVI, además, de otras aplicaciones en el área de la salud pública y el transporte.

Las cenizas volcánicas analizadas en este trabajo se originaron en la erupción del volcán Puyehue ubicado en el Cordón del Caulle en Chile y corresponden a las observadas dos días después del inicio de la erupción.

En forma semejante a los análisis efectuados en las nubes de polvo, humo o sal, se consideraron las respuestas de las bandas reflectivas y térmicas, a lo largo de varias transectas en distintos sectores de la nube. Los máximos de reflectancia se corresponden con los mínimos de temperatura como es usual sobre las nubes de agua o hielo. Pero para este caso también se obtuvo una imagen de diferencia de temperatura  $T_b(B31) - T_b(B32)$  y es en esta imagen que se evidencia la diferencia del comportamiento de las nubes de origen volcánico de las otras. Esta diferencia es negativa para las nubes volcánicas y positivas cercanas a cero para las otras nubes. Este comportamiento diferente es el que justamente permite la identificación y monitoreo de las nubes de

ceniza volcánica cuando se dispone de sensores que miden en dos bandas dentro de la ventana atmosférica ubicada entre los 10 y los 12  $\mu\text{m}$ .

Los resultados presentados son algunos ejemplos del potencial que tiene la información generada a partir de los datos provistos por sensores remotos, en particular los sensores AVHRR (NOAA) y MODIS (AQUA y/o TERRA), para detectar, analizar los fenómenos descritos en cada caso y delimitar el área afectada. La obtención de esta información requiere de personal profesional o técnico especializado en teledetección.

---

## 6. Conclusiones

La información aportada por la teledetección no sólo es útil para evaluar el impacto de los distintos fenómenos naturales adversos sobre el sistema biogeofísico, sino que también constituye un aporte importante para la toma de decisiones y para la definición de medidas adecuadas a los diversos objetivos de la gestión ambiental.

En la actualidad la teledetección tiene un gran potencial, a partir de la extensa oferta de imágenes captadas por los numerosos satélites que orbitan el planeta y los que se lanzarán en los próximos años.

El acelerado crecimiento de las aplicaciones de los sensores remotos en el sector ambiental se debe en gran parte a la disponibilidad y accesibilidad de la información, así como a las herramientas de hardware y software para el tratamiento y elaboración de los datos. La diversidad de opciones en la elección de imágenes y de aplicaciones, obliga al investigador, técnico o gestor ambiental dedicado a la administración de los diferentes recursos, a realizar un análisis exhaustivo de la oferta existente y de sus costos, labor que requiere de un conocimiento básico de los datos disponibles y de su utilidad.

En este trabajo se prueba, como dentro de una gama de imágenes satelitales actualmente disponibles sin costo, es posible, a través de un procesamiento adecuado, obtener información útil para la toma de decisiones en la gestión de diversas disciplinas como la meteorología, la hidrología, el agro, entre otras, así como también, en tareas logísticas que involucran operaciones aéreas, transporte terrestre y la sanidad de la población.

