

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL MONITOREO DE  
EVENTOS HÍDRICOS SUPERFICIALES MEDIANTE IMÁGENES  
COSMO SKYMED

por Lic. Rodrigo Martín Edrosa

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el  
Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los  
requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y  
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Noviembre, 2011

©IG - CONAE/UNC 2011

©FaMAF - UNC 2011

Directora: Dra. Dora Goniadzki (Instituto Nacional del Agua)

Co-Director: Ing. Álvaro Soldano (CONAE)

Consultor científico: Dra. Haydee Karszembaum (IAFE - UBA)

# Resumen

El Delta del Paraná conforma un sistema complejo que involucra varios ecosistemas abarcando diferentes ambientes. En dicho sistema existen recurrentes inundaciones, siendo su monitoreo necesario para evaluar la capacidad de atenuación de las grandes crecidas. Esta interacción entre pulsos de inundación, las lagunas y cursos de agua es compleja.

Se carece de suficiente información de campo histórica y actualizada del Delta. Su estudio espacial, es necesario para comparar eventos de inundación y analizar la evolución de los mismos. Las actividades productivas en la región, en especial la ganadera, se encuentran seriamente condicionadas a su situación hidrológica.

EL objetivo principal de esta investigación, fue identificar la propagación de la crecida del año 2010 en el Delta superior del Río Paraná, a partir de la generación de cartografía hídrica superficial mediante el uso de técnicas de percepción remota. Se utilizaron imágenes Cosmo SkyMed a la cuales se le aplicaron filtros adaptivos y de textura, para luego ser clasificadas mediante un algoritmo supervisado llamado Máxima Probabilidad. Se detectaron zonas inundadas y corroboró en campo su exactitud. Luego se comparó los resultados con un clasificador no supervisado llamado ISODATA.

Como resultado, se obtuvo cartografía temática de la inundación del año 2010 en el Delta superior del Río Paraná basada en datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) en Banda X (2,3 cm). Sin embargo, existieron áreas inundadas que no pudieron ser clasificadas como tal, ya que para esta banda la presencia de vegetación densa no permitió identificar por ejemplo, agua debajo de la misma debido a su alta retrodispersión causada por el doble rebote de la señal. Por otro lado, con el objetivo de sentar información de base, se generó un relevamiento con datos tomados en campo del comportamiento de la reflectividad del radar en banda X y de las coberturas típicas presentes en humedales.

Palabras claves: Delta del Río Paraná, Teledetección, Cosmo SkyMed, Banda X, Sistema Radar, Inundación, Coberturas.

# Abstract

The Paraná River Delta is a complex system and involves several ecosystem with different environmental. In the Delta there are recurrent floods and its monitoring is necessary to assess attenuation capacity during large floods. The interaction between flood pulse and gaps are complex in the interest zone. In this region there is no sufficient historical and update information. Its study is very important to compare observed event and its evolution. The productive activities in the region, specially the livestock, are subject to hydrological condition.

The main research objective was to identify the spread of the flood of 2010 in the Delta of the Parana River from the surface water mapping using remote sensing techniques. It's was used Cosmo SkyMed images to which were applied adaptive and texture filters, in order to classify flood areas. The classifier method involves a supervised algorithm called maximum likelihood. The accurate was verified with ground true campaigns and compared to non supervised classifier.

Was obtained thematic cartography based on radar (X Band) of the flood during 2010 in the Parana River Delta. However, there were flooded areas which could not be detected for X band (2,3 cm wavelength), specially flooded woods and high density vegetative area, due to its high backscattering caused by double bounce effect. Moreover, with the target to generate base information about reflective behaviour in x band of different covers on typically wetlands, a field work campaigns was organized.

Keywords: Paraná Delta River, Remote Sensing, Cosmo SkyMed, X Band, Radar System, Flood, Covers.

## Agradecimientos

Agradezco a la Dra. Haydee Karszembaum por la asistencia técnica en este trabajo, a la Dra. Dora Goniadzki que, junto al Ing. Juan Borús, proporcionaron toda la información y conocimientos generados en el Instituto Nacional del Agua. Al Ing. Álvaro Soldano, ya que sin su apoyo no hubiese sido posible cursar la Maestría. Al Dr. Marcelo Scavuzzo por todos sus consejos y ayuda para la realización del trabajo de campo. A todos los docentes que formaron parte de la Maestría, y en especial a Sergio Masuelli por otorgarme nuevos conocimientos. Al Ing. Gabriel Platzeck por haber confiado en mi en muchas oportunidades, a mi familia, y por último al pueblo de mi país, ya que sin su aporte económico hubiese sido imposible acceder a la formación académica.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Tema de Investigación</b>	<b>9</b>
2.1. Antecedentes del Tema . . . . .	9
2.2. Caracterización del Área de Estudio . . . . .	10
2.2.1. Caracterización de la Inundación 2009/2010 . . . . .	13
2.3. Objetivo General . . . . .	16
2.3.1. Objetivos Específicos . . . . .	16
2.4. Hipótesis . . . . .	16
<b>3. Marco Conceptual</b>	<b>17</b>
3.1. Escenario del Estudio . . . . .	17
3.1.1. Inundaciones . . . . .	17
3.1.2. Humedales . . . . .	20
3.1.3. Información Hidrométrica . . . . .	20
3.2. Teledetección . . . . .	21
3.2.1. El Espectro Electromagnético . . . . .	23
3.2.2. Características Básicas de los Sensores Remotos . . . . .	25
3.2.2.1. Resolución Angular . . . . .	25
3.2.2.2. Resolución Espacial . . . . .	26
3.2.2.3. Resolución Espectral . . . . .	27
3.2.2.4. Resolución Radiométrica . . . . .	27
3.2.2.5. Resolución Temporal . . . . .	28
3.2.3. Sistema Pasivo . . . . .	28

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
3.2.3.1. Índices de Diferencia Normalizada . . . . .	28
3.2.3.1.1. NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	29
3.2.3.1.2. NDSI (Índice de Suelo de Diferencia Normalizada) . .	29
3.2.3.1.3. NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) . .	29
3.2.4. Sistema Activo - SAR . . . . .	29
3.2.4.1. Polarización de la Señal . . . . .	34
3.2.4.2. Mecanismos de Interacción . . . . .	35
3.2.4.3. Ruido y Número Equivalente de Looks (ENL) . . . . .	36
3.2.4.4. Filtros Digitales en Imágenes SAR . . . . .	41
3.2.4.4.1. Lee mejorado . . . . .	41
<b>4. Información utilizada</b>	<b>45</b>
4.1. Información Hidrométrica . . . . .	45
4.2. Datos Aster . . . . .	47
4.3. Datos Cosmo SkyMed . . . . .	49
<b>5. Metodología</b>	<b>52</b>
5.1. Información Remota . . . . .	54
5.1.1. Pre-procesamiento . . . . .	54
5.1.1.1. Imagen ASTER . . . . .	54
5.1.1.2. Imágenes COSMO SkyMed . . . . .	56
5.1.1.3. Cálculo de Número Equivalente de Looks (ENL) . . . . .	57
5.1.2. Procesamiento . . . . .	59
5.1.2.1. Máscara de Agua Permanente . . . . .	59
5.1.2.1.1. Índice y Clasificación Espectral . . . . .	59
5.1.2.1.2. Clasificación de Agua Permanente . . . . .	61
5.1.2.2. Detección de Áreas Inundadas mediante Imágenes Cosmo SkyMed	65
5.1.2.2.1. Identificación de Clases . . . . .	68
5.1.2.2.2. Obtención de Muestras . . . . .	68
5.1.2.2.3. Algoritmo de Clasificación de Máxima Probabilidad . .	72
5.1.2.2.4. Verificación de la Clasificación de Áreas Inundadas . .	73

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	6
5.1.3. Pre-análisis de estudio de la banda X ante distintas coberturas . . . . .	78
<b>6. Análisis y Resultados</b>	<b>88</b>
6.1. Áreas Inundadas . . . . .	88
6.2. Análisis de estudio de Banda X ante distintas coberturas . . . . .	94
<b>7. Conclusiones</b>	<b>101</b>
7.1. Consideraciones Finales . . . . .	102
<b>8. ANEXO: Cartografía Elaborada</b>	<b>108</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Entre marzo y abril del año 2007, el Río Paraná tuvo un importante aumento del nivel de sus aguas. Esta creciente concluyó un ciclo hidrológico seco que había persistido en la región aproximadamente durante ocho años (1999/2006). La inundación ocasionó en las islas del Delta una gran cantidad de mortandad de ganado. La actividad ganadera en las islas está ligada a la explotación del ganado vacuno, la cual observó un incremento importante en los últimos años. Debido a que los productores ganaderos no estaban acostumbrados a los cambios de características hidrológicas que manifestó el río en dicho período, las acciones relacionadas con el traslado del ganado que se encontraba afectado por el aumento de nivel de las aguas, se realizaron tardíamente. Además, la existencia de una infraestructura inadecuada para momentos de emergencias, hizo colapsar el servicio de barcazas que trasladan el ganado. A pesar de que algunos productores decidieron practicar el “antiguo azote” para que los animales naden, no se logró mudar toda la hacienda a tierra firme, ocasionando la mortandad de aproximadamente 28.000 cabezas de ganado según lo informado por fuentes periodísticas (Eliezer, 2009).

El período posterior a la inundación mencionada (fines del 2007 hasta mediados del 2009), la región se vio nuevamente afectada por una fuerte bajante. Esto se revirtió durante la primavera de 2009. A fines de ese año, toda la cuenca se encontraba en una situación húmeda y los pronósticos climáticos indicaban una alta probabilidad de eventos de lluvia significativos en la alta cuenca del Río Paraná. En enero de 2010, el nivel de altura del río en Rosario superó la media histórica permaneciendo por encima de la misma hasta el mes de julio, y alcanzando su máximo nivel a fines del mes de febrero de 2010 (Instituto Nacional del Agua, 2011).

A los efectos del análisis prospectivo de ondas de crecida fluvial provenientes de la cuenca del Río Paraná, la experiencia en el monitoreo de las emergencias registradas en los últimos años, demuestra que es necesario evaluar la capacidad de atenuación de grandes ondas de crecida en la región de las islas que se encuentra agua debajo de la sección Paraná-Santa Fe, comienzo del Delta del Río Paraná. Esa región, cabecera del Delta, carece de suficiente información de



campo. Se destaca la importancia del análisis espacial, comparando situaciones observadas y analizando las evoluciones respectivas. Se plantea la necesidad de analizar la situación de la cabecera del Delta en ocasión de la crecida significativa de septiembre de 2009 a julio de 2010 que afectó la región (Goniadzki et al., 2010).

El monitoreo de las inundaciones mediante sensores remotos han facilitado de gran manera, la adquisición de información espacial de regiones afectadas. Las imágenes satelitales pueden provenir de sensores “pasivos” o “activos”, según que capturen la energía electromagnética reflejada por la superficie terrestre, o emitan su propio haz energético y reciban la energía de la señal retrodispersada. A estos últimos pertenecen los de tecnología SAR, dichos sensores miden en la región del espectro electromagnético de las longitudes de onda denominadas “microondas”. En particular, son muy sensibles a los cambios en las propiedades dieléctricas de las superficies observadas y además, por su longitud de onda, logran atravesar la atmósfera sin mayores perturbaciones, tanto de día como de noche. Estas características hacen de los sensores satelitales de tecnología SAR, un instrumento ideal para la detección de humedad en el suelo a nivel superficial y sub-superficial (Soldano, 2007).

El objetivo principal de la tesis, es la obtención de cartografía hídrica superficial del área del Delta superior del Río Paraná, y en entre los objetivos específicos, se destaca la generación de información base del comportamiento de la banda X ante coberturas típicas del área de estudio.

El desarrollo de la tesis, parte de una descripción de la problemática estudiada, los conceptos más relevantes abordados, las variables utilizadas, el desarrollo metodológico y sus resultados validados, y por último las conclusiones obtenidas.

# Capítulo 2

## Tema de Investigación

Las inundaciones en el Delta del Río Paraná generan incertidumbre sobre el comportamiento hídrico del área. Distintos eventos de inundación en las islas del Delta superior, han ocasionado pérdidas económicas importantes. Es por esto que se plantea la necesidad de generar información espacial del área afectada.

### 2.1. Antecedentes del Tema

Basterra et al. (sf) desarrolló una metodología basada en información obtenida de forma remota junto a la sistematización de información hidrométrica. En dicha investigación, se realizó un mapeo llamado zonificación de riesgo ambiental por inundación, basado principalmente en datos obtenidos por satélites, y de un análisis de los tiempos de recurrencia de alturas máximas anuales obtenidas del Río Paraná en puerto Corrientes. Como conclusiones se destacan la elaboración de una metodología para la obtención de un mapa de riesgo ambiental por inundaciones, y la importancia de la información adquirida a través de sensores remotos junto a la información hidrométrica relevada periódicamente.

Giraut et al. (2002) comparó determinadas áreas de mayor a menor susceptibilidad hídrica sobre la base de la conformación de un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para imágenes proveniente del satélite Landsat TM y SAC - C sintético (Satélite Argentino Científico C). Entre sus conclusiones, se comprueba la capacidad espacial del producto obtenido por el SAC - C, para la realización de cartografía de susceptibilidad hídrica en comparación con imágenes Landsat.

Parmuchi et al. (2002) determinó la aplicabilidad de datos multitemporales RADARSAT para el mapeo de las islas del Bajo Delta del Río Paraná. Se obtuvo información a partir de la identificación de los mecanismos de interacción dominantes que ocurren entre la señal

de radar y la vegetación, teniendo en cuenta la fenología de la misma, dicha información fue utilizada en el diseño de un clasificador de decisión para obtener un mapa de cobertura terrestre, comparándose con un clasificador de datos iterativos (ISODATA). Las conclusiones principales de la investigación, fueron la necesidad de contar con datos multitemporales adquiridos bajo diferentes condiciones ambientales para el mapeo de humedales, y las ventajas y flexibilidad de los clasificadores basados en razonamientos físicos para datos SAR.

Soldano et al. (2004) aportó elementos para la determinación de la susceptibilidad ante eventos de inundación a partir de técnicas de percepción remota y de sistemas de información geográfica. Como resultado obtuvo un mapa de susceptibilidad, peligrosidad o amenaza ante inundaciones por exceso de lluvias locales para el área urbana de la ciudad de Goya, inscripta dentro del perímetro de las defensas.

Edrosa et al. (2008) generó cartografía temática mediante la utilización de datos hidrométricos y satelitales obtenidos por el satélite Landsat 5 TM. Los resultados mostraron la utilidad que tienen los datos satelitales para la confección de cartografía de áreas donde existen eventos naturales de gran recurrencia, como son las inundaciones en el Delta.

Salvia (2010) realizó un análisis del aporte de la teledetección al estudio funcional del Delta de Río Paraná, haciendo hincapié en cómo y en qué condiciones el análisis de los datos provenientes de sensores remotos permite monitorear los procesos en una determinada área. Obtuvo como resultado, un enfoque metodológico para el estudio de macrosistemas de humedales por medio de teledetección óptica y radar, generándose el primer mapa regional de tipos fisonómicos de vegetación, mapas de inundación del evento 2006 - 2007, mapas de áreas afectadas por los incendios masivos de 2008 y de la vegetación luego del evento.

## 2.2. Caracterización del Área de Estudio

El Delta del Paraná forma parte de la Cuenca del Plata (Fig. 2.1), siendo esta el sistema fluvial de dimensiones geográficas y potencialidades económicas más importante de la región sur de América del Sur. Dentro de ella se reconocen cuatro sub-cuencas: del Río Uruguay, del Río Iguazú, del Río Paraguay y del Río Paraná (Zucol et al., 2004). Al sur de este último, en su Delta, se ubica el área de estudio de esta investigación.



Figura 2.1: Cuenca del Plata (Portal Cuenca del Plata - Gran Chaco).

El Delta del Paraná conforma la parte final del sistema Paraná-Paraguay. Dicho sistema abarca un área de  $2.600.000 \text{ km}^2$  aproximadamente, recorriendo 3.740 km. siendo el principal colector de la Cuenca del Plata. A comienzos de la confluencia con el Río Paraguay, en la provincia de Corrientes, el Río Paraná posee una media de caudal de unos  $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , su lecho se ensancha de los 13 km a 56 km entre Corriente - Resistencia y Rosario - Victoria. Con respecto a las márgenes del río, desde Santa Fe - Paraná a Rosario - Victoria, la margen izquierda se encuentra sobreelevada conformando una barranca, y en la margen derecha desarrolla una llanura con una intrincada red fluvial. Aguas debajo de Rosario - Victoria la situación se invierte, siendo la margen derecha una barranca bien definida y la izquierda mas llana.

