

# USO INTEGRADO DE INFORMACIÓN SATELITAL Y CONVENCIONAL PARA EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO – CUENCA DEL RÍO IBICUI

**Dora Goniadzki, Juan Borús, Marcelo Uriburu Quirno,  
Gabriel Barría, Daniel Vila**

Instituto Nacional del Agua. Sistemas de Información y  
Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata  
Autopista Ezeiza-Cañuelas. Tramo J. Newbery. Km 1,62. 1804  
Ezeiza. Provincia de Buenos Aires  
Teléfono: (54 11) 4480 4500 - Fax: (54 11) 4480 9174  
Correo Electrónico: [alerta@ina.gov.ar](mailto:alerta@ina.gov.ar)

## RESUMEN

Se propone el uso integrado de mediciones in-situ y satelitales para aproximar el estado de humedad superficial del suelo y el excedente, para monitoreo hidrometeorológico. Con la experiencia lograda en la técnica de procesamiento satelital *Change Detection* aplicada en el proceso de post-clasificación en cuencas de llanura, se pretende una mayor comprensión de la respuesta hidrológica de una cuenca ante sucesivos eventos cortos de lluvia.

La cuenca elegida es la del río Ibicuí, en margen izquierda del río Uruguay. Su aporte relativo en eventos de lluvia sostenida resulta significativo en el aporte total al embalse de Salto Grande. Se dispone de los caudales descargados al río Uruguay y de estimaciones de lluvia de la región de estudio.

Se enfrentan evoluciones de precipitación y caudal asociadas a mapas temáticos hídricos satelitales, observándose decrementos, incrementos y estadíos permanentes de las clasificaciones del agua superficial, falta de piso y ausencia de agua de las imágenes ópticas de Landsat-TM5 y SAC-C MMRS. Se seleccionan escenas representativas de distintas condiciones hidrológicas. Se determinan las modificaciones en las clasificaciones espectrales durante algunos eventos, tanto en la existencia de agua superficial como en la condición de los afluentes al curso principal. Para una mejor comprensión de la dinámica hídrica se utilizó el DEM (modelo digital del terreno) de la misión Shuttle Radar Topography Mission.

La disponibilidad de imágenes ópticas en tiempo real y su integración con información de campo permite aproximar la condición hidrológica general de la cuenca, evaluar la información de entrada a modelos hidrológicos e interpretar sus resultados para cuantificar caudales descargados al Uruguay. La inmediatez de interpretación es una de sus principales ventajas. La resolución espacial permite evaluar la zona de estudio a diferentes escalas. Pese a la baja resolución temporal de los sensores usados y la indisponibilidad de las imágenes en escenas nubosas, la metodología resulta una eficaz herramienta.

Se extiende así el uso que de la información satelital hace el Instituto (diagnóstico de saturación de suelos e inundación en emergencias), al seguimiento de las condiciones hidrológicas en escenarios cambiantes para la estimación de futuros excedentes, ajustando previsiones hidrológicas tanto como parámetros de modelos.

## **INTRODUCCIÓN**

El Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) es el organismo responsable del desarrollo y la operación del Sistema de Información y Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata (SIAH) en la Argentina. Dicho Sistema brinda un servicio permanente de información, diagnosticando la evolución de la situación hidrológica en la cuenca y efectuando los desarrollos metodológicos para dar pronósticos operativos y avisos tempranos de situaciones de riesgo hídrico.

Es responsabilidad del INA transmitir información sobre la situación de los ríos de la cuenca y alertar, con la mayor antelación posible, sobre la ocurrencia de situaciones de riesgo (inundaciones o bajantes pronunciadas) a los organismos nacionales y provinciales con competencia en el control de las emergencias hídricas y en la defensa de la población y del ambiente.

A partir del año 1998 el SIAH comenzó a utilizar información satelital para evaluar inundaciones sobre los grandes ríos de la Cuenca del Plata, con el fin de aportar mayor conocimiento de la extensión del área inundada y de la interacción entre los cursos principales y sus afluentes. A partir del año 2001 se ha monitoreado las áreas anegadas en la región Pampeana Central y cuencas de los ríos Salado Bonaerense y Santafesino, afectadas recurrentemente por excesos y déficits hídricos de gran impacto en la economía regional y nacional, generándose así información muy valiosa para la comprensión y el análisis de las condiciones hídricas regionales. Con este fin, se comenzó a procesar información proveniente de diferentes sensores satelitales, generándose productos temáticos para su aplicación en distintos usos hidrológicos. Esta experiencia permitió enfrentar situaciones de emergencia en tiempo real en cuencas sin información hidrológica de campo disponible y abordar estudios innovadores en el ámbito de la Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico.

El uso de imágenes satelitales provenientes de diferentes sensores remotos de origen satelital (tanto ópticos como de radar) integrado a información hidrometeorológica para su aplicación a sistemas de alerta hidrológico temprano provee herramientas científicas de avanzada. Su desarrollo servirá de apoyo para la prevención, gestión y mitigación de situaciones hídricas extremas así como también para la planificación de obras hidráulicas.

En este trabajo se propone el uso integrado de mediciones de campo y datos de origen satelital para evaluar el estado de humedad del suelo y su relación con el escurrimiento superficial, con fines de monitoreo hidrometeorológico.

## **ÁREA DE ESTUDIO**

La cuenca elegida es la del río Ibicuí, en margen izquierda del río Uruguay. Su aporte relativo en eventos de lluvia sostenida resulta significativo en el aporte total al embalse de Salto Grande.



**Fig.1: Ubicación geográfica del área de estudio**

## DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO URUGUAY

La cuenca del río Uruguay está comprendida entre los paralelos  $26^{\circ} 12'$  y  $33^{\circ} 55'$  Sur y los meridianos  $49^{\circ} 16'$  y  $58^{\circ} 32'$  Oeste, con una extensión aproximada de  $440.000 \text{ km}^2$ . El río nace en territorio brasileño, en la Serra do Mar, a los  $28^{\circ}09'$  Sur y  $40^{\circ}00'$  Oeste, al confluir los ríos Canoas y Pelotas, a una altitud de  $2.050 \text{ m snm}$ . Desde allí, y luego de un extenso y sinuoso recorrido de más de  $1.700 \text{ km}$ , alcanza su desembocadura convencional, a la altura de Punta Gorda (Departamento de Colonia, Uruguay), en el paralelo  $33^{\circ} 54'$  Sur, dando origen, junto con el río Paraná, al Río de la Plata.

El río es un curso de agua internacional cuya cuenca hidrográfica forma parte de los territorios de Argentina, Brasil y Uruguay. El 32% de su longitud está situado plenamente en territorio brasileño, un 38% define el límite entre Argentina y Brasil y el 30% restante separa a la Argentina del Uruguay. Constituye el límite oriental del territorio argentino en la zona mesopotámica, separándolo del brasileño en primer lugar y luego, siguiendo el curso de las aguas, del uruguayo.

La cuenca se halla ubicada entre las isohietas de los  $2.400 \text{ mm}$  (nacientes) y  $1.200 \text{ mm}$  (en la desembocadura) aproximadamente. El régimen de aporte a la cuenca es netamente pluvial. El caudal módulo anual, en la desembocadura, es de unos  $6.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , si se considera el registro de los últimos 30 años. El derrame anual, por tanto, es de unos  $200.000 \text{ hm}^3$ .