---

## 7. Bibliografía

- Abuduwaili, J. D. Liu and G. Y. Wu. 2010. Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions. *J. of Arid Land*, 2, 2, 144–150.
- Allen, W. A. and Richardson A. J., 1968: Interaction of light with a plant canopy: *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1023-1028.
- Altinger de Schwarzkopf, M. L., and L. C. Rosso. 1982. Severe storms and tornadoes in Argentina. Preprints, 12th Conf. Severe Local Storms (San Antonio, Texas, USA), Amer. Meteor. Soc., 59-62.
- Ahern, F. J., J. G. Goldammer y C. O. Justice (Eds.), 2001. Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a coordinated international effort, The Hague, The Netherlands, SPB Academic Publishing.
- Ahrens C. D. 2003. *Meteorology Today: An introduction to weather, climate and environment*. 551 pgs., Fifth Edition. West Pub. Co., EEUU,
- Bakst L. y T. Yamazaky. 2001. Principios físicos y técnicos de la Meteorología por Satélite, Volumen 1: relaciones espaciales, Traducción Inés Velasco. 2001, 203 págs., Editora y Gráfica Universitaria UFPEL, Brasil.
- Campbell, J. B. 1987. *Remote Sensing Applications in the Hydrospheric Sciences. Introduction to Remote Sensing*. 551 págs. Virginia Polytechnic Instit., Gildford Press, EEUU.
- Celemin, A. H., 1984: *Meteorología práctica*. Edición del autor. Mar del Plata, Argentina. 313 pgs.
- Colwell, J. E., 1974: *Vegetation canopy reflectance*. *Remote Sens. Environ.*, 3, 174-183.
- Chuvieco Salinero E. 1996: *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ra. Edición revisada, 568 pgs., Ediciones Rialp, Madrid.
- Chuvieco Salinero E. 2002. *Teledetección Ambiental, La observación de la Tierra desde el Espacio*, 586 págs. Editorial Ariel, S.A., Barcelona, España.
- Chuvieco, E., D. Riaño, F. M. Danson, y P. Martin, 2006: Use of a radiative transfer model to simulate the post fire spectral response to burn severity, REF. REVISTA/LIBRO: *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, G04S09, doi: 10.1029/2005JG000143.
- De Santis, A., P. Vaughan y Chuvieco, E. 2006. Foliage moisture content estimation from one-dimensional and two dimensional spectral radiometry for fire danger assessment, *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, G04S03, doi: 10.1029/2005JG000149.
- 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.
- Ellrod G. 2012. Remote Sensing of Volcanic Ash. NWA Remote Sensing Committee. (Originally posted September 2005, Updated January 2012). <http://www.nwas.org/committees/rs/volcano/ash.htm>. Consulta: 29 de julio de 2012.
- Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58: 257-266.
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., 1965. Spectral properties of plants: *Applied Optics*, 4, 11-20.
- Gu, Y., J. F. Brown, J. P. Verdin, and B. Wardlow, 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06407, doi:10.1029/2006GL029127.
- Gulizia, C. e I. Velasco. 2009. Detección de cambios en superficie producidos por inundación. Anales en CD del XIII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología (CLIMET XIII) - X Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET X).
- Hsu N. C., Tsay Si-Chee, M. D. King, and. Herman J. R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 3, 557 -569.
- Kuittinen, R. 1992. *Remote Sensing for Hydrology. Progress and prospects*. 62 pgs., WMO, Operational Hydrology Report Nro. 36.
- Li, J.; Sheng, Y. 2008. American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract #H41B-0876
- Lichtenstein, E. R. and Schwarzkopf, M. L. 1966. SQUALL-LINES IN ARGENTINA. *Weather*, 21: 181–186.

- Lillesand T. M. and R. W. Kiefer, 1994 *Remote Sensing and Image Interpretation.*, 3rd. Edition, 750 pgs., John Wiley & Sons Inc., NY.
- Lindell M. K. and Prater C. S. 2003. *Assessing Community Impacts of Natural Disasters.* Natural Hazards Review © ASCE / November, 176-185.
- Lu D., P. Mausel, E. Brondizio and E. Moran: Change detection techniques. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, 2365-2407, 2004.
- Mattio C. A. 2010. Application of the meteorological second generation satellite to monitoring events of volcanic ash and dust storms in the republic of Argentina. [http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEU-METSAT/Publications/ConferenceandWorkshopProceedings/2010/groups/cps/documents/document/pdf\\_conf\\_p57\\_s4\\_o8\\_mattio\\_p.pdf](http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEU-METSAT/Publications/ConferenceandWorkshopProceedings/2010/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p57_s4_o8_mattio_p.pdf) . Consulta: 29 de julio de 2012.
- McFeeters, S. K., 1996: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, (7), 1425 – 1432.
- Micklin P. 2008. Using satellite remote sensing to study and monitor the Aral Sea and adjacent zone. *Environmental Problems of Central Asia and their Economical, Social and Security Impacts.* NATO Science for Peace and Security, Series-C: Environmental Security, 30-57.
- Molina, D.M. 1997. Origins of Arson in Northwestern Spain. *Fire Management Notes*, 57(3):18-23, USDA, Washington, USA. [www.fs.fed.us/fire/fmt/fmt\\_pdfs/fmn57-3.pdf](http://www.fs.fed.us/fire/fmt/fmt_pdfs/fmn57-3.pdf) . Consulta: 29 de julio de 2012.
- Opazo, S. y Chuvieco, E. 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. *Revista de Teledetección*. N°27. Pag. 27-42.
- Osores, Soledad; Estela Collini; Paola Salio; Arnau Folch; José G. Viramonte; Gloria Pujol; Diana Rodríguez. 2012. Evaluación del modelo fall3d-6.2 para tres casos de estudio: volcanes Hudson, Chaitén y Cordón del Caulle. *Congremet XI.* Mendoza, Argentina.
- Pacifici F., F. Del Frate, C. Solimini, W. J. Emery, "An Innovative Neural-Net Method to Detect Temporal Changes in High-Resolution Optical Satellite Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 9, pp. 2940-2952, 2007.
- Prata, A. J. 1989. Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 16(11), 1293–1296.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. y Harlan, J. C. 1974: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Type III Final Report. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD. USA.
- Sabins F. L., 1997: *Remote Sensing. Principles and interpretation.* 499 págs, W. H. Freeman and Co., NY, 3rd. Edition.
- Salomonson, V. V. 1983. "Water Resources Assessment", Chapter 29, in *Manual of Remote Sensing.* Vol. I and II. American Society of Photogrammetry, VA, EEUU.
- Sione, W. F., 2006. "La teleobservación como herramienta para la generación de mapas de riesgo de incendio y monitoreo de zonas incendiadas". Tesis Doctoral en Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Lujan.
- Sivakumar, M.V. K. 2005. Chapter 10. Impacts of sand storms/dust storm in agriculture, in *Natural disasters and extreme events on agriculture: impacts and mitigation* by Raymond P. Motha, Haripada P Das, Springer Ed.
- Smith K. 2001. *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster.* Third Edition. Routledge, NY. 391 pgs.
- Song Y., Z. Quan Z., L. Liu, P. Yang, T. Cao. 2005. The influence of different underlying surface on sand-dust storm in northern China. *J. of Geographical Sc.*, 15, 4, 431-438.
- Supannika, P., Reichiro, I. and Rikie, S. 2009: The potential of Normalized Difference Soil Index (NDSI) for soil water content estimation in Mongolia. TS 16-5, *Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing (ACRS).*
- Takeuchi, W. and Yasuoka, Y., 2004: Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data. [http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/PADDY/pdf/acrs2004\\_2\\_presen.pdf](http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/PADDY/pdf/acrs2004_2_presen.pdf) consulta: 9 de agosto de 2012.