El Delta del Paraná posee una superficie aproximada de 1.750.000 ha., se encuentra ubicado entre los  $32^\circ 05'$  y los  $34^\circ 29'$  S y los  $58^\circ 22'$  y  $60^\circ 45'$  O. Nace a la altura de la ciudad de Diamante (Entre Ríos). Desde el punto de vista de su dinámica hidrológica, el Delta se divide en tres regiones: el Delta superior, desde Diamante hasta Villa Constitución (provincia de Santa Fe); el Delta medio, desde Villa Constitución hasta la línea San Pedro (provincia de Buenos Aires) - Puerto Ibicuy (provincia de Entre Ríos) y el Delta inferior, desde esa línea hasta su desembocadura en el Río de la Plata. El Delta posee una gran cantidad de brazos desembocando todos en el Río de la Plata, entre los más importantes, se encuentran el Paraná Guazú que transporta dos tercios de su caudal, y el Paraná de las Palmas, que

transporta el tercio restante. Su lecho varía con distintas profundidades, su media es de 20 m aproximadamente en Puerto Constanza y Cinco Bocas, y de 15 m aproximadamente en Paraná Bravo y Paraná Mini (Prat et al., 1998).

A comienzos del siglo XX existieron crecidas excepcionales, las que han quedado en la historia por su duración y magnitud son la de los años 1904-1905 y 1982-1983. La particularidad de esta última es que permaneció 16 meses (Prat et al., 1998).

El área de estudio de la tesis, se centra dentro del Delta superior del Río Paraná, más precisamente al suroeste de la provincia de Entre Ríos, limitando con el sureste de la provincia de Santa Fe (Fig. 2.2).

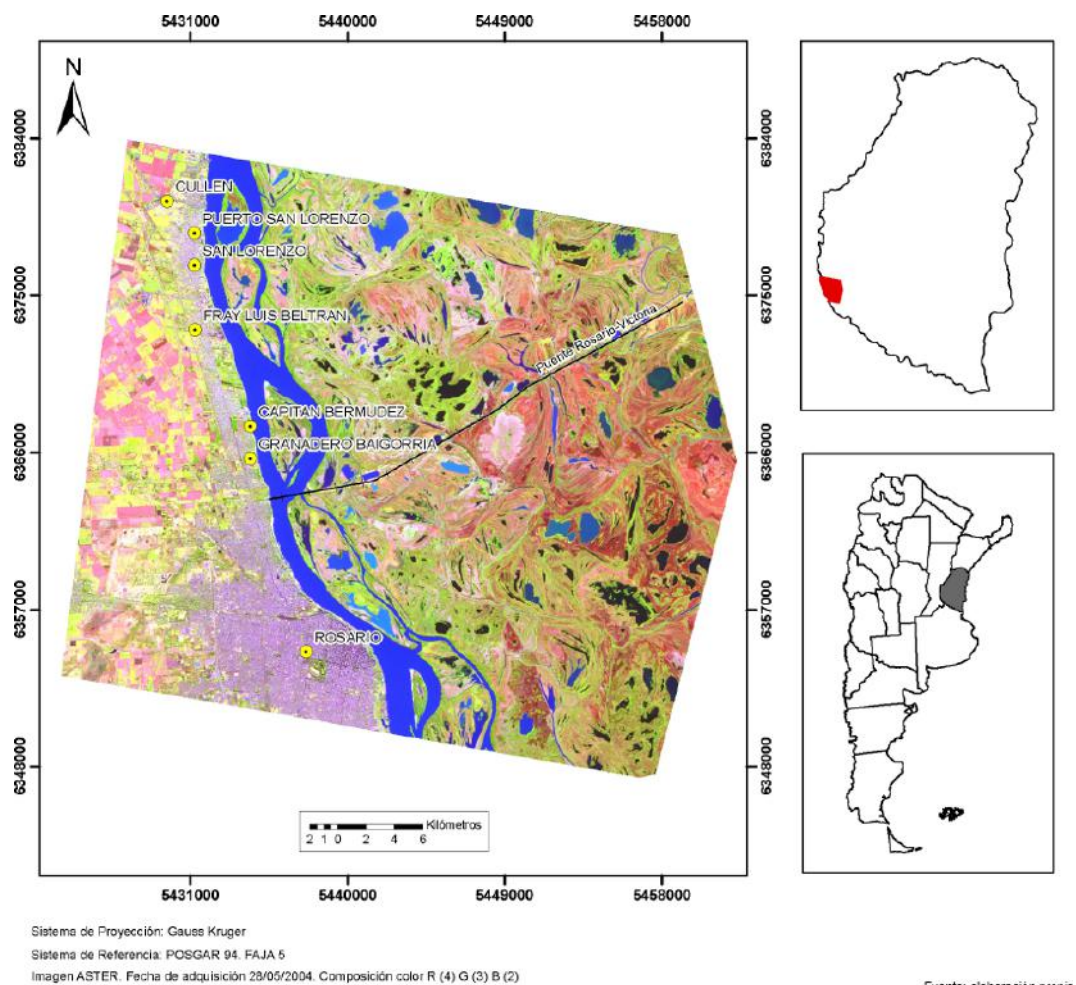


Figura 2.2: Área de estudio de la tesis.

### 2.2.1. Caracterización de la Inundación 2009/2010

Goniadzki et al. (2010) hace una descripción sobre la cuenca del Plata, donde se comenta que a fines del año 2009 la cuenca se encontraba con un déficit de precipitaciones desde mediados del 2007, tanto el aporte proveniente del Río Paraná como del Paraguay estaban muy reducidos, así como también el Río Uruguay tuvo caudales muy bajos.

El primer evento de importancia en la alta cuenca en Brasil, se produjo a mediados del mes de mayo del año 2009, cambiando a partir de allí de un escenario hídrico deficitario a uno muy húmedo. En el delta, hasta el 31 de agosto del 2009 se registraban mediciones de altura de río por debajo de la normal. Desde julio de 2007 hasta la fecha mencionada, esta bajante prolongada duró 25 meses. En el período de septiembre/diciembre de 2009, las lluvias comenzaron a tener valores normales con distribución espacial y temporal variada. En la cuenca del Río Paraná en Brasil, en donde los caudales están menos regulados por embalses, existieron las mayores lluvias. En las nacientes del río las lluvias abundantes llenaron los embalses. Las ondas de crecidas en la Alta Cuenca del Paraná comenzaron en octubre. La cuenca del Río Iguazú (de rápida respuesta a los cambios de precipitaciones) tuvo sus primeros eventos de importancia en la segunda quincena de septiembre. En octubre, una sucesión de importantes eventos acentuaron el pasaje a un escenario húmedo moderado. A fines de este año, toda la cuenca se encontraba en condiciones húmedas, desarrollándose eventos de lluvias significativos en la Alta Cuenca del Río Paraná. En diciembre, en los embalses de la alta cuenca del Río Paraná en Brasil, se comenzó a notar el efecto de las lluvias ubicadas en las nacientes, sobre las cuencas de los ríos Paranaíba y Grande, viéndose este efecto en la descarga de la presa de Itaipú.

A modo ilustrativo se presenta en la figura 2.3, los mapas de anomalías de precipitaciones en los meses más representativos elaborados por el Instituto Nacional del Agua (INA). El cálculo de la anomalía se obtiene como diferencia entre el valor acumulado durante el período correspondiente y el valor considerado normal entre los años 1961/1990.

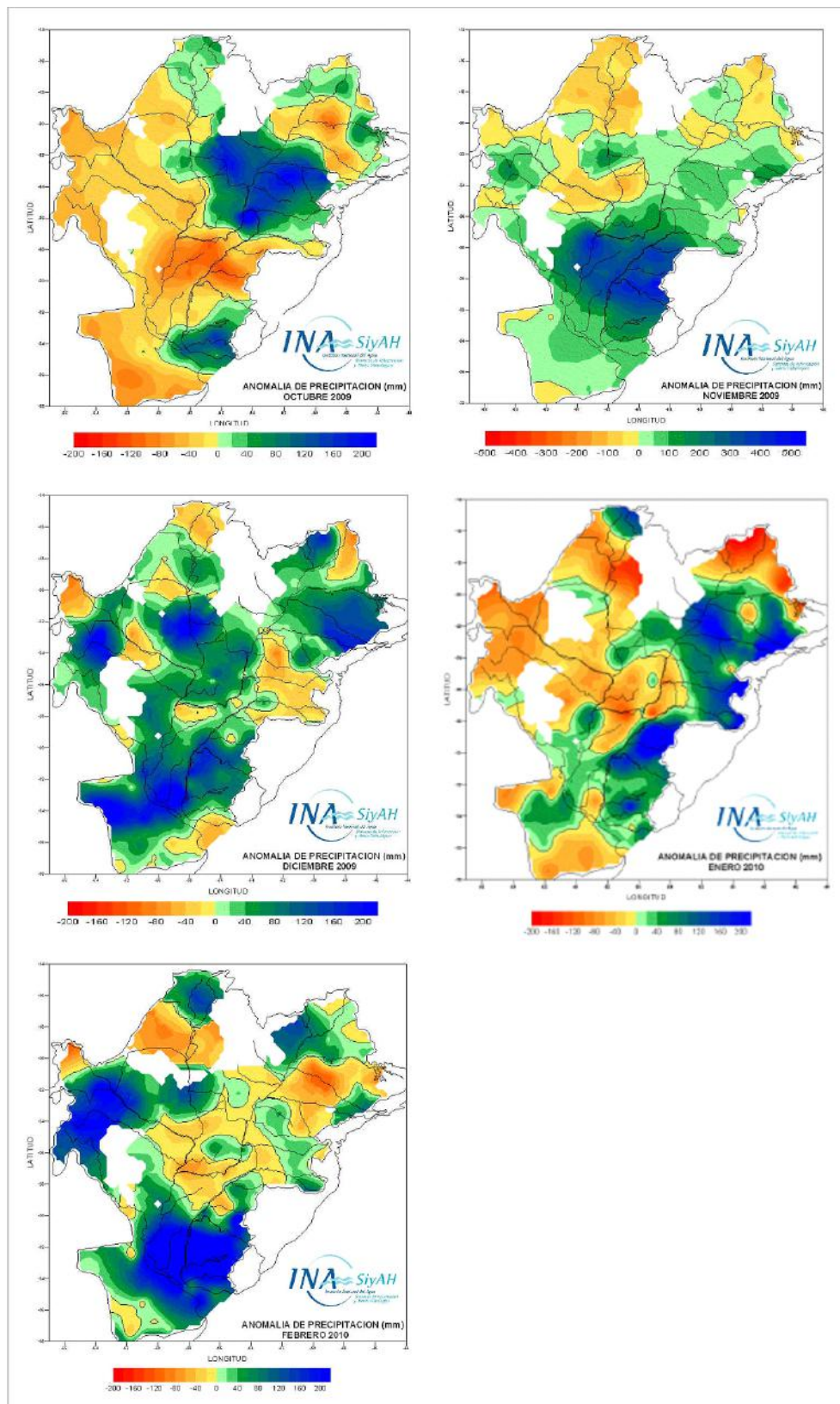


Figura 2.3: Mapas de Anomalías de lluvia. Fuente: INA.

En la tabla 2.1 se comparan los volúmenes entrantes al Delta, considerando el último cuatrimestre de los años 2006 y 2009 (condiciones previas a las inundaciones de los años 2007 y 2010), con el primer cuatrimestre de los años 2007 y 2010 (inundaciones).

Tabla 2.1: Comparación de volúmenes en Rosario. Fuente: INA.

CUATRIMESTRE			
Septiembre - Diciembre		Enero - Abril	
Año	Volumen (hm3)	Año	Volumen (hm3)
2006	113.068	2007	263.880
2009	179.124	2010	334.920

En la figura 2.4 se observa la evolución de los niveles de altura del Río Paraná medida en las estaciones hidrométricas de Rosario y Victoria para el período 2007/2010. Dichos niveles muestran los “picos” de crecidas de ambas inundaciones. Para la del año 2007, el valor máximo de altura de río en Rosario ocurrió el 3 de abril con un nivel de 541 cm, y para la del 2010 el 23 de febrero con 558 cm. Desde julio del 2007 hasta agosto del 2009 se visualizan los niveles de agua por debajo de la normal (344 cm en Rosario).

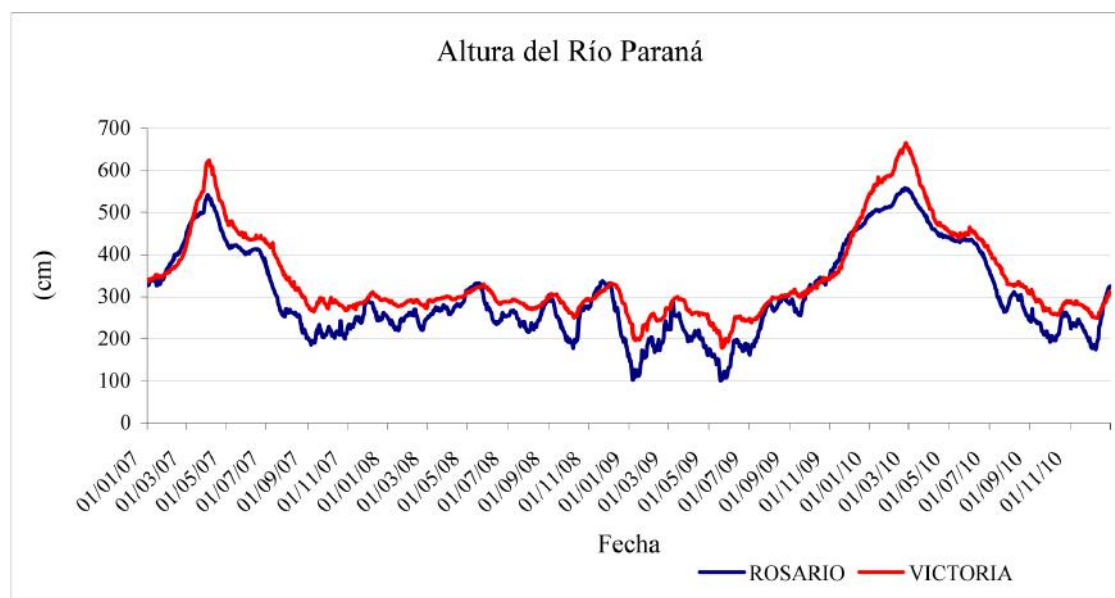


Figura 2.4: Altura del Río Paraná en Rosario y Victoria. Fuente: INA.



## **2.3. Objetivo General**

Identificar la propagación de la inundación del año 2010 a partir de la generación de cartografía hídrica superficial mediante el uso de técnicas de percepción remota.

### **2.3.1. Objetivos Específicos**

- Observar mediante información espacial la dinámica hídrica del evento de inundación.
- Analizar zonas de afectación por excesos hídricos.
- Generar información sobre el comportamiento de la banda X ante distintos tipos de coberturas.
- Demostrar la capacidad de los sensores remotos para el monitoreo de inundaciones de ríos de llanura.

## **2.4. Hipótesis**

A partir del uso de información espacial obtenida por sensores remotos es posible aportar conocimientos sobre la dinámica hídrica superficial de eventos de inundación en islas del Delta del Río Paraná.

# Capítulo 3

## Marco Conceptual

A continuación se presentan los conceptos básicos relacionados a la temática bajo estudio y a las técnicas aplicadas en la tesis.

### 3.1. Escenario del Estudio

#### 3.1.1. Inundaciones

La amenaza natural que mayor número de personas afectó en la Argentina hasta la actualidad son las inundaciones, así lo confirman los datos obtenidos de un estudio que comprende el período 1944/2003 (Tabla 3.1) realizado por el UNISDR (Estrategia Internacional para la Reducción del Desastre) siendo este organismo un punto de enlace dentro del sistema ONU para promover sinergias, y coordinación entre las diversas actividades para la reducción de desastres en los campos socioeconómico, humanitario y de desarrollo, al igual que para brindar apoyo a la integración de las diversas políticas afines (UNISDR, 2004).

Tabla 3.1: Número de personas afectadas por Inundaciones (UNISDR, 2004).