El río Uruguay cuenta con 39 ríos afluentes significativos. De ellos, 26 corren en territorio brasileño, cuatro en territorio argentino, siete en uruguayo y dos son límites internacionales. Sólo 23 son afluentes directos. El más importante de ellos, por su volumen de aporte, es el río Ibicuí. Desde la margen izquierda, desemboca a la altura de la localidad correntina de Yapeyú. Su cuenca se desarrolla completamente en territorio brasileño y alcanza los  $46.500 \text{ km}^2$ , erogando un caudal medio anual aproximado de unos  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Otros afluentes a mencionar son los ríos: do Peixe, Chapecó, Passo Fundo, Pepirí Guazú, Ijuí, Piratiním, Aguapeí, Miriñay, Mocoretá, Cuareim, Arapey, Daymán, Negro, Gualeguaychú y San Salvador.

En general, la cuenca del río Uruguay tiene una hidrografía bien distribuida, con un aporte parejo a lo largo del curso y tramos muy cortos en los que el aporte en ruta sea relativamente reducido. De los 1.700km del curso, unos 1.000km son navegables, aunque para calados reducidos. Las embarcaciones mayores sólo acceden al Bajo Uruguay. Hasta Fray Bentos pueden operar cómodamente embarcaciones de hasta 21 pies, aunque se realizan trabajos de dragado para aumentar hasta 26 pies dicha profundidad.

La velocidad de las aguas alcanza en el tramo superior unos 3,60m/s, mientras que en el tramo medio - inferior se reduce a sólo 0,60m/s, valor propio de ríos de llanura, favoreciendo la formación de islas. En el curso del río, entre la desembocadura del río Cuareim y Punta Gorda, se encuentran unas 140 islas, 60 de las cuales se hallan en el tramo Fray Bentos - Paysandú.

La siguiente tabla muestra una comparación, para distintas estaciones en los principales ríos de la Cuenca del Plata, de valores de caudal específico (caudal medio erogado por unidad de área de cuenca). En ella es posible observar algunos aspectos interesantes. Por la disposición relativa de las cuencas con respecto a las isohietas, los caudales específicos tienden a disminuir hacia agua abajo. Además, se verifica que los valores correspondientes a la cuenca del río Iguazú (en Andresito) y a la alta del Uruguay (definida en El Soberbio) son del mismo orden, lo cual es esperable dada su vecindad, su disposición geográfica, topografía y vegetación similares, así como un régimen de lluvias comparable.

**Tabla 1: Caudales Específicos comparativos**

Río	Estación	Área Cuenca (km <sup>2</sup> )	Caudal Específico (l/s/km <sup>2</sup> )
Iguazú	Andresito	68.000	25,4
Paraná	Posadas	933.360	12,6
Paraguay	Pto. Bermejo	1.080.000	3,8
Paraná	Corrientes	1.950.000	8,7
Paraná	Paraná	2.395.000	7,3
Uruguay	El Soberbio	80.000	26,3
Uruguay	Santo Tomé	130.000	20,0
Ibicuí	P. Mariano Pinto	46.500	13,5
Uruguay	P. de los Libres	189.000	22,3
Uruguay	Concordia	239.000	21,5

En la cuenca del río Uruguay han sido emplazadas cuatro centrales hidroeléctricas: Machadinho (Río Pelotas, 1.140 MW), Itá (Río Uruguay, 1.450 MW), Passo Fundo (Río Passo Fundo, 450 MW) y Salto Grande (Río Uruguay, 1.890 MW). En el plan de expansión decenal de su parque eléctrico, Brasil considera la ejecución de algunos proyectos, la mayoría en la alta cuenca (estados de Río Grande do Sul y Santa Catarina). Hay construidas algunas obras de nivelación menores en afluentes, que permiten la derivación de caudales de riego muy acotados cuyo efecto, especialmente en momentos de aguas altas, no tiene ninguna significación en cuanto a la atenuación.

## CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA

Es habitual distinguir en los registros históricos de altura y caudal de distintas estaciones de la Cuenca del Plata, un período que comienza entre los años 1972 y 1974 y termina con el último gran evento Niño de 1997/1998. En este período claramente se observa un incremento en los valores medios mensuales de dichas variables, con respecto a los correspondientes al registro completo. Las razones principales de este cambio son el aumento en las precipitaciones y la modificación en el uso del suelo ocurridos en el último cuarto de siglo (Tucci, 1997, Giacosa et al., 2000). Sin embargo, sobre las estaciones del río Uruguay ese cambio no se manifiesta tan acabadamente como sobre las escalas de los ríos Paraná y Paraguay. Especialmente la ubicación de la cuenca y sus características generales hacen que los condicionantes climáticos locales o regionales tengan un peso relativo mayor frente a los condicionantes globales. Esta situación la hace más impredecible en su comportamiento y los horizontes de pronóstico resultan, por tanto, más reducidos.

El régimen pluvial de la alta cuenca del río Uruguay tiene como característica principal una relativa constancia en la intensidad y frecuencia de lluvias durante todo el año, con una precipitación media anual de aproximadamente 2.400mm. Esto genera un régimen de crecidas posibles durante todo el año. La cuenca activa, caracterizada por abruptas pendientes, recibe frecuentemente lluvias muy intensas que originan variaciones bruscas de caudal, generando crecidas en poco tiempo.

En comparación con otras subcuencas de la región, la cuenca media del río Uruguay presenta un aporte variable y de estacionalidad poco definida. En los últimos 15 años se han registrado eventos importantes que dieron lugar a ondas de crecida significativas de los principales afluentes de la cuenca media, siendo muy difícil la comparación ya que cada una tiene su propia singularidad, tanto en la génesis como en el desarrollo y sus efectos. El aporte relativo de la cuenca agua abajo de Santo Tomé ronda el 35%, proporción significativa que obliga a esmerar el análisis y la evaluación de su aporte a paso diario.

La existencia del embalse de Salto Grande impone una modificación local del régimen del río Uruguay. El reservorio tiene alguna capacidad de regulación, especialmente cuando se trata de aportes de la alta cuenca y, por lo tanto, se dispone del tiempo suficiente para realizar la operación de descarga más conveniente. Adquiere singular importancia la estimación de aportes de la cuenca media en tiempo real y la actualización al menor paso de tiempo posible de las condiciones hidrológicas de esa cuenca. El río Ibicuí aporta una parte significativa del caudal entrante al embalse de Salto Grande y, por ende, tiene estrecha relación con los condicionamientos a la operación de la central. Es necesario mantener un seguimiento diario de la descarga del Ibicuí al tramo compartido, por tanto, se vuelve un objetivo prioritario la modelación continua y por eventos de su cuenca, de cerca de 47.000 km<sup>2</sup>. Actualmente, el Sistema tiene la posibilidad de una evaluación de la lluvia probable sobre esa cuenca con horizontes de hasta siete días, además de la técnica para evaluar convenientemente su distribución areal y temporal (Uriburu Quirno et al., 2000). Estas técnicas se actualizan y potencian permanentemente y sus posibilidades de aplicación van creciendo conforme se verifican mejoras en la precisión y disponibilidad en tiempo real.