Velasco, I. and J.M. Fritsch. 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *J. Geophys. Res.*, 92, D8, 9591-9613.

Velasco I., D. Goniadzki y G. Almeida. 1998. An analysis of the great flood of lower Paraná River during the 1997 summer". Proceedings of the Eighteenth Annual Hydrology Days, 289-300. Fort Collins, CO, EEUU.

Velasco I, Silvana Carina Bolzi, Diana Rodriguez, Adriana Burés, Mónica Marino. 2011. Detección, monitoreo y efectos producidos por partículas en la atmósfera durante 2009 sobre Argentina con datos de sensores remotos. XI Congreso Argentino de tecnología espacial. San Luis, Argentina.

Velasco I, Goniadzki D, Almeida G. 1997. Monitoreo de ambientes lacustres con imágenes NOAA-AVHRR sobre territorio argentino. Anales de la 7a Conferencia Internacional sobre Conservación y Gestión de Lagos. 1-4. San Martín de los Andes, Argentina.

Vila, D. 2005. "Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre Sudamérica: ciclos de vida y circulación en gran escala asociada". Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires.

Wenfang Lin, Quanfang Wang ; Shuping Zha ; Jiayong Li. 2010. Construction and application of characteristic bands of typical land cover based on spectrum-photometric method, 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing.

Wicander R., Monroe J.S, 2000: Fundamentos de geología; traducción Enrique Palos, Reed Wicander, James S. Monroe. Pags. 502. DOI: 970-686-024-X

---

**Fuente de las imágenes utilizadas en el diseño de la caratula:** NASA-NOAA, Fullbook.com.ar, La voz /archivo, Diego Tesio, 5tosAnaDolfo.blogspot.com, Palm Beach County y Varadero te informa.

**Diseño de carátula:** Lic. Silvana Carina Bolzi.

Secretaría de Investigación y Posgrado  
Sede Campus UBP  
Tel.: 0351 - 414 4444 int. 511  
Email: [sinpos@ubp.edu.ar](mailto:sinpos@ubp.edu.ar)



**Sede Centro UBP**

Lima 363 - Córdoba  
Tel: 0351 - 414 4555  
Fax 0351 - 414 4400  
E:mail: [informes@ubp.edu.ar](mailto:informes@ubp.edu.ar)



**Sede Campus UBP**

Av. Donato Álvarez 380 - 5147  
Argüello, Córdoba  
Tel: 0351 - 414 4444 - Fax 0351 - 414 4400  
E:mail: [informes@ubp.edu.ar](mailto:informes@ubp.edu.ar)