DESASTRE	FECHA	NRO. DE AFECTADOS
Inundación	may-1983	5.830.000
Inundación	23-mar-1988	4.600.000
Inundación	30-may-1985	1.000.000
Inundación	abr-1998	360.000
Inundación	ago-1983	250.000
Inundación	oct-2001	250.000
Inundación	10-oct-1967	212.000
Inundación	oct-1985	206.000
Inundación	mar-1986	204.000
Inundación	28-abr-2003	160.000

En el último siglo, graves inundaciones con importantes daños a la infraestructura y a la producción económica se han repetido, especialmente en las subcuencas del Paraná y Uruguay (UNESCO, 2011).

Existen diferentes tipos de inundaciones. Según Soldano (2007), las inundaciones se agrupan en 4 categorías: a) origen, b) origen pero en “zona de llanura”, c) medio (o tipo de ocupación, riesgo y densidad de población) y d) previsibilidad.

#### A. Clasificación según origen de las inundaciones:

- Inundaciones por precipitaciones “in situ”.
- Inundaciones por escorrentía, crecida o desbordamiento de cauces, provocada o potenciada por: precipitaciones, deshielo, obstrucción de cauces naturales, invasión de cauces y acción de las mareas.
- Inundaciones por destrucción de obra de infraestructura hidráulica.

#### B. Según origen de las inundaciones en zonas de llanura:

- Inundación por desbordamiento de curso de agua: hace referencia a las zonas de ribera que, al generarse un crecimiento de los principales cursos del río, se ven cubiertas.
- Inundaciones por anegamiento debido a las lluvias locales: se refiere a aquellos terrenos que al tener una baja capacidad de drenaje, infiltración o por ser zonas bajas o deprimidas, se cubren temporalmente de agua ante una lluvia importante.
- Inundación por anegamiento debido al afloramiento de agua subterránea: este concepto está referido a las inundaciones que se generan debido al ascenso de la capa freática como consecuencia de recurrentes lluvias prolongadas, sumado al factor de que son zonas topográficamente bajas.

## C. Clasificación según:

- Medio en el que se desarrollan
- Tipo de ocupación del espacio
- Densidad de población afectada
- Nivel de riesgo:
  - Inundaciones urbanas: son las que más impactan sobre las poblaciones (viviendas e infraestructura de servicios).
  - Inundaciones rurales: suelen afectar fundamentalmente a las actividades agropecuarias (producción y medios productivos).

## D. Desde el punto de vista de la previsibilidad (temporalidad), se pueden considerar dos grupos:

- Inundaciones por crecidas repentinas (flash flood): estas inundaciones son producidas por intensas lluvias locales en tiempo de respuesta muy corto. Se asocian a tipos de relieves abruptos, donde por lo general las inundaciones son de tipo aluvional.
- Inundaciones por crecidas lentas: estas se generan debido al aporte de cursos de agua lejos del lugar de impacto o por acumulación en zonas de llanura. Al darse el evento de inundación en un tiempo mucho más prolongado, el tiempo de previsión es mayor que el de inundaciones de tipo aluvional.

Esta tesis estudia la inundación originada por escorrentía, crecida o desbordamiento de cauces provocada y/o potenciada por precipitaciones locales. Estas inundaciones pueden afectar a zonas de ribera que, al generarse un crecimiento de los niveles en los principales cursos del río se ven cubiertas de agua, y también aquellos terrenos que al tener una baja capacidad de drenaje, infiltración o por ser zonas deprimidas, son propicios a presentar áreas anegadas, que incluyen cuerpos de agua y vegetación que puede ser cubierta temporalmente de agua ante precipitaciones importantes. Desde el punto de vista de la temporalidad, son inundaciones de crecidas lentas, generalmente generadas debido al aporte de cursos de agua lejos del lugar de impacto o por acumulación de precipitaciones en zonas de llanura. Al generarse el evento, en un período mucho más prolongado, el tiempo de previsión es mayor que al de inundaciones de tipo aluvional.

Espacialmente estas inundaciones son generadas en áreas denominadas “humedales” definidas a continuación.

### 3.1.2. Humedales

Neiff (1997) define el siguiente concepto para los grandes humedales de Sudamérica: *“Sistemas de cobertura sub-regional en los que la presencia temporal de una capa de agua de variable espesor (espacial y temporalmente) condiciona flujos biogeoquímicos propios, suelos con acentuado hidromorfismo y una biota peculiar por procesos de selección, que tiene patrones propios en su estructura y dinámica. Pueden considerarse como macrosistemas cuya complejidad crece con la variabilidad hidrosedimentológica y la extensión geográfica ocupada”*.

El sistema ribereño Paraguay-Paraná es un corredor natural de 3.400 km de largo, entre 16° y 34° de latitud sur, a través de ecosistemas muy diferentes (selva tropical lluviosa, sabanas, estepas y arbustales). En esta contribución, se postula que todos los paisajes en cada tramo del río son unidades ecológicas interconectadas por flujos horizontales de información (nutrientes, sedimentos, semillas, huevos, etc.), y que el mantenimiento de estos flujos es condición necesaria para la estabilidad del río. Se debe aclarar que, a diferencia de los sistemas terrestres y acuáticos típicos, los humedales constituyen macrosistemas de alta variabilidad espacio-tiempo.

En Sudamérica existen dos tipos de humedales de agua dulce, los pantanales o humedales anegados por lluvias locales, y las llanuras de inundación fluviales (humedales aluvionales). Los primeros son extensas áreas de suelos arenosos con expansiones de dunas fósiles y eólicas, drenaje pobremente organizado y numerosos cuerpos de agua que se separan cuando hay bajo o medio nivel de agua. En cambio, los humedales fluviales (el ambiente estudiado en esta tesis se encuadra en esta definición), presentan saturación del suelo y su drenaje en áreas inundadas está más o menos organizado, aunque es muy lento; el agua tiende a formar redes de canales anastomosados que pueden reunirse aguas abajo. Los sedimentos son predominantemente finos (arenas muy finas, limos y arcillas). Existen capas impermeables cerca de la superficie o hasta decenas de metros por debajo. Este tipo de humedal tiene como característica la predominancia de rasgos fluviales tanto antiguos como modernos: albardones, lagunas semilunares, meandros abandonados, etc.(Neiff, 1997).

Para estudiar y contextualizar la inundación del año 2010, ya definida y categorizada espacial y temporalmente, se utilizó información hidrométrica brindada por el INA y que se describe a continuación.

### 3.1.3. Información Hidrométrica

Los denominados datos hidrométricos, en todos los casos, registran niveles del pelo de agua y en muchos casos el caudal volumétrico en el curso fluvial. Estos datos nos permiten conocer el estado y dinámica de los recursos hídricos con precisión. La información hidrométrica utilizada en la tesis se recibió por parte del Instituto Nacional del Agua (INA) a través de

mediciones realizadas diariamente en Rosario (Santa Fe) y Victoria (Entre Ríos) por la Prefectura Naval Argentina en las escalas hidrométricas pertenecientes a la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Para los ceros de escala ,generalmente, se indica la cota correspondiente a la referencia MOP (Ministerio de Obras Públicas, cero del hidrómetro ubicado en el río Riachuelo), que resulta 0,558 m menor que la cota referida al cero del IGN (Instituto Geográfico Nacional), que hace referencia al nivel de aguas medias de la ciudad de Mar del Plata. Todos los datos hidrométricos utilizados en esta investigación se encuentran referidos (+ 3,59 m) al cero del MOP (Fig. 3.1). El INA posee una Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico siendo su objetivo prever con la mayor anticipación posibles situaciones de riesgo de inundaciones o bajantes pronunciadas. Dicha Dirección, entre otras cosas, utiliza información satelital para el monitoreo hídrico, el seguimiento del agua superficial y sub-superficial en inundaciones y para la evaluación del riesgo potencial de la inundación (Instituto Nacional del Agua, 2011).

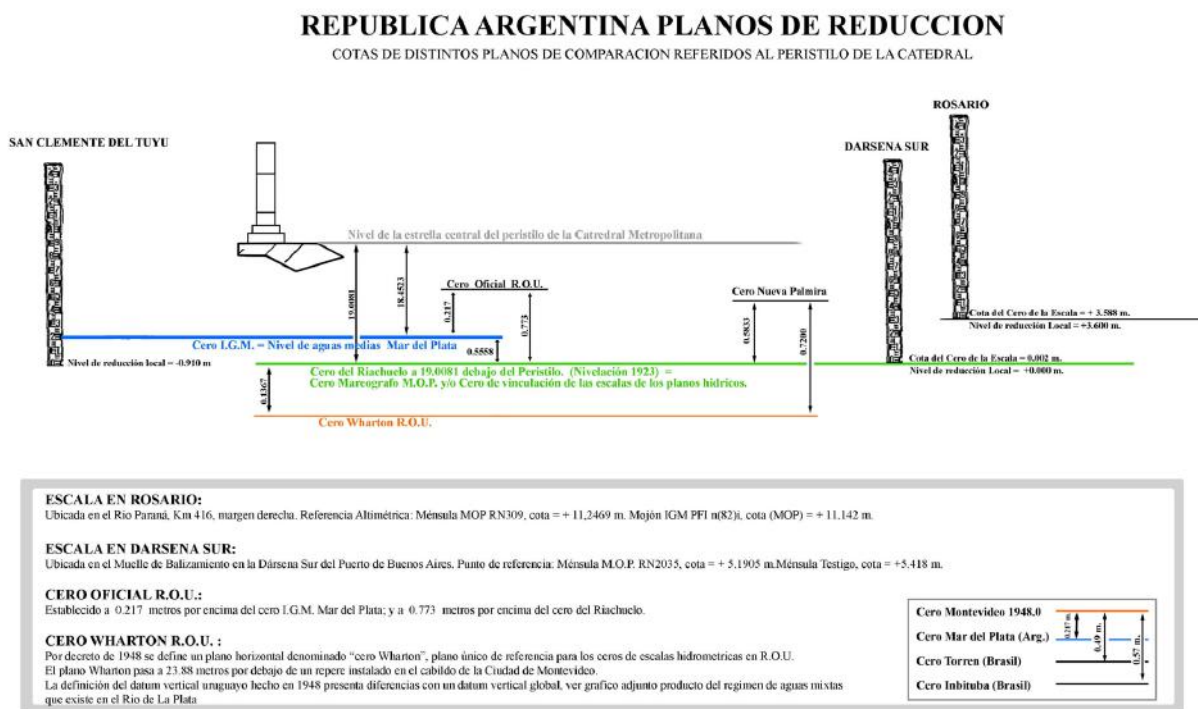


Figura 3.1: Cotas de distintos planos referidos al peristilo de la catedral metropolitana (SSPYVN, 2008).

### 3.2. Teledetección

La teledetección es una técnica que emplea la energía electromagnética, tal como la luz, el calor y las ondas de radio como medio para la detección y medición de las características de

un objeto en la superficie, sin que haya contacto físico con el sensor. Permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas satelitales o aéreas. Se asume que existe entre el suelo y la radiación electromagnética, interacciones medidas y/o emitida por el sensor (Sabins, 2000).

Cualquier sistema de teledetección posee tres elementos fundamentales: el sensor, el objeto observado y un flujo energético que relaciona a ambos. El flujo de energía suministrado por el objeto puede ser debido a la reflexión de la luz solar, algún tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. De este modo existen tres maneras de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (Chuvieco, 1996).

La interrelación entre la materia y la energía electromagnética, es determinada por las propiedades físicas de la materia y las longitudes de onda de la energía detectada de forma remota. Toda la materia irradia energía electromagnética de diferentes intensidades pudiendo ser adquirida por un sensor remoto. El sol ilumina la superficie terrestre que refleja energía dependiendo del tipo de cobertura presente sobre ella. Esta energía reflejada, es obtenida por el sensor codificándola a través de pulsos eléctricos para luego ser almacenada y transmitida a las estaciones receptoras. Se debe aclarar que, entre la superficie terrestre y el sensor, se encuentra la atmósfera que dispersa y absorbe parte de la señal "original". Mas allá de esto, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la enviada por el sensor que fuera capaz de generar su propio flujo energético y recoger posteriormente su reflexión. Para la primera, se utilizan los sensores denominados pasivos (capítulo 3.2.3), y para la última, los denominados activos (capítulo 3.2.4). Para los dos casos de obtención de energía, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor, conforma un sistema de captación de energía electromagnética (Fig. 3.2) (Chuvieco, 1996).

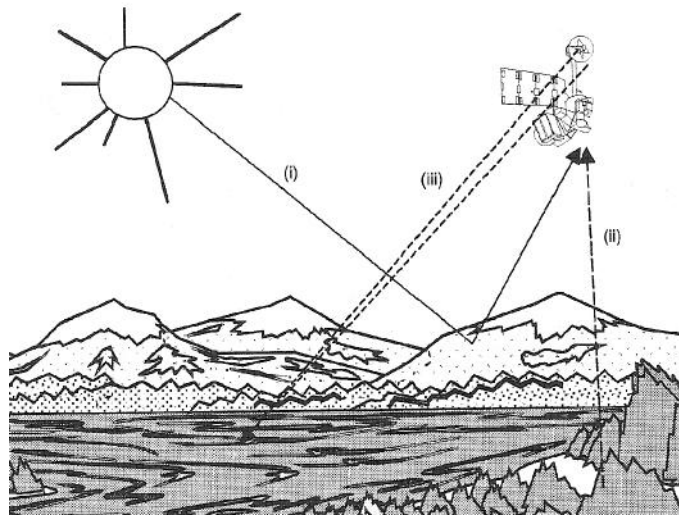


Figura 3.2: Formas de teledetección: (i) reflexión; (ii) emisión; (iii) reflexión-emisión (Chuvieco, 1996).

Un sistema de teledetección está compuesto por:

- Fuente de energía, que es el origen de la radiación electromagnética, que puede ser una fuente externa (teledetección pasiva) o una fuente interna que emite su propio haz de luz energético (teledetección activa).
- Cubierta terrestre, como masas de vegetación, suelos, agua, infraestructura humana, que reciben radiación energética, reflejándola o emitiéndola de acuerdo a sus características físicas.
- Sensor y plataforma soporte. Dicho sensor capta la energía procedente de las cubiertas, la decodifica y la guarda o la envía al sistema de recepción.
- Sistema de recepción y distribución.
- Experto encargado de agregar valor a la información (generación de mapas temáticos).

Como principio fundamental de la teledetección, es necesario conocer el comportamiento de la radiación electromagnética. Este tipo de energía constituye la base de los sistemas de teledetección explicados brevemente a continuación.

### 3.2.1. El Espectro Electromagnético

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, se han establecido una cantidad de bandas en donde la radiación electromagnética se comporta de forma similar. A esta serie de bandas se las denomina espectro electromagnético (Fig. 3.3).



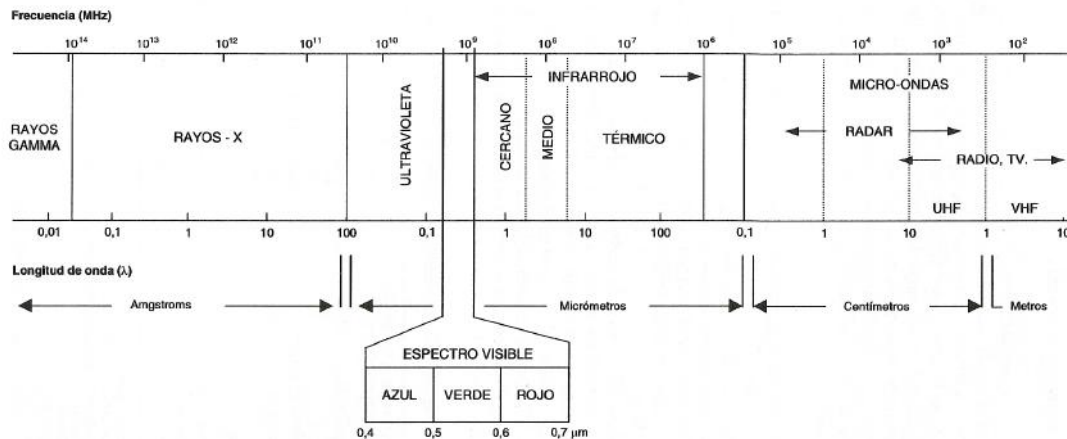


Figura 3.3: Espectro electromagnético (Chuvieco, 2008).