## INFORMACIÓN UTILIZADA

### Imágenes Satelitales

Selección de escenas de los sensores *SAC-C MMRSS* y *LANDSAT7 ETM+*. Para este estudio fueron utilizadas imágenes satelitales de dos sensores:

*Enhanced Thematic Mapper* (ETM+), a bordo del Satélite Landsat 7. Este sistema provee información multispectral de resolución espacial de 30 m (banda 1-5 y 7), 60 m (banda 6 térmica) e incluye una banda pancromática de 15 m, especialmente adecuada para estudios a nivel de parcela y para poder discriminar cambios del río en aguas bajas. Se utilizaron cuatro imágenes cuya ubicación corresponde al Path-Row 224-80, de las siguientes fechas: 17 de enero de 2002 (en aguas bajas), 10 de junio de 2002 (en aguas medias), 14 de septiembre de 2002 (justo antes del máximo caudal registrado) y 14 de abril de 2003 (en aguas bajas).

*Multispectral Medium Resolution Scanner* (MMRSS), a bordo del satélite SAC-C. Este sistema provee información multispectral de resolución correspondiente a 175 m por lado de píxel (bandas 1-5) con la posibilidad de aumentar la resolución a píxeles de 35 metros de lado, mediante el sensor HRTC instalado en el satélite. Por tratarse de un barredor tipo "Push Broom", MMRS tiene un ancho de barrido constante de 360 km. El largo de la imagen depende solamente de los instantes de inicio y fin de la toma, estando éstos limitados solamente por la capacidad del grabador a bordo (2700 km) lo que proporciona una excelente herramienta para evaluar la condición hídrica de una extensa región con tan sólo una imagen. Permite una mayor rapidez de procesamiento y un monitoreo de las condiciones hídricas en primera aproximación. Se utilizaron dos imágenes correspondientes al Path 224, de las siguientes fechas: 11 de septiembre de 2001 y 9 de mayo de 2002 para evaluar las condiciones hídricas de la zona antes de pasar al estudio de alta resolución.

### Modelo Digital de Elevación

Se utilizó para este estudio el Modelo Digital de Elevación de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) perteneciente a las Agencias Espaciales de Estados Unidos (NASA), Alemania (DLR) e Italia (ASI). El DEM se construyó a partir de la técnica llamada Interferometría de radar en la cual dos imágenes de radar son tomadas de un mismo sitio desde dos posiciones ligeramente diferentes. Posee 16m de precisión de altura vertical absoluta y 90m precisión horizontal (tamaño de grilla). Mediante procesamiento digital se extrajo la información de pendiente (grado o porcentaje), aspecto de la pendiente, relieve de sombras, vistas en perspectiva tridimensional, perfiles del terreno, etc.

### Información Hidrológica

Es necesario considerar una cuantificación de los caudales que, a paso diario, descarga la cuenca media al curso principal del río Uruguay. Su evolución ante los eventos de lluvia ocurridos en los últimos años permite analizar los cambios en la condición general de los suelos, los retardos entre causa y efecto y la velocidad de retorno a las condiciones previas a un evento significativo.

Siendo el río Ibicuí en gran medida el responsable de ese aporte en ruta, se evalúan a paso diario los caudales descargados en la sección de afluencia. Se cuenta con los datos observacionales

de la Agencia Nacional del Agua (ANA) de Brasil, cotejados con las aproximaciones previas realizadas por diferencia entre los caudales registrados en las estaciones de control más próximas agua arriba y agua abajo, cuidando los retardos por la propagación de ondas entre ambas.

De esta manera, se evaluó el peso relativo del aporte del río Ibicuí dentro del aporte total de la cuenca media. Un análisis previo del caudal base del río Uruguay a la altura de Paso de los Libres mostró que la evolución del caudal directo se corresponde mayormente con las descargas del río Ibicuí, cuya cuenca presenta entonces un funcionamiento “por eventos”.

### **Información Meteorológica**

La información meteorológica fundamental consiste en la estimación de los datos de precipitación media areal obtenidos a través de dos diferentes metodologías. En primer lugar se realizó una estimación a partir de los datos medidos en las estaciones pluviométricas de la cuenca y de estaciones vecinas que sirvieron de apoyo a la metodología de interpolación. Por otro lado, se utilizó la estimación de la precipitación a través de satélite usando el técnica Hydroestimator (Vila et al., 2003) que vincula la temperatura de tope de nube con la intensidad de precipitación. Con el objeto de mejorar esta estimación se ajustaron los valores de precipitación obtenidos con los datos medidos en las estaciones pertenecientes a la red Mundial de Observaciones dependiente de la Organización Meteorológica Mundial. Esta metodología, consiste esencialmente en evaluar la diferencia entre la precipitación estimada y observada en las estaciones disponibles (Vila et. al., 2001).

## **METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO**

### **Base Teórica**

Se transformaron los contajes digitales (DN) de cada banda de las imágenes L7 ETM+ y SAC-C a radiancia a partir de los coeficientes de calibrado correspondientes, suministrados en cada imagen. La ecuación lineal aplicada para obtener la radiancia es:

$$L^k [mW / sr.cm^2] = \left( \frac{L_{max}^k - L_{min}^k}{DN_{max}} \right) \cdot DN^k + L_{min}^k$$

donde:

$k$ : número de banda ( $k$ : 1, 2, 3, 4 ó 5)

$DN_{max}$ : valor digital máximo (254)

$L_{max}^k$ : radiancia correspondiente a  $DN^k = DN_{max}$ , para  $k$ : 1...5

$L_{min}^k$ : radiancia correspondiente a  $DN^k = 0$ , para  $k$ : 1...5

Posteriormente se transformaron los valores de radiancia ( $L_0$  (lambda)) en reflectividad ( $R_a$  (lambda )) a nivel del sensor (resistividad aparente). Para la transformación se aplicó la siguiente expresión:

$$R_{\alpha(\lambda)} = \frac{\pi \cdot d \cdot L_0(\lambda)}{E_0(\lambda) \cdot \cos \theta}$$

donde:

L: reflectividad en la longitud de onda considerada (adimensional, entre 0 y 1),

d: distancia de la Tierra al Sol, en unidades astronómicas,

E<sub>0</sub>: irradiancia exoatmosférica,

Theta: ángulo cenital.

En segundo lugar se realizó la corrección atmosférica aplicando el modelo de corrección del histograma por valores mínimos (Chávez, 1988). Este algoritmo propone la estimación de la influencia de la atmósfera a través de un cálculo que se hace directamente sobre la imagen para la determinación de la radiancia medida por el sensor sobre áreas oscuras. Esas áreas oscuras en teoría deberían ser negras (≈0 por ciento de reflectancia) pero a causa de la dispersión atmosférica los correspondientes píxeles presentan un nivel digital distinto de cero. Bajo estas hipótesis sólo una dispersión simple puede ser removida.

Operacionalmente, la selección del nivel digital mínimo apropiado para la implementación de la corrección puede ser obtenido por el histograma de frecuencias de la imagen digital (Chávez, 1996).