- Espectro Visible (0,4 a 0,7  $\mu m$ ): es la única banda electromagnética que puede ser visualizada por el ojo humano. Dentro de esta región se encuentra el azul (0,4 a 0,5  $\mu m$ ); el verde (0,5 a 0,6  $\mu m$ ) y el rojo (0,6 a 0,7  $\mu m$ ).
- Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu m$ ): Es importante por su capacidad de discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu m$ ): En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie de la tierra. En dicha banda se sitúan otras dos, la infrarrojo de onda corta (1,3 a 3  $\mu m$ ), útil para estimar el contenido de humedad en la vegetación y los suelos, y la cercana a los 3,7  $\mu m$  conocida como la infrarrojo medio, imprescindible para la detección de focos de alta temperatura (incendios, volcanes activos, etc.).
- Infrarrojo lejano o térmico: varía entre los 8 y 14  $\mu m$  sirviendo para detectar el calor emitido por la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Microondas: superior a 1  $mm$ , este tipo de energía es bastante transparente a la cobertura nubosa. En la tabla 3.2 se observan las distintas bandas en las que trabajan en la actualidad los sensores de radar de apertura sintética.

Tabla 3.2: Bandas espectrales en el rango de las microondas.

BANDAS	RANGO DE LONGITUD DE ONDA $\lambda$ [cm]
Ka	0,75 - 1,10
K	1,10 - 1,67
Ku	1,67 - 2,40
X	2,40 - 3,75
C	3,75 - 7,5
S	7,5 - 15
L	15 - 30
P	30 - 100

### 3.2.2. Características Básicas de los Sensores Remotos

La resolución de un sistema sensor hace referencia a su “habilidad” para discriminar información (Fig. 3.4).

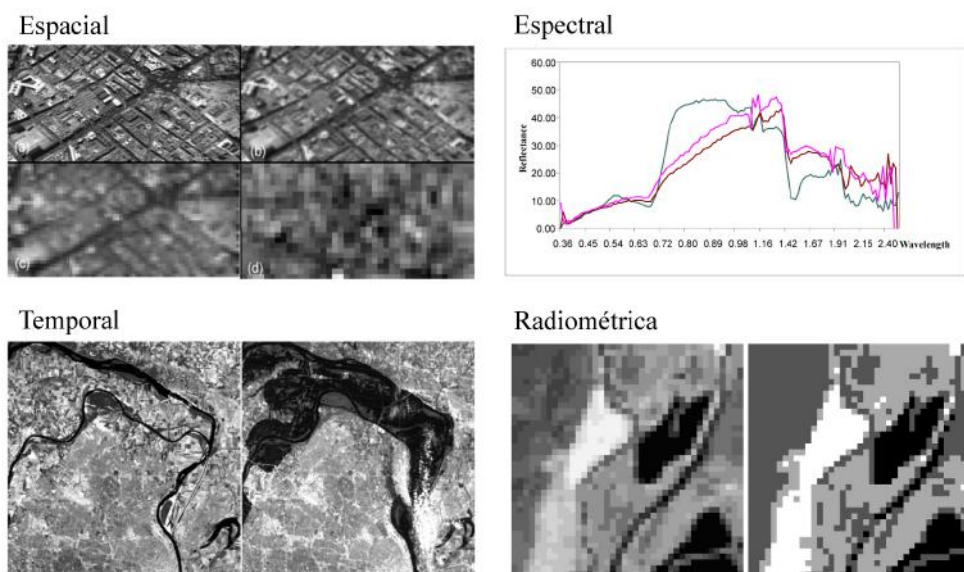


Figura 3.4: Tipos de resoluciones de un sistema sensor (Chuvieco, 2006).

#### 3.2.2.1. Resolución Angular

Hace mención a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos (Diner et al. (1999) en Chuvieco (2008)). La resolución angular depende de la longitud

de onda en la que trabaja el sistema y la apertura del sistema.

### 3.2.2.2. Resolución Espacial

La resolución espacial hace referencia a la identificación del objeto más pequeño sobre la imagen, remarcando el nivel de detalle que ofrece la misma (Fig. 3.5). Se pueden identificar los objetos que superen el tamaño del píxel. Para los sensores ópticos la resolución espacial depende de la distancia al objeto, la apertura y longitud de onda del sistema.

$$\Delta x = \frac{\lambda}{L} \cdot D \quad (3.1)$$

donde:

$\lambda$  = longitud de onda

L = apertura focal

D = distancia al objeto



Figura 3.5: Diferenciación de distintas coberturas terrestres según su resolución espacial. Imagen Landsat 5 TM (píxel de 30 m) vs QuickBird (píxel de 1 m).

Los sensores de sistemas radar dependen del tamaño de la antena, la altura de la plataforma y el ángulo de incidencia (similar al óptico). Para los sistemas activos coherentes (capítulo 3.2.4) la resolución espacial tiene dos dimensiones: rango y acimut, cada una de las cuales depende del procesamiento de la señal. El primero está definido por la dirección de transmisión

y el segundo por la dirección del movimiento del satélite. La combinación de ellos define el área iluminada por el radar. La resolución espacial esta ligada con la escala de trabajo y su interpretación.

### 3.2.2.3. Resolución Espectral

La resolución espectral indica el número de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La información multispectral cobra un gran interés ya que detecta en distintas bandas el comportamiento de los objetos presentes en la superficie. Cuantas más bandas espectrales proporcione el sensor, las coberturas podrán ser caracterizadas espectralmente mejor, en la figura 3.6 se observa el comportamiento espectral de la reflectividad (en %) de las coberturas típicas, definida como la relación entre la energía reflejada y la incidente. Si las bandas son estrechas, la señal obtenida será coherente al espectro. Si las bandas son más amplias, se registrará un valor promedio que puede encubrir las diferencias espectrales entre distintas coberturas. Cabe destacar que, entre los sensores remotos, los de radar y los sistemas fotográficos son los de menor resolución espectral.

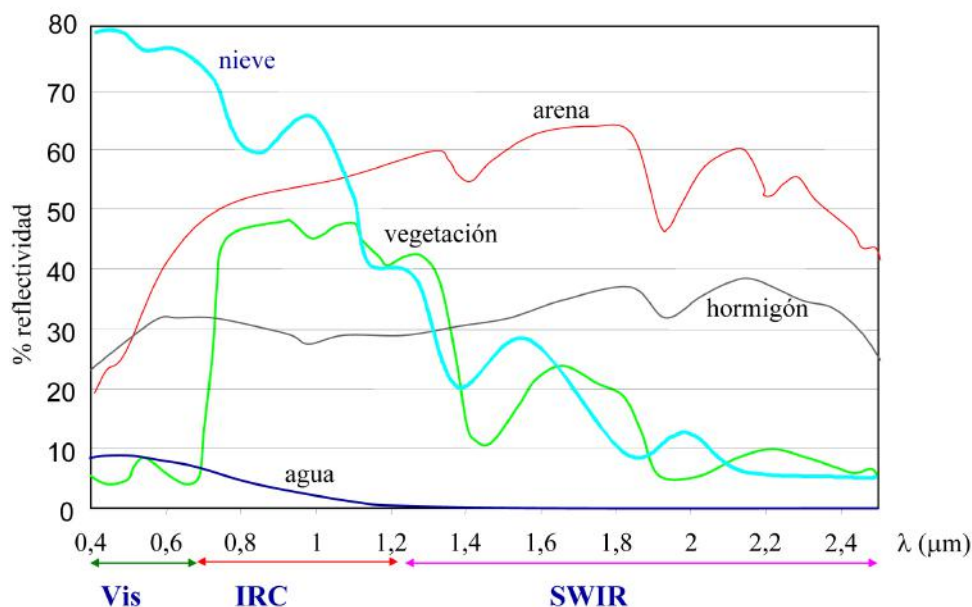


Figura 3.6: Firmas espectrales de coberturas típicas (Chuvieco, 2006)

### 3.2.2.4. Resolución Radiométrica

La resolución radiométrica hace mención a la sensibilidad del sensor para detectar variaciones de radiancia espectral. Para los sistemas digitales la imagen se codifica en sistema

binario. La resolución radiométrica suele identificarse con el número de bits que necesita cada valor numérico para almacenarse, por ejemplo, el sensor ETM del Landsat 7 posee una resolución radiométrica de 8 bits ( $2^8 = 256$  niveles de grises). Resulta muy importante este tipo de resolución para la interpretación de imágenes en análisis digital. Es importante resaltar que el número de niveles de gris que puede discriminar el ojo humano, no supera los 64 y las tonalidades de color las 200.000 (Chuvieco, 1996).

### 3.2.2.5. Resolución Temporal

Se refiere a la frecuencia de cobertura de una misma porción de la superficie por el sensor. Esta frecuencia depende de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), el diseño del sensor y el tamaño de la imagen (ángulo total de abertura). Por ejemplo, el satélite Landsat 5 gira alrededor de la tierra 14 veces al día, teniendo una revisita del mismo sitio cada 16 días.

### 3.2.3. Sistema Pasivo

Este tipo de sistema utiliza sensores que se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las coberturas terrestres, sea reflejada por los rayos solares o emitida por su temperatura. Existen diferentes tipos de sensores: fotográficos, óptico-electrónico y de antena. Entre los sensores ópticos históricos se encuentran los de la misión Landsat, SPOT siendo el primer satélite comercial, el TERRA, el IKONOS y el SAC-C. Unas de las mayores limitaciones de los sistemas pasivos para obtener información de las coberturas terrestres, es la necesidad de contar con una fuente de iluminación externa (sol) en ausencia de coberturas de nubes. Aunque existen cámaras que pueden adquirir información de noche, como por ejemplo la HSTC a bordo satélite SAC-C, la AVHRR a bordo de los NOAA, etc., su utilidad es más limitada.

Una de las técnicas más utilizadas para discriminar coberturas terrestres mediante información espacial pasiva, son los índices de diferencia normalizada explicados en la próxima sección.

#### 3.2.3.1. Índices de Diferencia Normalizada

Los índices de diferencia normalizada pueden ser utilizados para discriminar una determinada cobertura de interés. Son operaciones algebraicas entre bandas espectrales y su valor generalmente oscila entre -1 y 1. Los índices NDVI, NDSI y NDWI, utilizan información obtenida por los sensores pasivos. Estos índices se conforman a partir de los contrastes espectrales de las coberturas típicas. El NDVI utiliza el contraste espectral de la vegetación entre las bandas

del rojo e infrarrojo cercano, el NDSI el contraste espectral del suelo situado entre el infrarrojo cercano y el medio, y el NDWI, el contraste espectral del agua utilizando la región del visible e infrarrojo medio. En la figura 3.6 explicada anteriormente, se observan dichos contrastes.

#### **3.2.3.1.1. NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)**

Índice generado a partir de los valores de las bandas situadas en el rango espectral del rojo (0,6 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo cercano (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ). Valores altos del índice corresponden a las áreas con vegetación vigorosa debido a su alta reflectividad en el infrarrojo cercano y su baja reflectividad en el rojo visible. Los valores negativos se encuentran asociados a coberturas como agua, nubes y nieve debido a que poseen mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo. Valores cercanos a 0 (cero) pueden corresponder a suelo desnudo y áreas rocosas, ya que dichas coberturas poseen reflectancias similares en la región de rojo visible e el infrarrojo cercano.

#### **3.2.3.1.2. NDSI (Índice de Suelo de Diferencia Normalizada)**

Índice generado entre el contraste de la banda espectral del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio, destacándose el contenido de humedad en las plantas. Valores bajos del índice indican áreas densas de vegetación o vegetación vigorosa, valores medios se asocian a coberturas de vegetación más dispersa con influencias de suelos, y valores altos indican dominancia de suelos.

#### **3.2.3.1.3. NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada)**

El índice considera que el comportamiento del agua puede presentar una mayor reflectividad en la banda verde (visible) y baja reflectividad en las bandas del infrarrojo medio. Análisis radiométricos de agua con distintos niveles de turbidez, indican que valores altos del índice (mayores a 0,6) representan coberturas de agua (Bustamante et al., 2005).

Estos índices, como ya se mencionó anteriormente, son generados mediante el uso de información adquirida por sensores pasivos. En la próxima sección se describe el funcionamiento de otro tipo de sensor denominado activo.

### **3.2.4. Sistema Activo - SAR**

Cerca del año 1950, Carl A. Wiley observó por primera vez que con un radar de visión lateral era posible mejorar la resolución en acimut, mediante la utilización de la propagación del efecto doppler (aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador) de la señal de eco (retorno). Esta observación, significó el nacimiento de la tecnología denominada Radar de Apertura Sintética (SAR). Aunque gran

parte de los primeros trabajos fueron dirigidos hacia aplicaciones militares como la detección y seguimiento de objetivos móviles, el potencial para la utilización de este instrumento como un sensor de imagen para aplicaciones científica fue ampliamente reconocido (Curlander & Mc Donough, 1991).

Los sistemas de radar pueden ser agrupados en generadores y no generadores de imágenes (escaterómetro, espectrómetro, etc.)(Ulaby et al., 1981a). La figura 3.7 muestra los componentes básicos del sistema radar generadores de imágenes. Los radares llamados RAR (Radar de Apertura Real) tienen baja resolución espacial ya que su resolución depende del tamaño de la antena y resulta prácticamente imposible poner una gran antena en órbita. Para mejorar dicha resolución, se encontró una forma de simular el tamaño de una antena grande, esto se hizo aprovechando el movimiento del satélite y técnicas avanzadas de procesamiento. Se genera un pulso con un retardo controlándose la emisión de energía a partir del transmisor, sincronizando la señal que regresa a la antena (Sabins, 2000).

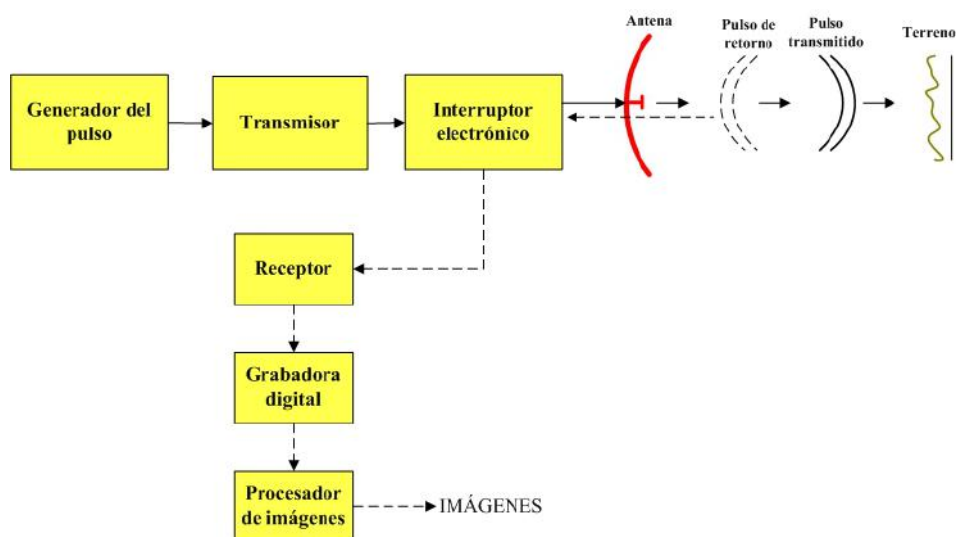


Figura 3.7: Resumen del funcionamiento de un SAR (Sabins, 2000).

Los SAR se desplazan a una velocidad y a una altura determinada sobre la tierra, la radiación electromagnética emitida ilumina (footprint) una zona del terreno, la cual presenta una forma elíptica, al desplazarse la plataforma se “barre” una zona del terreno paralela a su trayectoria. La dirección de avance del barrido es denominado acimut y la dirección perpendicular a la de avance es llamada rango (Fig. 3.8).

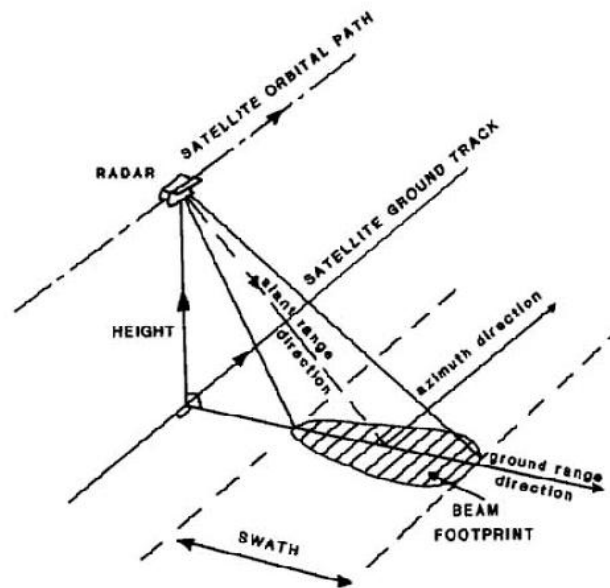


Figura 3.8: Geometría de un SAR (Curlander & Mc Donough, 1991).

Como se mencionó anteriormente, el satélite viaja a una velocidad determinada que depende del sistema y de la geometría y rotación de la tierra, emite un haz a la velocidad de la luz y recibe su respuesta (eco). La diferencia de tiempo de este mecanismo difiere en varios órdenes de magnitud, y se los puede considerar independientes unos de otros. Los ecos se ordenan uno al lado del otro generando una representación en dos dimensiones de la señal recibida en rango (tiempo rápido) y en acimut (tiempo lento). Para que esta información se encuentre referenciada a un lugar específico de la superficie medida, es necesario su enfoque. Las imágenes sin enfoque son difícil de interpretar, en cambio, en las enfocadas es posible reconocer algunos rasgos de la superficie (presentando un moteado denominado speckle). Dicho enfoque se realiza a partir de cálculos matemáticos de los datos, adjudicando el pulso recibido a coordenadas en rango y en acimut con una resolución espacial mejorada. De esta manera, los valores de amplitud y de fase correspondientes a la respuesta promedio de cada celda iluminada, forman una matriz de números complejos, en donde los índices de las columnas corresponden a las coordenada en rango oblicuo, mientras que los de las filas corresponden a las coordenadas en acimut. La parte real del número complejo es la amplitud de la señal, mientras que la parte imaginaria contiene información sobre la fase. La matriz inicial para realizar el enfoque es denominada imagen RAW o cruda (Lopinto, 2010).

Los SAR pueden adquirir imágenes sin importar si es de día o de noche, y en todas las condiciones climáticas. Trabajan en una banda situada entre 0,1 cm y 1 m. El píxel en una imagen de radar representa el coeficiente de retrodispersión del área del terreno (Chuvieco, 2008).



Para el funcionamiento de estos sensores, no es necesaria la presencia del sol para el proceso de imágenes, aunque puede afectar a las características de la retrodispersión. Las frecuencias en las que funciona el radar pueden ser seleccionadas de modo que su absorción (atenuación) por las moléculas de la atmósfera (oxígeno o vapor de agua) sea pequeña. En la figura 3.9 se observa la absorción de las bandas en términos de porcentaje de transmisión atmosférica en función de la longitud de onda, obsérvese también que la región entre los 3 y 30 cm se aprovecha el 100 % de la transmitancia (Curlander & Mc Donough, 1991).

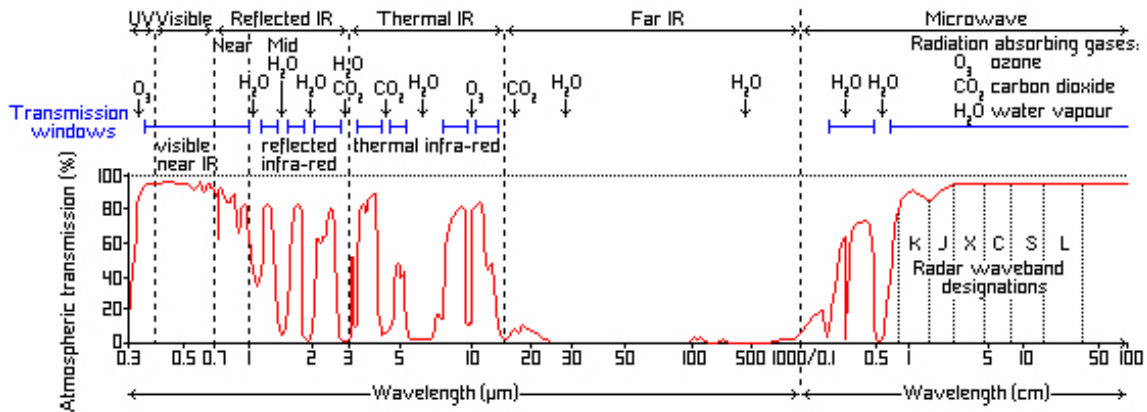


Figura 3.9: Porcentaje de transmisión de la atmósfera para una porción del espectro electromagnético (UNESCO, 2011).

El instrumento SAR al transmitir una señal y medir la señal dispersada por el blanco, mide variables como la intensidad (potencia) y la fase de la señal retrodispersada. La fase puede ser utilizada en aplicaciones de interferometría y la intensidad expresa la magnitud de la señal retrodispersada. La intensidad de la señal (backscatter), depende de las propiedades del haz transmitido: potencia, frecuencia, polarización y ángulo de incidencia. Y de las propiedades que re-irradia (objeto iluminado): superficie, área que dispersa y sus propiedades dieléctricas.

$$\sigma = \frac{P_r(4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2} \quad (3.2)$$

La intensidad de la energía retrodispersada puede ser expresada como el promedio de los valores de la energía retrodispersada de la sección eficaz por unidad de área, la cual es llamada coeficiente de retrodispersión (backscattering) (Ulaby et al., 1981b).

$$\sigma^\circ = \frac{\Sigma \sigma_i}{A} \quad (3.3)$$

Donde:

$P_r$  = potencia recibida

$P_t$  = potencia transmitida

G = ganancia de la antena

$\lambda$  = longitud de onda

R = distancia entre el radar y el blanco

$\sigma$  = sección eficaz del blanco para el radar por unidad de área ( $m^2$ )

$\sigma^\circ$  = sección eficaz del blanco para el radar (sin unidades)

$\Sigma_{\sigma_i}$  = suma de las secciones eficaces individuales

A= área del blanco

La sección eficaz del blanco ( $\sigma^\circ$ ) para el radar es el factor que relaciona la fuente de iluminación con la superficie (es equivalente al concepto de reflectancia en el óptico) y posee información sobre las características dieléctricas de la superficie. El coeficiente de retrodispersión puede ser representado en distintas unidades como: potencia ( $\sigma^\circ$ ), amplitud ( $\sigma_A^\circ$ ) y decibeles ( $\sigma_{dB}^\circ$ ) (Fig. 3.10).

Potencia	$\sigma^\circ$	Amplitud	$\sigma_A^\circ$	Decibeles	$\sigma_{dB}^\circ$
	$\sigma^\circ$		$\sqrt{\sigma^\circ}$		$10 * \log \sigma^\circ$

Figura 3.10: Representación del coeficiente de retrodispersión.(Laur et al., 2004)

La potencia es el flujo promedio por unidad de tiempo que recibe la antena y está relacionada con el coeficiente de retrodispersión  $\sigma^\circ$ . La potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda (A) y siendo la raíz cuadrada de la potencia la amplitud. El  $\sigma^\circ$  puede ser representado también de manera logarítmica a través de los decibeles. En la figura 3.11 se observan las distribuciones del coeficiente de retrodispersión para una imagen SAR dependiendo de la magnitud medida (potencia, amplitud o decibeles). La distribución gaussiana generada por la función logarítmica, debido al contraste entre sus valores, obtiene la mejor separabilidad y visualización de los valores retrodispersados.

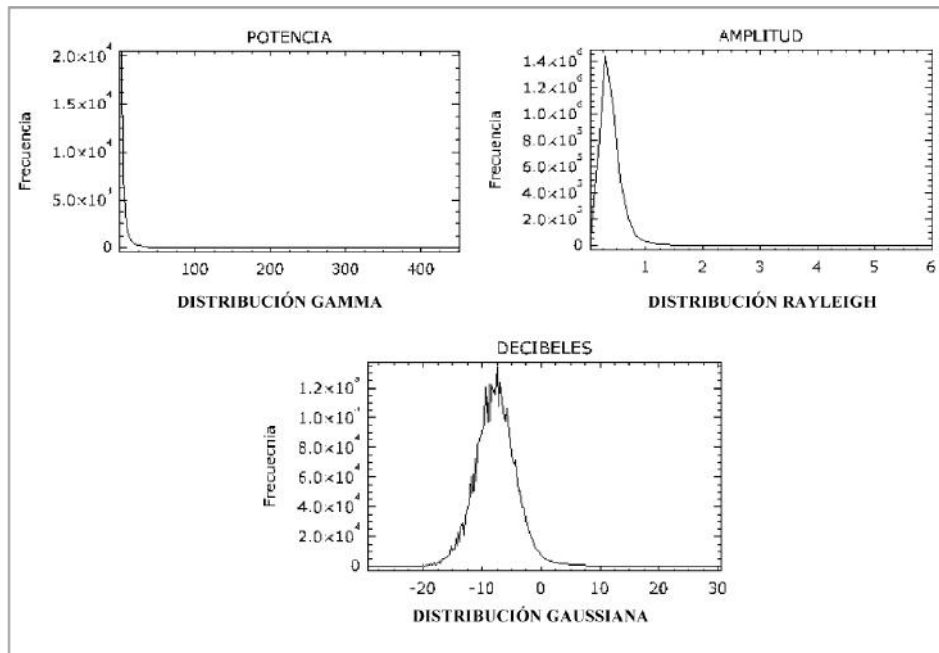


Figura 3.11: Distribuciones del coeficiente de retrodispersión medido en distintas magnitudes.

Los SAR pueden transmitir y recibir la señal de diferentes maneras, a continuación se explican los conceptos básicos.

### 3.2.4.1. Polarización de la Señal

La señal transmitida puede ser polarizada (vibración) en el plano vertical y horizontal. El pulso regresa de la superficie con menor energía generalmente teniendo la misma polarización con la que se envió. Esta energía es guardada como polarización paralela denominadas HH (transmisión horizontal - recepción horizontal) o VV (transmisión vertical - recepción vertical). Una porción de la energía emitida ha sido depolarizada por la superficie, los mecanismos responsables que depolarizan la señal no se conocen en su totalidad, pero existen teorías atribuibles a múltiples reflexiones causadas por la superficie. Estas teorías son reforzadas por el hecho de que los efectos de depolarización de la vegetación y el suelo desnudo son muy marcados, aunque no lo hacen de la misma manera. Las hojas y las ramas por reflexiones múltiples son responsables de la depolarización. Algunos sistemas poseen un segundo modo recibiendo al pulso eléctrico rotado a un ángulo recto del transmitido. El resultado de este tipo de modo es llamado polarización cruzada HV o VH (Fig. 3.12).

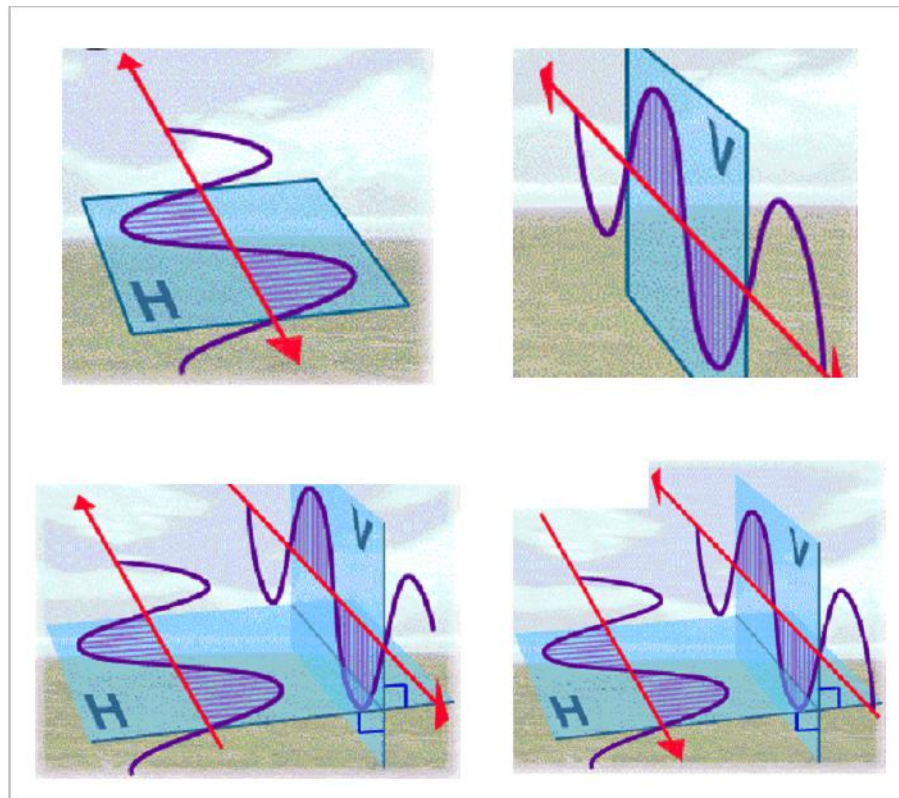


Figura 3.12: Polarización simple vs. Polarización múltiple (Lopez-Martinez et al., 2005).

Para la identificación de cuerpos de agua en regiones deltaicas es conveniente utilizar la polarización HH, en zonas donde el agua haya cubierto todo tipo de vegetación. Dicha polarización, genera el fenómeno de reflexión especular siendo menos sensible a la rugosidad del agua originada posiblemente por el viento.

#### 3.2.4.2. Mecanismos de Interacción

La señal retrodispersada, entre otras cosas, depende de los posibles mecanismos de interacción que se encuentran dados por la densidad del medio, la geometría de los elementos dispersores y las propiedades dieléctricas de los elementos. En la figura 3.13 se observan algunas posibles interacciones entre la radiación electromagnética y la superficie medida.

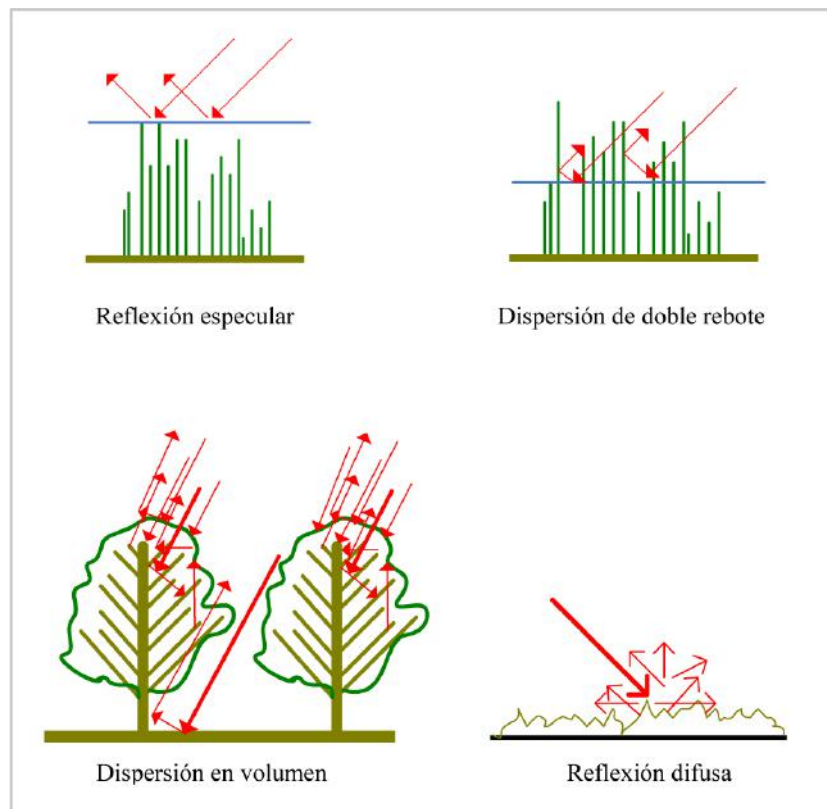


Figura 3.13: Distintos tipos de reflexión según las condiciones del medio.

Los valores de retrodispersión bajos, generalmente asociados a los cuerpos de agua, se deben al mecanismo de interacción de reflexión especular, dicho mecanismo aumenta el contraste con las coberturas vecinas, el mismo se incrementa en imágenes obtenidas a ángulos de incidencia rasantes (por ejemplo a  $40^\circ$ ).

Los objetos medidos por el SAR son vistos en varias perspectivas, obteniendo de ellos diferentes intensidades de pulsos. Independientemente de la reflectividad de las muestras, se pueden obtener porciones (looks) de la frecuencia transmitida por la superficie para lograr porciones de frecuencias no superpuestas que aseguran la independencia de las muestras a partir del espectro tomado por lo general, en dirección acimut.