Este algoritmo apunta principalmente al análisis de las bandas del espectro visible donde usualmente hay un marcado aumento en el número de píxeles con valor distinto de cero, es decir, en escala de grises (Ej.: banda 1 ETM es la más afectada por los efectos de absorción). La determinación del valor digital mínimo para una banda en particular se basa en la hipótesis que asume el método en el hecho de que existe una alta probabilidad de que por lo menos algunos píxeles dentro de una imagen sean negros. Esas superficies oscuras pueden corresponder a (1) áreas sombreadas por nubes o efectos topográficos (baja reflectancia en todas las bandas), (2) cuerpos húmedos (baja reflectancia en las longitudes de onda roja e infrarrojas), (3) áreas con densa vegetación como bosques de coníferas (muy baja reflectancia en la regiones del azul y rojo del espectro electromagnético) y (4) superficies con combinaciones de algunos de los factores anteriores (Kaufman y Sendra, 1988).

La siguiente ecuación define el nivel de salida en la posición  $i,j$  para la banda  $k$ ,  $DN'_{i,j,k}$  como el nivel digital original  $DN_{i,j,k}$  menos nivel digital mínimo para la misma banda  $k$ ,  $DN_{\min(k)}$ .

$$DN'_{i,j,k} = DN_{i,j,k} - DN_{\min(k)}$$

Este método fue utilizado por la ventaja de requerir sólo información contenida en la propia imagen. Se ha optado por este método ya que no se dispone de perfiles atmosféricos para la zona.

Finalmente se corrigió geoméricamente la escena, llevando su georreferencia al sistema Gauss-Krüger, faja 5 (datum WGS84) mediante el método del Vecino Más Próximo, ya que es el que menos modificaciones ocasiona al valor de reflectancia del píxel original. Se diseñó un modelo de procesamiento de imágenes satelitales (*modeler*) conteniendo dos índices calculados a partir de la reflectividad en diferentes bandas: NDVI (o SAVI en caso de corregir la influencia del suelo el rojo e infrarrojo (utilizado en enero 2002)) y un índice de color / saturación, más la banda azul, arrojando como resultado una imagen de tres bandas para su respectiva clasificación. Para la selección de píxeles se utilizó una método de clasificación híbrido o mixto (no supervisado /

supervisado). Se propone este método mixto ya que el método supervisado puede resultar a veces demasiado subjetivo y el no supervisado puede carecer de significado físico real.

El resultado fue un mapa temático, con clasificación de agua superficial y de encharcamiento. A partir de este mapa se generó un nuevo *raster* de agua / no-agua para la generación de mapas de detección de cambio.

La Fig.2 muestra la ubicación cronológica de las seis imágenes consideradas. Se las indica sobre el hidrograma de descarga del río Ibicuí correspondiente al período 1/sep2001-30/abr/2004. La Fig.3 muestra la clasificación hídrica efectuada sobre la zona de estudio, base para el análisis posterior.

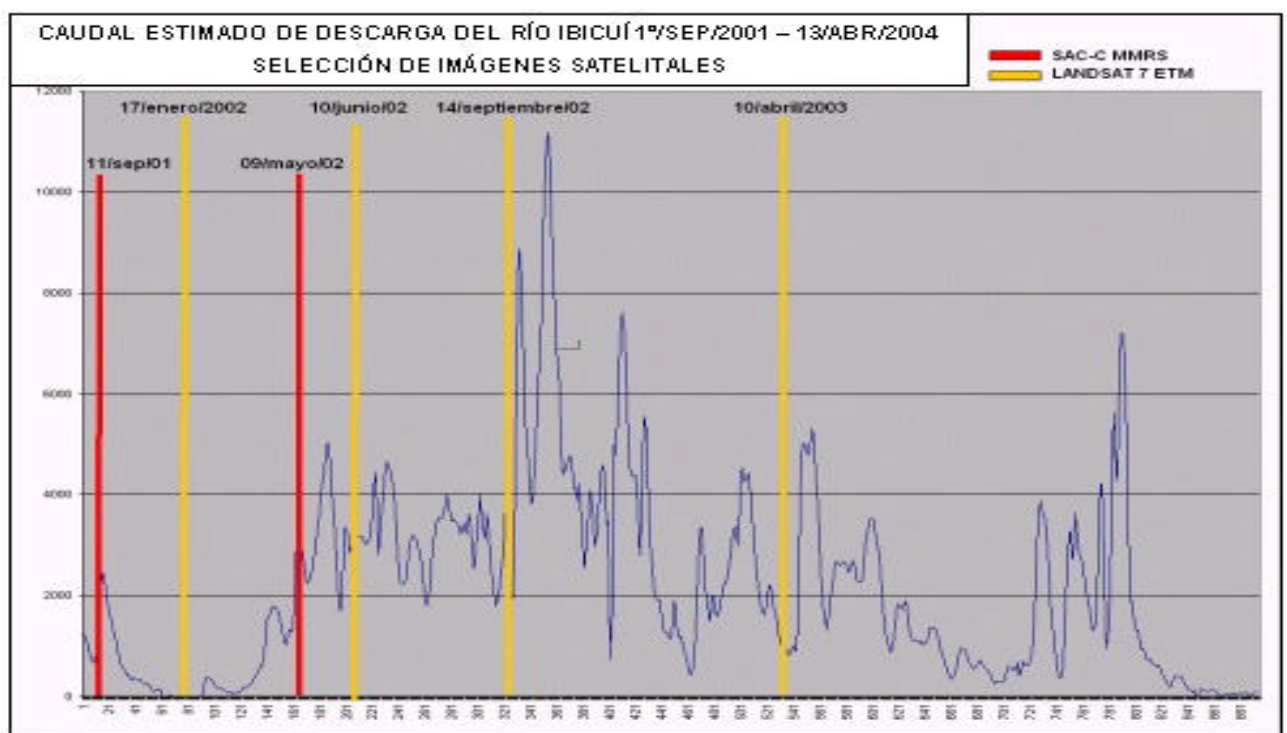


Figura 2. Selección de imágenes satelitales

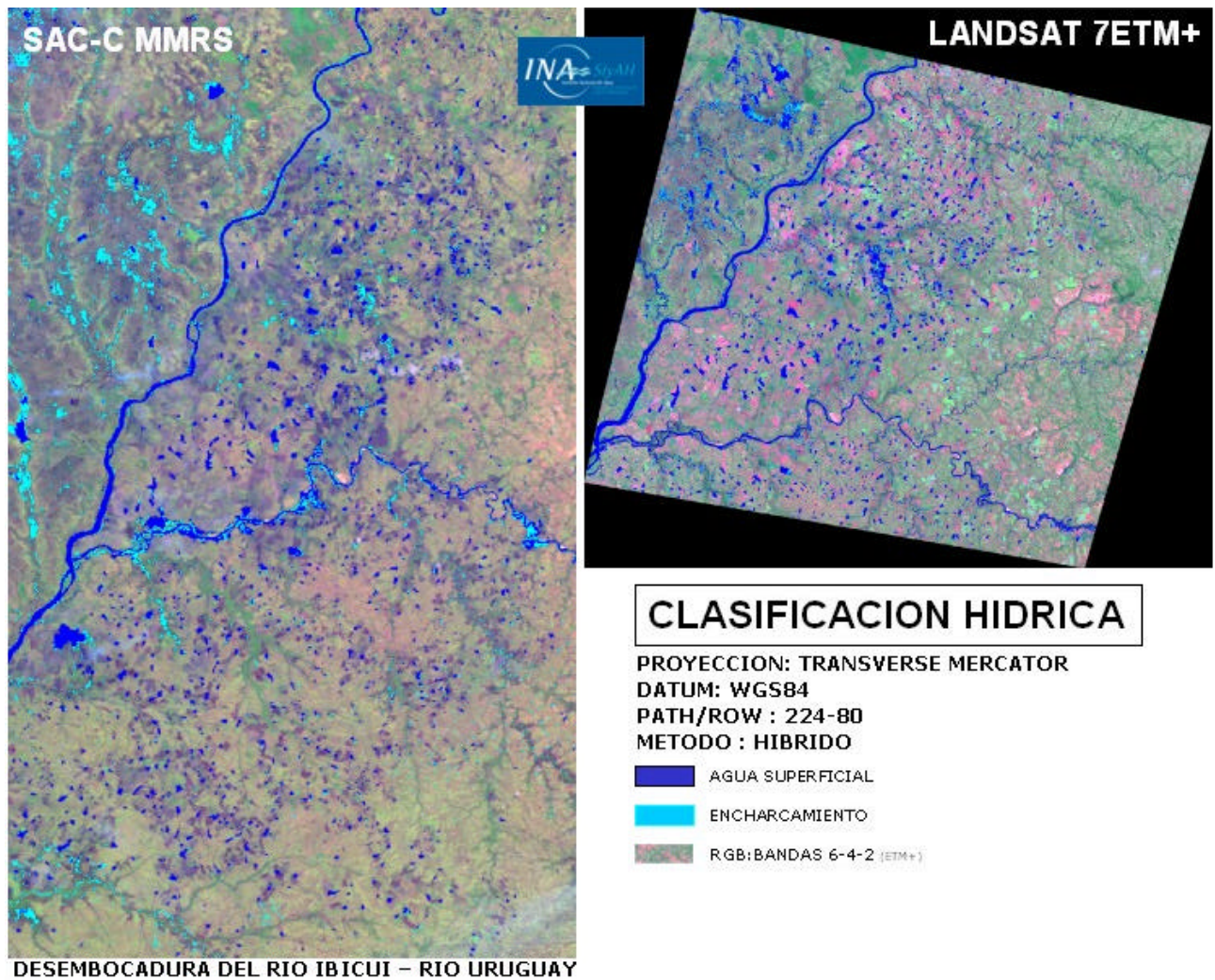


Figura 3: Clasificación hídrica zona de estudio

### Detección de Cambios

Es el proceso por el que se identifican diferencias en el estado de un recinto a través de su observación en diferentes momentos. Esencialmente comprende la habilidad de cuantificar los cambios de clase en el tiempo. La detección de cambio (*change detection*) es posible gracias a la cobertura repetida a intervalos cortos de revisita del satélite y a una consistente calidad de imagen.

*Change detection* es útil en diversas aplicaciones como lo son la cuantificación de los espejos de agua, de los cambios en el uso del suelo, la asistencia en emergencias, el monitoreo de cultivo y de forestación, los estudios de fenología de la vegetación, los cambios estacionales en la producción de pasturas, etc.

La premisa básica en el uso de la información satelital para la detección de cambios es que estos cambios en la superficie del terreno resultan en variaciones tanto de los valores de radiancia medidos por el sensor, como de los de irradiancia en el área de estudio.

La naturaleza digital de la información de los satélites hace que la misma sea muy fácilmente manejable para el análisis mediante algoritmos que generan en forma automática una nueva imagen que resalte las diferencias.

Hay varios algoritmos o técnicas digitales que se han desarrollado y se han utilizado durante los últimos años para detectar cambios. Estas técnicas se basan en varias relaciones, principios y asunciones matemáticas o estadísticas. Es importante utilizar la técnica más apropiada para estudiar un área y un ambiente particulares. Para este estudio en particular se utilizó la técnica Post-clasificación (Lunetta and Elvidge, 1999).

### **Post-clasificación**

Este método se basa en la comparación de clasificaciones de las imágenes correspondientes a los instantes  $t1$  y  $t2$ , hechas de manera independiente. La aplicación de esta clasificación resulta tanto en mapas de cambio como en el cómputo numérico de la cantidad de píxeles correspondientes a una de tres clases, incremento, decremento y permanencia. Un dado píxel pertenece a la clase de permanencia si la diferencia en valor absoluto entre sus DN's es menor que un valor preestablecido por el operador. Contrariamente, pertenece a la clase de incremento cuando el cambio ha sido mayor que dicho umbral, de  $t1$  a  $t2$  y viceversa para la clase de decremento.

La Fig.4 muestra el producto de aplicar esta técnica a la información satelital disponible. Los eventos de lluvia registrados sobre la cuenca media del río Uruguay entre enero y junio de 2002 provocaron un aumento en el tenor de humedad de los suelos y un aumento en el agua superficial. Tanto el tramo superior del Ibicuí como su tramo terminal presentan un incremento como respuesta al evento de lluvia local de la tercera semana de mayo de ese año. Se detectan también numerosos espejos de agua que incluyen represamientos para aprovechamiento agrícola, tanto en la cuenca de margen derecha del río Ibicuí como en la cuenca del río Piratinim y la de aporte directo al río Uruguay.