### 3.2.4.3. Ruido y Número Equivalente de Looks (ENL)

El término de ruido “speckle” se refiere a una señal intrínseca en los datos SAR, y que por su apariencia de granulado es denominado ruido speckle o “sal y pimienta” debido a la secuencia aleatoria de píxeles blancos y negros. Dicho ruido está físicamente ligado a la naturaleza coherente del sensor SAR que:

1. Adquiere la escena al almacenar la información de fase derivada del cambio del acimut

de la distancia del sensor al objeto.

- Adquiere la escena constituida por un gran número de objetivos.

En los SAR, a medida que se van moviendo en su órbita, su antena transmite pulsos muy rápidamente obteniendo muchas respuestas del blanco (alrededor de 1000 respuestas de un objeto), sus procesadores utilizan entre otras cosas, todas estas respuestas para obtener la sección eficaz del radar, pero la señal medida contiene speckle. Éste, puede generarse por la suma coherente de varias respuestas (centros dispersores presentes en un píxel) que se suman de manera aleatoria. Debido a que los objetos reflectores se encuentran en una superficie irregular, los rayos emitidos por el radar regresan al sensor habiendo recorrido distintas distancias y acumulando diferencias de fase. Dependiendo de estas diferencias, las ondas interferirán constructiva, parcial o destructivamente (Figs. 3.14, 3.15 y 3.16).

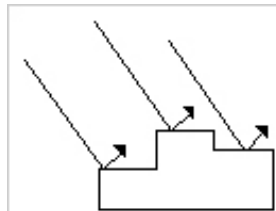


Figura 3.14: Simulación de dispersores irregulares.

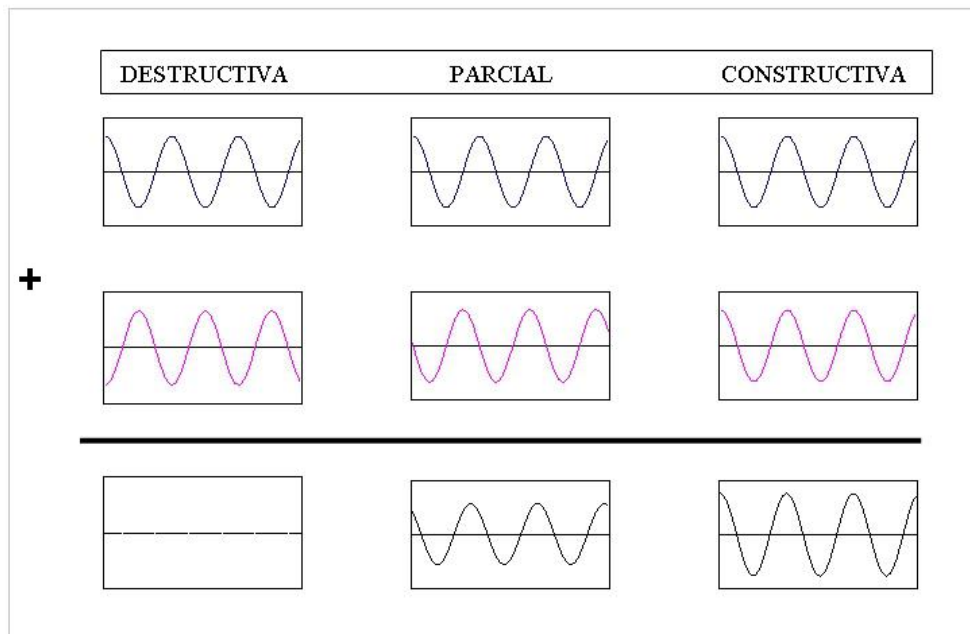


Figura 3.15: Interferencias de fase de ondas.

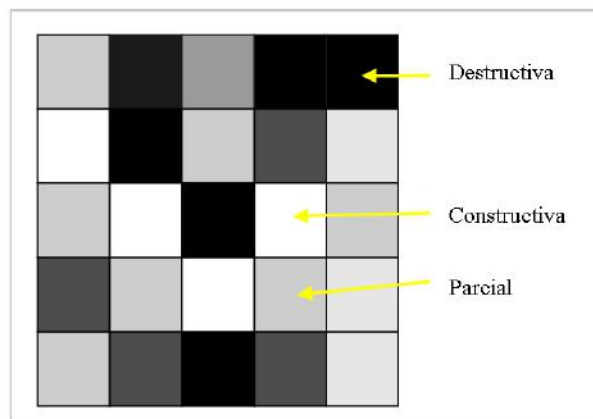


Figura 3.16: Interferencias de fase de ondas en una imagen.

Las imágenes producidas por un SAR pueden ser de un look con datos complejos (Single Look Complex, SLC) o de varios looks y datos reales. Estos últimos consisten en la amplitud de los datos complejos correspondientes con su cuadrado. A los SLC se los denomina datos de amplitud, y a los otros datos de intensidad (Salvia, 2010).

Para los datos SAR,  $L$  mediciones independientes de la intensidad de la señal pueden ser obtenidas conociendo el tiempo de integración en acimut de la zona que ilumina el objetivo, y el ángulo entre la velocidad del sensor - objetivo y los cambios de rango de inclinación. Por lo tanto, en cada momento perteneciente al tiempo de integración, el objetivo es visto bajo perspectivas diferentes, reflejándose esto también en el eco mediante diferentes intensidades. Desde el enlace lineal entre la frecuencia doppler, y el tiempo lento (dirección en acimut), es posible obtener muestras independientes extrayendo  $L$  porciones (sin superposición de frecuencias con el fin de garantizar la independencia de estas muestras) de todo el espectro de la señal en acimut. A la relación entre la frecuencia y el ángulo de dichas porciones de bandas se las llama look. Uno de los métodos de reducción de speckle, se basa en el promedio incoherente de la señal en acimut del SAR contenida en  $L$  looks, este método es llamado multilooking (Fig. 3.17) (Lopinto, 2010).

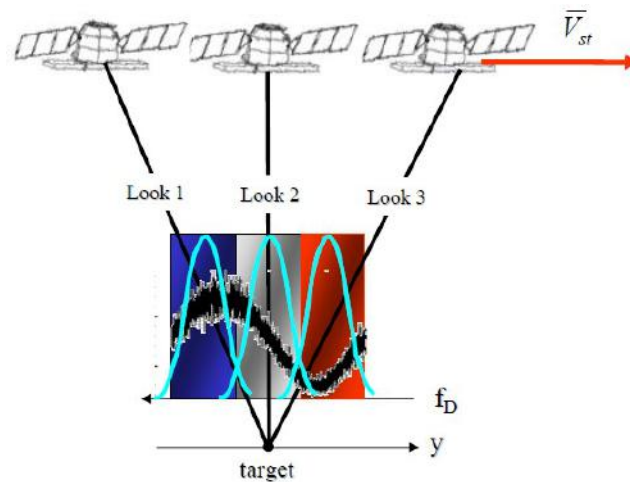


Figura 3.17: Generación de looks de un mismo objeto (Lopinto, 2010).

Para las imágenes SLC la relación señal-ruido (SNR) suele ser baja, dificultando su análisis. El SNR puede ser definido como el margen que existe entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la altera. El ruido speckle reduce la capacidad de distinguir bordes, segmentar la imagen, reconocer y clasificar blancos, generando incerteza en los valores del coeficiente de retrodispersión medidos y en consecuencia en la inversión de parámetros biofísicos. Debido a esto, es necesario reducirlo para por ejemplo, aplicaciones geológicas (lineamientos de fallas geológicas), hidrología (detección de cuerpos de agua), forestales (clasificación de distintas coberturas vegetales), etc. En una zona homogénea se esperaría un valor constante de retrodispersión, pero el resultado es un efecto de moteado (ruido). Una de las técnicas para mejorar esta relación e incrementarla, es mediante el llamado proceso de multilooking. Este proceso básicamente consiste en generar varias vistas (looks) a partir de la información “cruda”, se procesa y recombina porciones por separado de la apertura del radar produciendo una imagen de mejor apariencia. Otra técnica para mejorar la relación señal-ruido es mediante la utilización de filtros espaciales, con estos es posible conservar el valor promedio de la imagen reduciendo su desvío estándar (se busca disminuir la incerteza radiométrica de la imagen aumentando el número de looks).

La incerteza radiométrica de una imagen SAR puede ser calculada conociendo el número equivalente de looks (ENL). Una de las técnicas para calcularlo es a través del cuadrado del cociente de la media, sobre el desvío estandar de áreas homogéneas de energía retrodispersada.

$$ENL = \left( \frac{media}{DS} \right)^2 \quad (3.4)$$



El uso de filtros espaciales puede reducir la incerteza radiométrica, pero se sacrifica resolución espacial (Fig. 3.18).

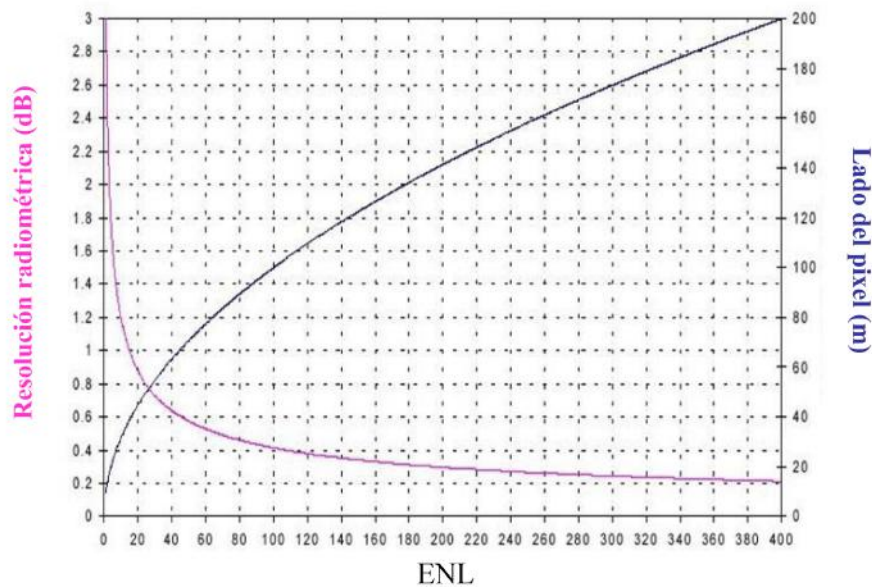


Figura 3.18: Comparación de curvas de resolución espacial y resolución radiométrica en función al número equivalente de miradas “looks” (Laur et al., 2004).

Cuanto mayor sea el ENL, la incerteza de los valores radiométricos relacionados a una determinada cobertura será menor, la figura 3.19 muestra la relación de los intervalos de confianza (en DB) a un 95% de exactitud vs. el número de looks de la imagen. En dicha figura se observa que al incrementar el número de looks, se reduce el intervalo de confianza, mejorando esto la precisión radiométrica, pero como se menciono anteriormente se sacrifica resolución espacial.

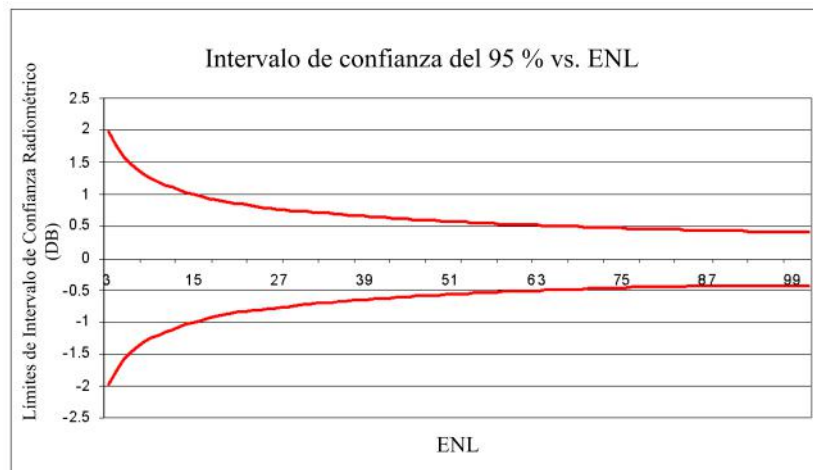


Figura 3.19: Curva de resolución radiométrica vs ENL (Laur et al., 2004).

#### 3.2.4.4. Filtros Digitales en Imágenes SAR

Una de las técnicas más utilizadas para filtrar el ruido speckle es el uso de filtros espaciales. Estos filtros se calculan mediante el uso de ventanas móviles.

Debido al ruido speckle, existe una diferencia entre la textura de la escena que debe ser conservada como la variación espacial del comportamiento de la reflectividad, y la textura propia de la imagen, que representa la variación espacial de la radiometría captada por un SAR. Para diferenciar esto, son utilizados los filtros adaptivos que conservan los detalles y la textura de la imagen. Es importante resaltar que el uso de filtros espaciales implica la modificación de los valores retrodispersados.

##### 3.2.4.4.1. Lee mejorado

El filtro Lee mejorado se adapta a las características de los datos, y permite una buena separación entre el ruido y la información (Lopes et al., 1990). Los filtros adaptivos son adecuados para conservar la información radiométrica (conservan el valor de la media reduciendo el ruido multiplicativo) y la textura. Muchos filtros adaptivos se han desarrollado para la reducción del ruido. Los más utilizados son el Frost, Lee y Kuan. Muchos de estos filtros se encuentran implementados en los software de procesamientos de imágenes satelitales de uso más común.

EL filtro con el que se decidió trabajar, es el llamado Lee mejorado. Este filtro funciona como la suma ponderada del valor del píxel observado (píxel central) y del valor promedio de la ventana. El coeficiente ponderado es una función de la heterogeneidad local de terreno medida

en términos del coeficiente de variación. EL filtro Lee fue mejorado por Lopes et al. (1990), básicamente divide a la imagen en 3 categorías. La primera corresponde a las áreas homogéneas donde el ruido (o moteado) se puede eliminar simplemente con la aplicación de un filtro de paso bajo (equivalente a un promedio de una ventana móvil de  $n$  dimensiones), la segunda categoría corresponde a áreas heterogéneas en donde el ruido se puede reducir preservando la textura, la última categoría, hace referencia a las regiones que contienen valores de intensidad altos con respecto al de sus vecinos y deben ser conservados por el filtro.

Categorías de filtrado:

- Filtrado para áreas homogéneas: el filtro “restaura” la imagen asignando al píxel central de la ventana móvil la media calculada dentro de ella si el coeficiente de variación ( $C_i$ ), es menor o igual al coeficiente de variación de referencia ( $C_u$ ).

$$R = \overline{im} \Rightarrow C_i \leq C_u \quad (3.5)$$

- Filtrado para áreas heterogéneas: el filtro se basa en un buen discriminador que permite una perfecta separación entre la información con ruido y la textura. El mismo se aplica cuando  $C_i$  es menor al coeficiente máximo de variación  $C_{max}$ , pero mayor a  $C_u$ .

$$R = \overline{im} \cdot W + I_c \cdot (1 - W) \Rightarrow C_u < C_i < C_{max} \quad (3.6)$$

- Conservación de puntos aislados: el filtro conserva los puntos aislados si  $C_i$  es mayor o igual a  $C_{max}$ .

$$R = I_c \Rightarrow C_i \geq C_{max} \quad (3.7)$$

Donde:

$R$  = matriz resultante

$\overline{im}$  = es la media de intensidad dentro de la ventana móvil

$I_c$  = píxel observado en la imagen (píxel central dentro la ventana móvil)

$W$  es una función de ponderación y es calculado como:

$$W = \exp\left(\frac{-CA \cdot (C_i - C_u)}{(C_{max} - C_i)}\right) \quad (3.8)$$

Donde  $CA$  es igual a la constante de amortiguación, esta constante especifica el alcance del efecto de amortiguación del filtro. El valor predeterminado de 1 es suficiente para la mayoría

de las imágenes SAR. El uso de valores grandes de esta constante permite una mejor preservación de los bordes con alta intensidad, pero reduce el efecto de suavizado. El uso de valores pequeños aumenta el efecto de suavizado, pero no conserva los bordes mencionados.