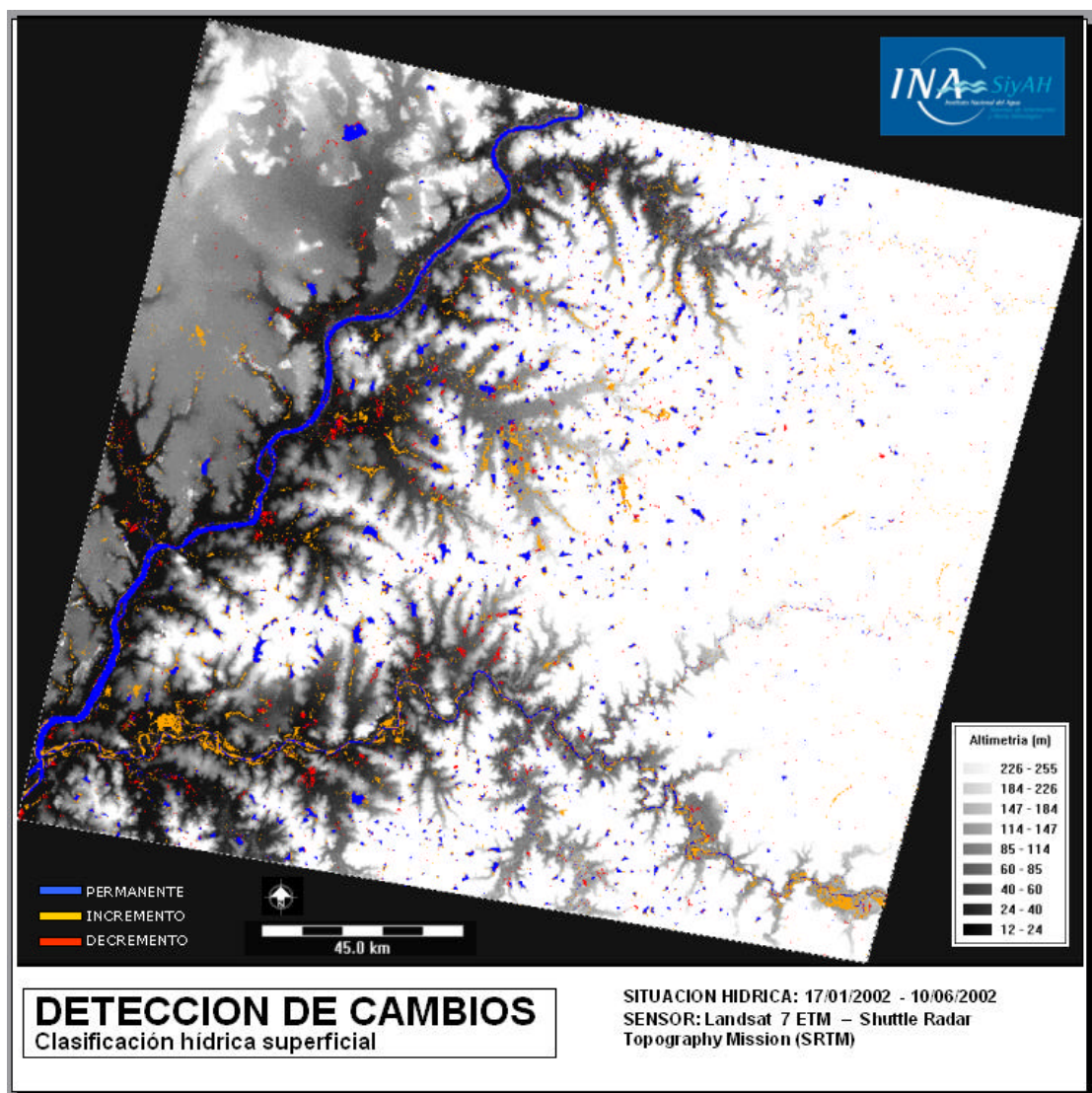


Figura 4 : Producto de detección de cambios

### Aplicación Operativa

Se analizaron posteriormente dos imágenes SAC-C MMRSS tomadas en fechas 14/sep/2002 y 17/sep/2003. En la Fig.5 se presenta el hidrograma de descarga del río Ibicuí entre noviembre de 2001 y marzo de 2004, en el que se indica la ubicación de esas dos imágenes. Como se observa en el hidrograma, corresponden a dos situaciones hidrológicas distintas. En el primer caso, el aporte del río Ibicuí se ubicaba en los  $2.200\text{m}^3/\text{s}$ , luego de una sucesión de eventos de magnitud acotada, tal como se desprende de la Fig.6. Las lluvias que produjeron la crecida inmediata posterior no se habían producido aún. En el segundo caso, el río se encontraba en sostenida recesión, con una descarga inferior a los  $800\text{m}^3/\text{s}$ . No se produjeron eventos significativos en las semanas previas a la toma. En ambos casos y por los tiempos transcurridos entre el evento inmediato previo y la respectiva toma de imagen, se considera que la condición fluvial ya responde a esos eventos.

Interesaba analizar la relación entre la sucesión de eventos intermedios y el cambio detectado en el patrón de agua superficial. La comparación del agua superficial se hace en la Fig.7. Estas imágenes aportan elementos para caracterizar la respuesta de la cuenca. En el primer producto

se observa una distribución areal pareja, sin excedentes concentrados. En el segundo caso, la cuenca se caracteriza por predominio de áreas secas y sin excedentes significativos.

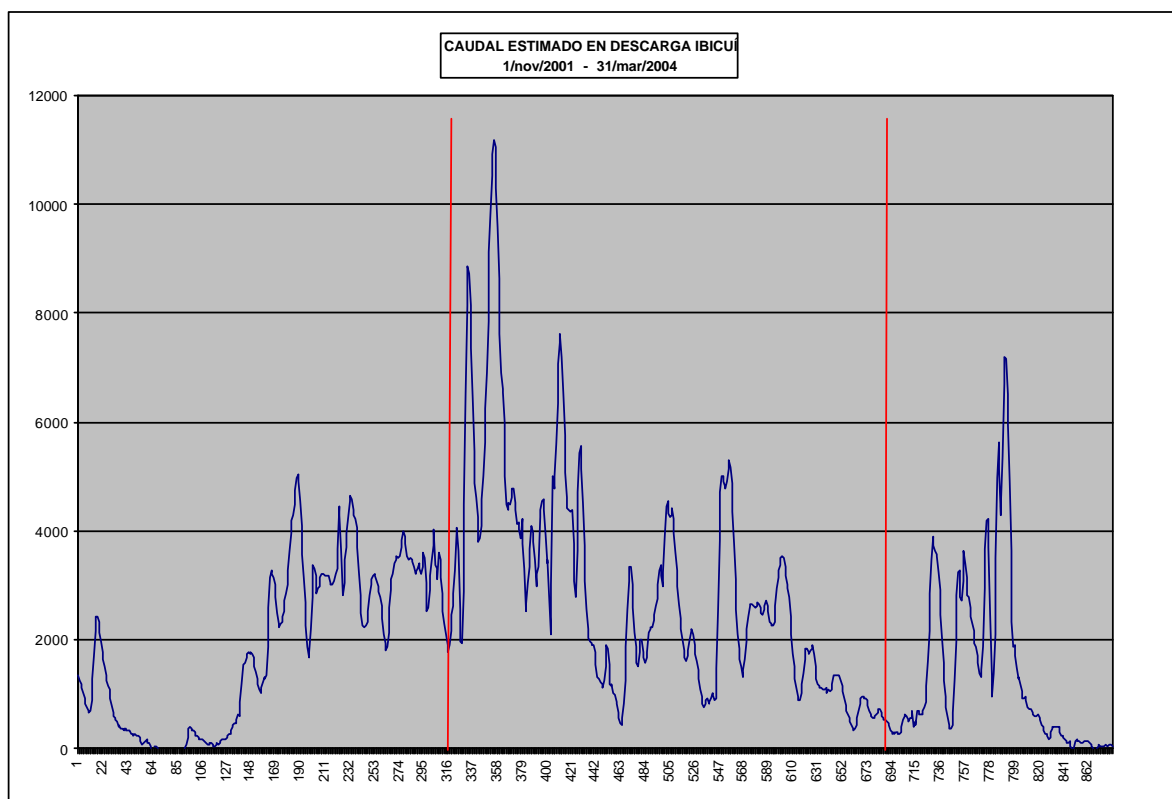


Figura 5 : Dos Escenarios Analizados

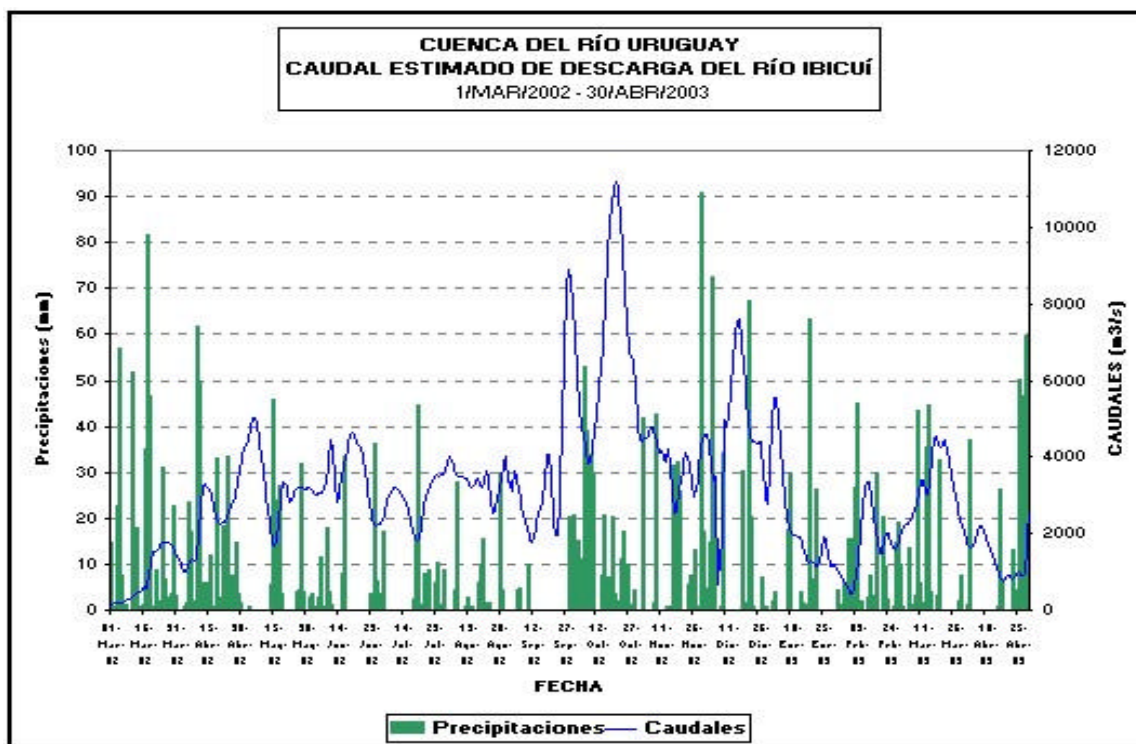


Figura 6: Hidrograma en Descarga y Precipitación Media Areal

SAC-C MMRS 14-sept 2002



SAC-C MMRS 17-sept 2003

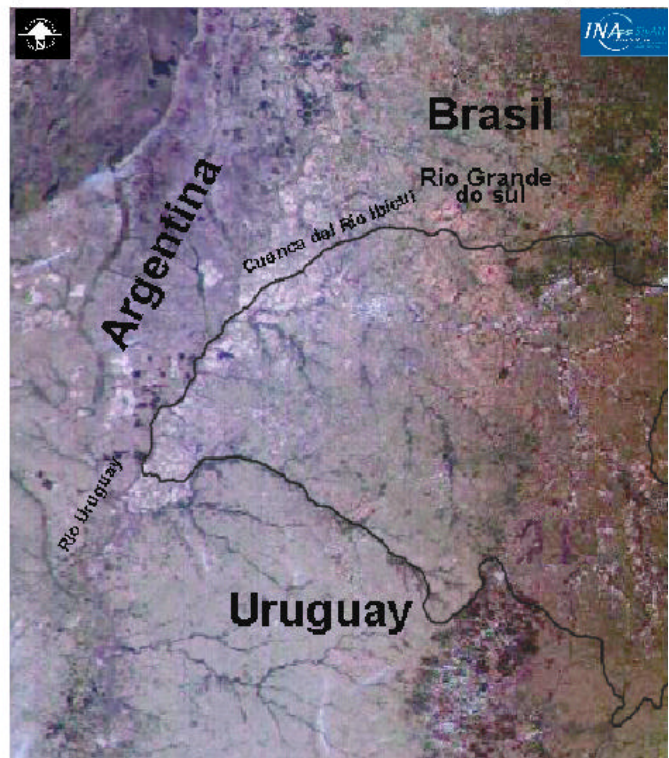


Figura 7 : Comparación de Agua Superficial

### Integración de la información

Para la caracterización de la hidrología superficial se aplicó la metodología apoyada en herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que operaron sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT), la Detección de Cambios, los parámetros de caudales y lluvias registradas para el período de estudio.

Los sensores remotos multiespectrales colocados en plataformas satelitales han puesto a disposición datos hidrológicos muy importantes que posibilitarán el desarrollo de nuevos modelos lluvia-escorrentía capaces de aceptar cuantificaciones espaciales distribuidas de la evolución de la dinámica hídrica, pendiente del terreno, estimaciones de lluvias etc. Los modelos de este tipo, ya sea modelos hidrológicos distribuidos o agregados, tienen típicamente bases físicas y operan por subcuencas o por elementos *raster* de datos. Es probable entonces observar una mejora en la simulación hidrológica para el pronóstico de caudales.

En resumen, las bondades de esta integración son:

Como **HERRAMIENTA DE ANÁLISIS**: Para analizar la evolución de caudal, la información generada *raster* y vector se integra en un sistema de información geográfico para su visualización y análisis de información otorgándole al operador una mayor comprensión de la respuesta de la cuenca medida sobre la base de hidrogramas.

Como **HERRAMIENTA DE MODELACIÓN**: Como *input* para un modelo hidrológico, ya sea agregado o distribuido, por su característica de ser información espacial matricial numérica.

Se puede integrar a modelos hidrológicos como *input*, reflejando más adecuadamente el estado real de la cuenca al comienzo de la corrida, mejorando la simulación. Por ejemplo, la estimación de la pendiente a partir del (MDT) puede ser relacionada con los parámetros del modelo de los que depende directamente la valoración de la escorrentía.

Asimismo, este tratamiento de la información sostenido operativamente deberá en el futuro permitir un control adicional de la salida de los modelos hidrológicos aplicados en ocasión de cada evento sobre la cuenca media del río Uruguay, mejorando la evaluación de su aporte.

La Fig.8 muestra esquemáticamente el proceso de integración. Lo destacable es que el proceso resumido así no es lineal, sino que se caracteriza por aproximaciones sucesivas entre los datos de lluvia y caudal puntuales por un lado y la información satelital y morfológica por el otro.