El coeficiente de variación del conjunto de datos (dentro de la ventana móvil) es igual a:

$$C_i = \frac{DS}{\bar{I}_m} \quad (3.9)$$

DS = desviación estándar de la intensidad dentro de la ventana

Para una imagen en potencia, una zona (ventana móvil) es considerada homogénea si el coeficiente de variación es menor o igual al coeficiente de variación de referencia que es calculado como:

$$C_u = \frac{0,523}{\sqrt{nro.looks}} \quad (3.10)$$

A partir de estudios teóricos y experimentales, el cálculo del coeficiente máximo de variación (para toda la imagen) se obtiene de la siguiente manera (Lopes et al., 1990).

$$C_{max} = \sqrt{1 + \frac{2}{nro.looks}} \quad (3.11)$$

En la figura 3.20 se observa un ejemplo de la utilización del filtro Lee mejorado a partir del uso de ventanas móviles de distintas dimensiones.

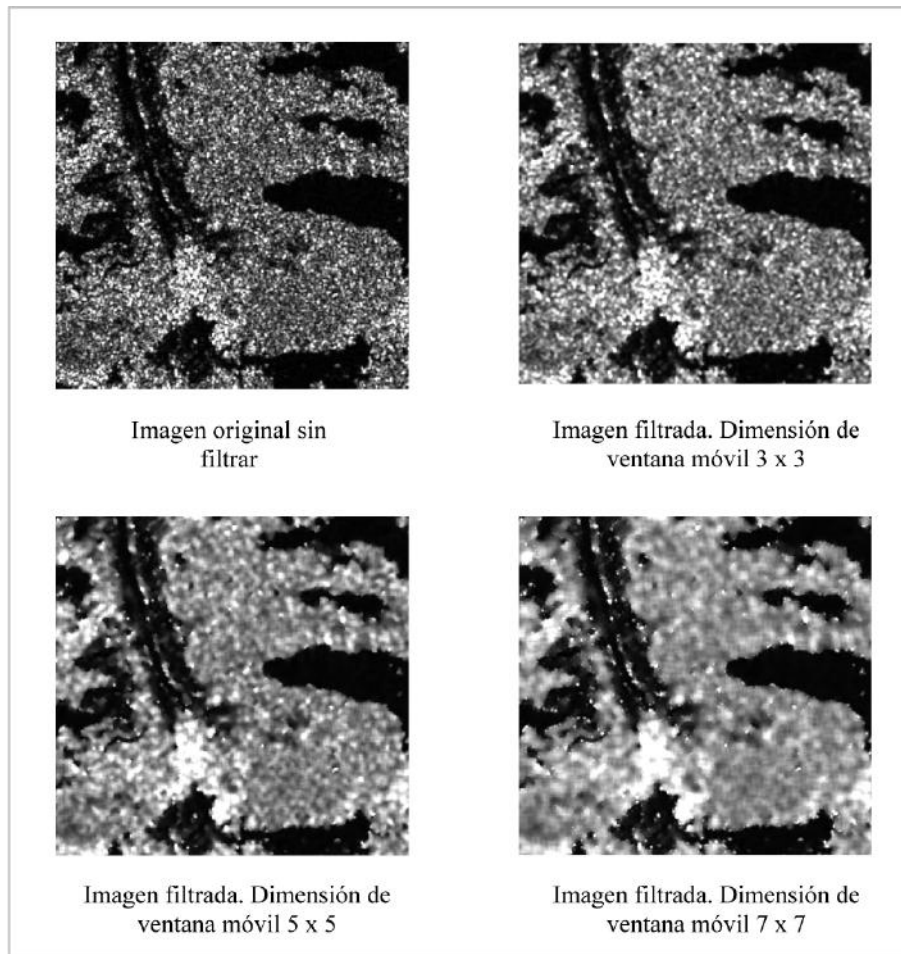


Figura 3.20: Ejemplo de Filtro Lee mejorado

# Capítulo 4

## Información utilizada

### 4.1. Información Hidrométrica

Para conocer las condiciones hidrométricas del área de estudio, se utilizaron las lecturas realizadas en la escala de Rosario, provincia de Santa Fe, tomadas diariamente por la Prefectura Naval Argentina. La escala pertenece a la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Con esta información se generó una serie temporal (1970/2006) de las alturas del río resumidas en términos de percentiles. Los percentiles son indicativos de frecuencias, sintetizan la información sobre los datos analizados facilitando su manejo. Es un valor que agrupa la cantidad de datos de la serie en forma porcentual indicando qué porcentaje de datos dentro del total se encuentran por debajo y por encima de un valor definido. La tabla 4.1 muestra la selección de 5 categorías para ser utilizadas como referencias del estado hidrométrico del Río Paraná en Rosario.

Tabla 4.1: Categorías tomadas como referencias del estado hidrométrico del río en Rosario. Fuente: INA.

Serie 1970/2006			
	Niveles asociados en Rosario (cm)	Percentil (promedio anual)	Promedios (percentil 50)
> =	463	Percentil 90	
> =	414		Máximo
=	348	Percentil 50	
< =	246		Mínimo
< =	217	Percentil 10	

La razón por la cual se seleccionaron dichas categorías es la siguiente: el percentil 10 representa un valor hidrométrico en el cual el 90 % de los valores totales de la serie se encuentran por encima de dicho valor, por lo tanto, se lo categorizó como el nivel más bajo (217 cm). Los niveles bajo, medio y alto, se seleccionaron del análisis del percentil 50 que es comprendido como promedio de la serie, obteniéndose el mínimo, medio y máximo de dicho percentil respectivamente. Por último, el percentil 90 cuyo valor representa 463 cm medidos en Rosario, se eligió debido a que este valor se encuentra por encima del 90 % del total de la serie analizada, por lo tanto, es el nivel que menos recurrencia tiene en relación con los otros seleccionados (tabla 4.2).

Tabla 4.2: Categorías de referencia del estado hidrométrico del río.

Referencia de altura de río	Percentiles (cm)
<b>Alto</b>	<b><math>\geq 463</math></b>
<b>Medio Alto</b>	<b><math>\sim 402</math></b>
<b>Medio</b>	<b><math>\sim 344</math></b>
<b>Medio Bajo</b>	<b><math>\sim 266</math></b>
<b>Bajo</b>	<b><math>\leq 211</math></b>

En la figura 6.4 se observa el cálculo de valores en percentiles de la altura del Río Paraná medida en Rosario para la serie temporal 1970/2006.

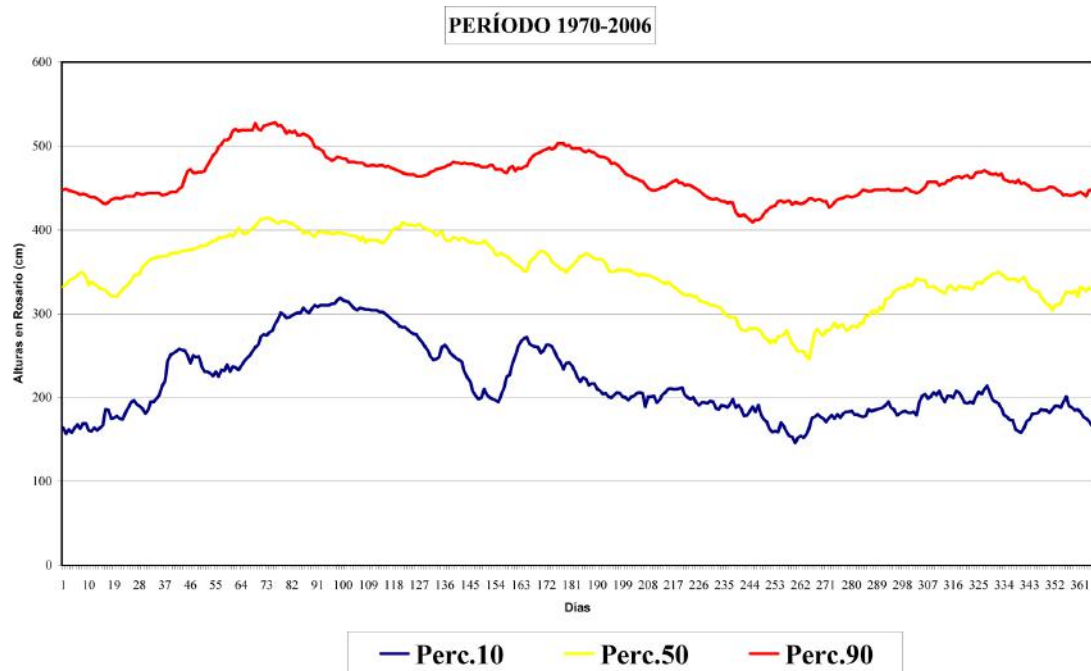


Figura 4.1: Cálculo de percentiles correspondientes a valores hidrométricos (alturas de río) medidas en Rosario. Fuente: INA.

## 4.2. Datos Aster

Satélite Avanzado con Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - ASTER) (Fig. 4.2). Es un sensor multispectral lanzado a bordo del satélite Terra (NASA), posee una resolución espectral de 14 bandas desde el rango visible hasta el infrarrojo térmico. Su resolución espacial varía desde los 15 metros en el visible-infrarrojo cercano, 30 metros en infrarrojo medio de onda corta, y 90 en el infrarrojo térmico. Cada escena Aster cubre un área de 60 x 60 km con un ciclo de repetición de 16 días (Tabla 4.3).



Figura 4.2: Sensor ASTER (Satellite Imaging Corporation., 2010).



Tabla 4.3: Características del sensor ASTER (Abrams et al., 2002).

SUBSISTEMA	NRO. DE BANDAS	RANGO ESPECTRAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL (METROS)	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	
VISIBLE- INFRARROJO CERCANO	1	0,52 - 0,60	15	8 bits	
	2	0,63 - 0,69			
	3N	0,78 - 0,86			
	3B	0,78 - 0,86			
INFRARROJO MEDIO DE ONDA CORTA	4	1,60 - 1,70	30		
	5	2,145 - 2,185			
	6	2,185 - 2,225			
	7	2,235 - 2,285			
	8	2,295 - 2,365			
	9	2,360 - 2,430			
INFRARROJO TÉRMICO	10	8,125 - 8,475	90		12 bits
	11	8,475 - 8,825			
	12	8,925 - 9,275			
	13	10,25 - 10,95			
	14	10,95 - 11,65			

Se utilizaron datos de este sensor para generar una máscara de agua permanente. Estos datos se adquirieron el día 16 de mayo del 2005. La razón por la cual se eligió esta imagen, es debido a que en Rosario, ese día se registró un valor hidrométrico de 285 cm, por este motivo, se asociaron los cuerpos de agua registrados en la imagen a cuerpos de agua permanentes, ya que en la serie 1970/2006 estudiada, un 67% de los valores totales estuvieron por encima del valor mencionado.

### 4.3. Datos Cosmo SkyMed

Es una constelación de 4 satélites de origen italiano que posee sistemas de radar de apertura sintética para obtener observaciones terrestres (Fig. 4.3). Dicha constelación ha sido desarrollada llevada a cabo por la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el ministerio de defensa italiano. El proyecto nace en el año 1996 con un programa nacional de observación terrestre.

El sistema funciona con radares en banda X (microondas de 2,3 cm de longitud de onda) con un ángulo promedio de toma de datos de 40°.

Debido a la necesidad de muchas combinaciones de tamaño de imágenes y resolución espacial, el sensor puede operar en distintos modos:

- Un modo Spotlight: permite una resolución métrica con imágenes pequeñas.
- Dos modos Stripmap: permite una resolución espacial métrica y un modo polarimétrico con imágenes adquiridas en dos polarizaciones.
- Dos modos ScanSAR para resoluciones espaciales de 30 m y 100 m.

En la tabla 4.4 se observan las características principales de los satélites Cosmo SkyMed que conforman la constelación.

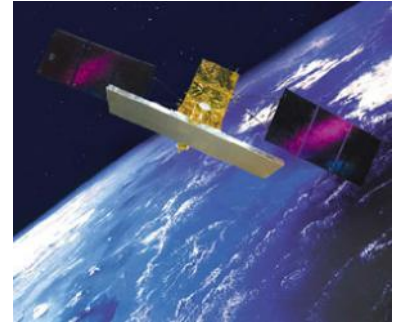


Figura 4.3: Satélite italiano Cosmo SkyMed (Space Ref., sf).

Tabla 4.4: Características técnicas de Cosmo SkyMed (Telespazio., sf).

COSMO-SkyMed. Características Técnicas					
Sistema	(Banda X)				
Modo	SPOTLIGHT o FRAME	HIMAGE o STRIPMAP	PINGPONG o STRIPMAP	WIDERegion o SCANSAR	HUGERegion o SCANSAR
Nivel de procesamiento	1B				
Polarización	HH o VV	HH o HV o VH o VV	HH o VV o HV o VH	HH o HV o VH o VV	HH o HV o VH o VV
Resolución espacial	1 m	2,5 - 15 m	10 - 15 m	30 m	100 m
Miradas	1	~ 3	~ 3,7	~ 13	~ 23
Tamaño de escena	~ 10 km x ~ 10 Km	~ 40 km x ~ 40 km	~ 30 km x 30 km	~ 100 km x ~ 100 km	~ 200 km x ~ 200 km
Ángulo de incidencia	~ 20° - ~ 60°				
Resolución radiométrica	8 bits/píxel				
Revisita	12 horas				
Formato de entrega	CEOS				
Lanzamiento	8 de junio 2007 (Cosmo SkyMed)				
	9 de diciembre 2007 (Cosmo SkyMed 2)				
	25 de noviembre de 2008 (Cosmo SkyMed 3)				
	6 de noviembre de 2010 (Cosmo SkyMed 4)				

Para la tesis se utilizaron 15 imágenes Cosmo SkyMed, 11 en modo HIMAGE y las restantes 4 en modo PING PONG. Las correspondientes al año 2010, fue utilizada para la detección de áreas inundadas, y las del año 2011 para el análisis de estudio de la Banda X ante distintas coberturas (Fig. 4.5).

Tabla 4.5: Características principales del conjunto de datos Cosmo SkyMed utilizados.

Satélite	Fecha de adquisición	Tipo de producto	Modo de adquisición	Resolución en campo (m)	Miradas (looks)	Polarización	Rango de cobertura (km.)	Dirección de órbita	Nro. de órbita	Caudales en Rosario (m <sup>3</sup> /s)	Alturas en Rosario (cm)	Nivel de referencia de altura del río
CSK1	27/02/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	14743	38,200	556	ALTO
CSK1	16/04/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	15454	26,300	447	ALTO
CSK1	10/05/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	descendente	15772	25,100	432	MEDIO ALTO
CSK1	18/05/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	15928	24,900	432	MEDIO ALTO
CSK3	27/05/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	8581	25,100	434	MEDIO ALTO
CSK2	11/06/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	13558	24,100	425	MEDIO ALTO
CSK3	12/07/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	8818	23,900	315	MEDIO
CSK3	21/07/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	descendente	9403	14,200	276	MEDIO BAJO
CSK1	28/07/2010	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	descendente	16987	14,200	272	MEDIO BAJO
CSK4	06/05/2011	GEC_B	PING PONG	10	3.11	VV	40	descendente	2693	27,582	460	MEDIO ALTO
CSK4	06/05/2011	GEC_B	PING PONG	10	3.11	HH	40	descendente	2693	27,582	460	MEDIO ALTO
CSK2	08/05/2011	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HV	40	ascendente	18461	27,383	458	MEDIO ALTO
CSK1	10/05/2011	GEC_B	PING PONG	10	3.11	VV	40	descendente	21223	27,086	455	MEDIO ALTO
CSK1	10/05/2011	GEC_B	PING PONG	10	3.11	HH	40	descendente	21223	27,086	455	MEDIO ALTO
CSK4	12/05/2011	GEC_B	HIMAGE	3	2.8	HH	40	ascendente	2775	26,987	454	MEDIO ALTO

# Capítulo 5

## Metodología

A modo ilustrativo en la figura 5.1, se muestra un esquema de las etapas metodológicas utilizadas para la obtención de áreas inundadas y el comportamiento de la banda X para coberturas típicas presentes en la región bajo estudio.