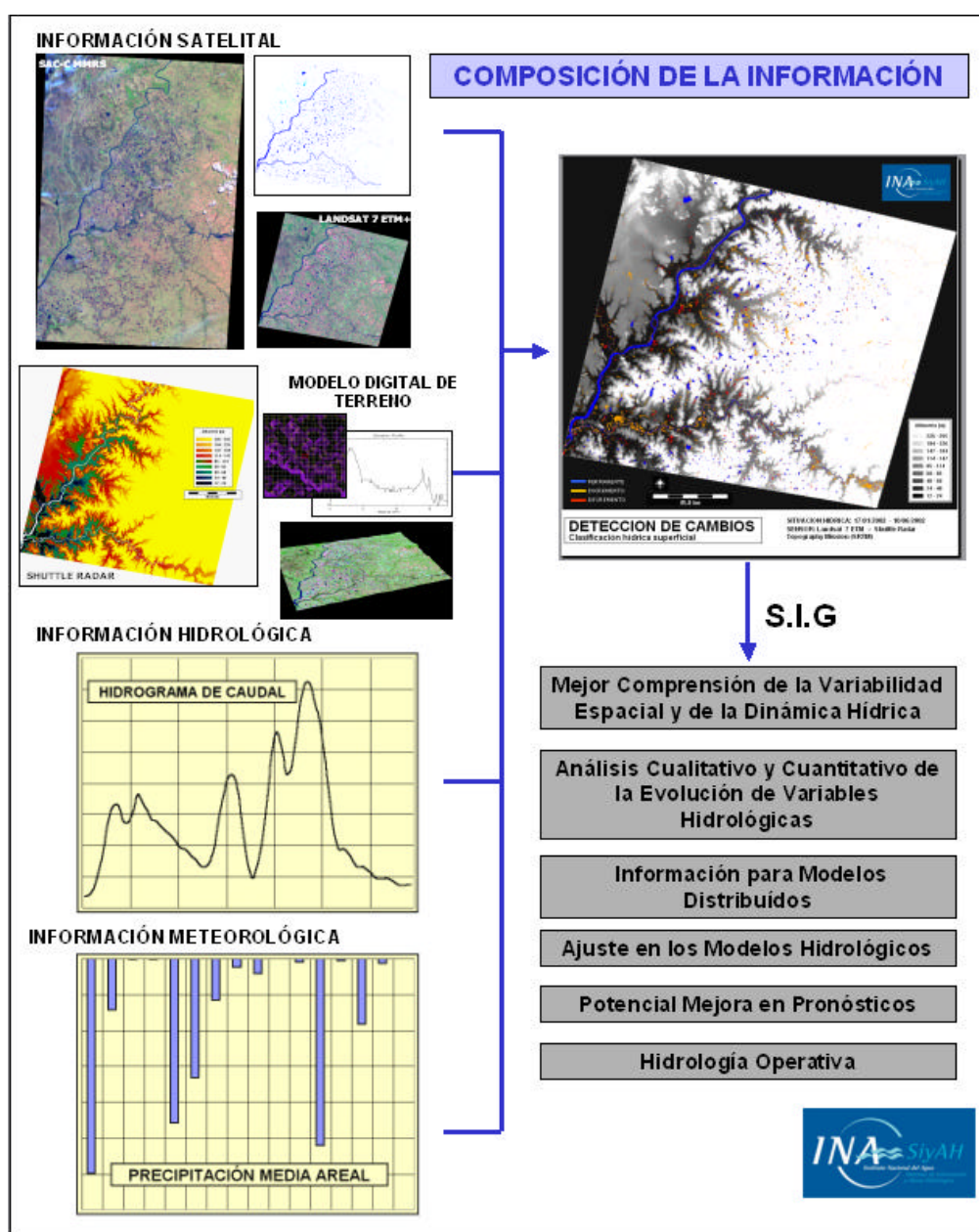


Figura 8. Composición de la información

## **CONCLUSIONES**

El trabajo ha intentado dar una rápida visión de los desarrollos y de algunas investigaciones en curso sobre la estimación de lluvias utilizando sensores remotos y la utilización de información de observación de la tierra. Estos permiten un mejor análisis de los eventos hidrometeorológicos, obtener datos digitales del terreno y un diagnóstico del agua almacenada en el suelo, lo que redundará en una mejora en la capacidad de predecir el desarrollo de crecidas.

Esta integración de información permite una aproximación a la condición hidrológica general de la cuenca, una mejor evaluación de la información de entrada a modelos hidrológicos y una mejor interpretación de sus resultados en la obtención de hidrogramas de descarga al río Uruguay. Se logra así un mayor poder de análisis de la distribución espacial de los eventos, una fácil comprensión de los resultados arrojados por la metodología planteada, un mejor aprovechamiento de los datos y una inmediatez de interpretación. La resolución espacial (entre 15 metros y 175 metros, con los sensores considerados) permite evaluar la zona de estudio a diferentes escalas.

Constituye una desventaja en la metodología la baja resolución temporal de los sensores usados (8 días combinando Landsat 5 y SAC-C). Se destaca también la posible indisponibilidad de las imágenes en presencia de nubes.

Con esta propuesta, se extiende el uso que de la información satelital viene haciendo el Instituto (diagnóstico de saturación de suelos e inundación durante una emergencia), al seguimiento de las condiciones hidrológicas en escenarios cambiantes que exigen adecuar el conocimiento del estado de la cuenca para poder estimar futuros excedentes, como así también ajustar previsiones hidrológicas sobre un río y parámetros de modelos.

Además, se ilustra como en este campo de Sistemas de Alerta Hidrológico las contribuciones multidisciplinarias son esenciales para su desarrollo exitoso.

El futuro acceso en tiempo real a un mayor cúmulo de datos de origen satelital y el desarrollo informático permitirán mejorar la estimación de las variables involucradas en los distintos procesos del ciclo hidrológico y la modelación matemática de los mismos para pronóstico hidrológico.

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores agradecen a Haydeé Karszenbaum, del Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE-CONICET / UBA) por su constante colaboración con este Sistema de Alerta Hidrológico y, en particular, en la elaboración del presente trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- Chávez, P. S.** (1988). "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data". *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.
- Chávez, P.S., Jr.**, (1996), "Image-based atmospheric corrections—revisited and revised". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(9):1025-1036.
- Giacosa, R., Paoli, C., Cacik, P.**, (2000). "Conocimiento del Régimen Hidrológico", en "El Río Paraná en su Tramo Medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura", Paoli, C. y Schreider, M. (editores). Capítulo 2, Tomo 1. Centro de Publicaciones Universidad del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Kaufman, Y. J. and C. Sendra**, (1988), "Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR imagery," *Int. J. Remote Sensing*, vol. 9 (8), pp. 1357-1381.
- Luneta, R.S. and C.D. Elvidge** (ed) (1999) *Remote Sensing Change Detection. Environmental Monitoring Methods and Applications*. Taylor&Francis, London.
- Tucci, C.**, (1997). "Environmental Issues in the Plata Basin". Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.
- Uriburu Quirno, M., Goniadzki, D. y Borús, J.**, (2000). "Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata. Río Uruguay", Jornada de Cuenca del Bajo Uruguay. Comisión Administradora del Río Uruguay. Paysandú, República Oriental del Uruguay.
- Vila D., Velasco L, Goniadzki D.**, (2001), "Satellite Rainfall Estimation Using Rainfall Observed Data: Two events evaluation". *Anales del CONGREGMET VIII y CLIMET IX*, Buenos Aires, Argentina, Mayo 2001.
- Vila, D., Scofield, R. , Kuligowski, R. and Davempport, J. C.**, (2003). "Satellite Rainfall Estimation over South America: Evaluation of Two Major Events", NOAA Technical Report NESDIS 114, U.S. Department of Commerce, pp 1-17.