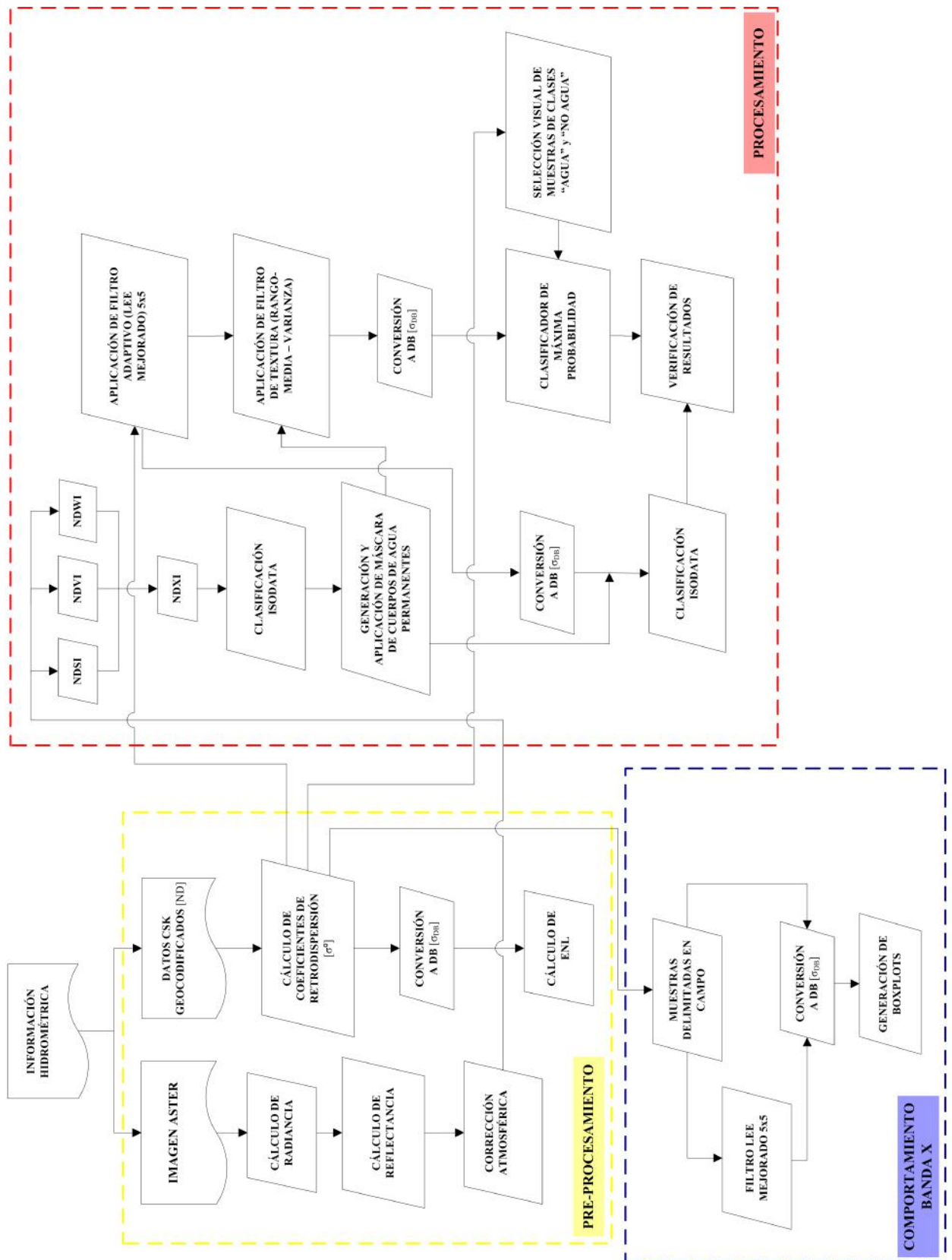


Figura 5.1: Resumen de la metodología utilizada para la detección de áreas inundadas y descripción del comportamiento de la banda X ante distintas coberturas presentes en la región.

## 5.1. Información Remota

### 5.1.1. Pre-procesamiento

#### 5.1.1.1. Imagen ASTER

La imagen ASTER obtenida en la estación terrena (CONAE), se encontraba georreferenciada y en valores digitales discretos (ND). La conversión de estos ND a variables físicas, resulta de utilidad para poderse comparar la información entre bandas, sensores, etc. Obteniendo a partir de una serie de cálculos, los valores de reflectancia que mide el sensor al tope de la atmósfera ajustados para el día de adquisición. Para calcular esto en primer lugar se requiere transformar los valores de ND a de radiancia de acuerdo a unos coeficientes de calibración específicos del sensor:

$$L_{rad} = (DN - 1) \cdot CC \quad (5.1)$$

El CC (coeficiente de conversión) varía para cada banda espectral, estos valores se obtuvieron de la versión de la guía ASTER (tabla 5.1)(Abrams et al., 2002).

Tabla 5.1: Coeficientes de conversión para cada banda ASTER (Smith, 2004)

Coeficiente (W/m <sup>2</sup> .sr.µm)/ND				
Banda	Alta ganancia	Normal	Baja ganancia 1	Baja ganancia 2
1	0,6760	1,6880	2,2500	-
2	0,7080	1,4150	1,8900	-
3N	0,4230	0,8620	1,1500	-
3B	0,4230	0,8620	1,1500	-
4	0,1087	0,2174	0,2900	0,2900
5	0,0348	0,0696	0,0925	0,4090
6	0,0313	0,0625	0,0830	0,3900
7	0,0299	0,0597	0,0795	0,3320
8	0,0209	0,0417	0,0556	0,2450
9	0,0159	0,0318	0,0424	0,2650

De la radiancia obtenida ( $L_{rad}$ ), se calcula la reflectancia al tope de la atmósfera:

$$R_{TOA} = \left( \frac{\pi \cdot L_{rad} \cdot d^2}{ESUN_i \cdot \cos(z)} \right) \quad (5.2)$$

RTOA = reflectancia al tope de la atmósfera

Lrad = radiancia espectral en la apertura del sensor

ESUN = irradiancia solar media de cada banda ASTER calculada mediante la convolución de las funciones de las respuestas espectrales de ASTER y datos adquiridos por el WRC (Word Radiation Center) (Thome et al., 2001) (tabla 5.2).

Tabla 5.2: Irradiancia solar medida para cada banda ASTER (Thome et al., 2001).

Banda ASTER	Thome et al (A): ESUN
1	1.847
2	1.553
3N	1.118
4	232,5
5	80,32
6	74,92
7	69,2
8	59,32
9	57,32

$z$  = ángulo cenital solar calculado como: ángulo cenital =  $90 - \text{ángulo de elevación solar}$  (dato obtenido del archivo de cabecera de la imagen)

$d$  = distancia tierra-sol en unidades astronómicas calculada como (Smith, 2004):

$$d = 1 - (0,01652 \cdot \cos(\text{radianes}(0,9856 \cdot (\text{diajuliano} - 4)))) \quad (5.3)$$

Por ultimo, se corrigieron los efectos atmosféricos. Dicha corrección se realizó mediante el valor más bajo de reflectancia (mínimo del histograma para cada banda espectral) de acuerdo al método de Chávez (Chavez, 1989). Esto se hizo ya que la atmósfera, al interactuar con las ondas provenientes del sol que se dirigen hacia la superficie terrestre, genera una interacción que puede afectar al comportamiento espectral de la superficie terrestre. Debido a que el sensor toma valores de reflectancia en algunas bandas más elevados que lo que realmente refleja la cobertura terrestre (sobre todo en la región del visible), se aplicó el método de Chávez, que consiste en tomar el valor mínimo de cada banda como si fuese un cuerpo negro (reflectividad igual a cero) y llevarlo a 0, extrayendo los valores de reflectividad generados por los gases dispersos en la atmósfera.



### 5.1.1.2. Imágenes COSMO SkyMed

Históricamente, las imágenes SAR han sido usadas para una variedad de aplicaciones (cartografía, mapeo de estructuras geológicas, etc.) por lo cual un análisis cualitativo de los productos de las imágenes era suficiente para extraer la información. Sin embargo, la información disponible contenida en los datos SAR, requiere un análisis cuantitativo del blanco observado. En general, muchas aplicaciones que involucran a los estudios de radar requieren algún nivel de calibración radiométrica para realizar comparaciones entre imágenes de distintas fechas, ángulo de observación, etc. (Curlander & Mc Donough, 1991).

Para homogeneizar la información de las imágenes y, de este modo, poder comparar los datos entre distintas fechas de adquisición, se calibró todo el conjunto de datos utilizado. Uno de los principales motivos de la calibración de los datos SAR, es el de ajustar posibles cambios temporales en la ganancia de la antena y en las condiciones de saturación de la señal. La calibración radiométrica de las imágenes de radar consiste en la evaluación de los valores radiométricos que son independientes de la geometría y las características del radar, dependiendo solo de la retrodispersión del terreno. Los efectos que deben ser considerados son:

- Pérdida de rango dinámico
- Compensación de la antena
- Efectos de ángulo de incidencia

Los factores mencionados se corrigieron calibrando las imágenes. A continuación, se describen los pasos de la calibración para obtener el coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^\circ$ ) a partir de los ND. La información necesaria para calibrar las imágenes se encuentra en los archivos de cabecera de cada una de ellas. En la tabla 5.3 se detallan los pasos para realizar la calibración, y en la tabla 5.4 las referencias para el cálculo de  $\sigma^\circ$ .

Tabla 5.3: Pasos para la evaluación de  $\sigma^\circ$  (E-geos, 2011).

Pasos	Descripción	Fórmula
1	Evaluar la imagen en potencia	$P(i,j) =   \text{img}_{\text{inp}}(i,j)  ^2$
2	Remover la referencia de rango lejano	$\text{Fact} = R_{\text{ref}}^{2 * R_{\text{exp}}}$
3	Remover la referencia del ángulo de incidencia	$\text{Fact}' = \text{Fact} * \text{sen}(\alpha_{\text{ref}})$
4	Remover el factor de rescalado	$\text{Fact}'' = \text{Fact}' * 1/F^2$
5	Aplicación del factor de calibración	$F_{\text{tot}} = \text{Fact}''' * 1/K$
6	Aplicación del factor total de reescalado	$\sigma^0(i,j) = P(i,j) * F_{\text{tot}}$

Tabla 5.4: Referencias para el cálculo de  $\sigma^\circ$ .

Descripción	Parámetros	Simbología	Unidad
Referencia de rango lejano usado en los pasos de procesamiento	Referencia de rango lejano	$R_{ref}$	metros
Exponente de referencia del rango lejano	Exponente referencia de rango lejano	$R_{exp}$	número
Referencia del ángulo de incidencia usado en los pasos de procesamientos	Referencia de ángulo de incidencia	$\alpha_{ref}$	grados
Constante de calibración (dependiente del modo del sensor)	Constante de calibración	K	número
Factor de reescalado aplicado en los pasos del procesamiento	Factor de reescalado	F	número

Una vez realizada la calibración, se convirtieron los datos  $\sigma^\circ$  a decibeles (DB) calculando  $\sigma^\circ(r, c)_{db} = 10 \cdot \log_{10} \sigma(r, c)$

Las imágenes utilizadas (COSMO SCS\_B GEC) se encontraban georreferenciada utilizando el sistema de proyección Gauss Kruger y el sistema de referencia UTM 20 sur.

### 5.1.1.3. Cálculo de Número Equivalente de Looks (ENL)

Para cuantificar y corroborar de manera aproximativa el número de looks a partir de una imagen con y sin filtro Lee, y estimar la resolución radiométrica, se calculó el ENL (cap. 3.2.4.3). Para esto, se seleccionaron blancos homogéneos en los modos de adquisición HIMAGE (Fig. 5.2) y PINGPONG, y luego se obtuvo un promedio de ellos para cada modo. En las imágenes sin filtro, el valor fue próximo al número de looks del sistema radar.

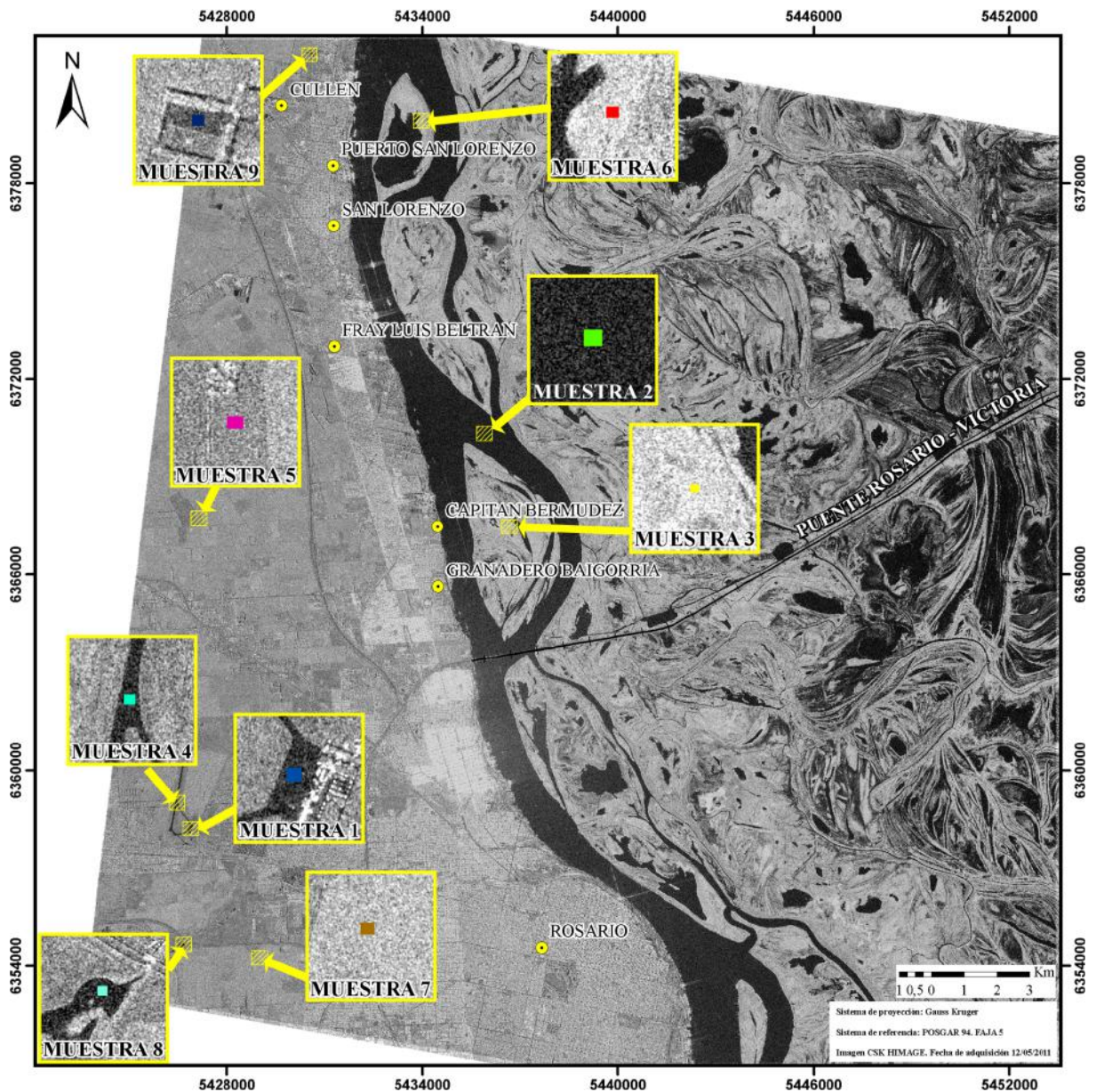


Figura 5.2: Obtención de muestras homogéneas. Imagen CSK adquirida el 12/05/2011.

$$\overline{ENL} = \frac{1}{9} \sum_1^9 ENL \quad (5.4)$$

Los resultados del promedio de los ENL fueron los siguientes:

- Modo HIMAGE:

$$\overline{ENL} = 3,51$$

$$\overline{ENL}_{Lee} = 20,55$$

- Modo PINGPONG:

$$\overline{ENL} = 4,00$$

$$\overline{ENL}_{Lee} = 20,74$$

Según los datos publicados por Laur et al. (2004), las imágenes en los modos HIMAGE y PINGPONG sin filtrar ( $\overline{ENL}$  igual a 3,51 y 4,00), poseen una incerteza radiométrica de  $\pm 4$  DB a una confianza de exactitud del 91 %. Y para las imágenes en los mismos modos, pero filtradas mediante el filtro Lee mejorado ( $\overline{ENL}$  igual a 20,55 y 20,74) la incerteza radiométrica a una confianza de exactitud del 95 % fue de  $\pm 1,9$  DB.

## 5.1.2. Procesamiento

### 5.1.2.1. Máscara de Agua Permanente

La generación y aplicación de un máscara de agua permanente, se debe a la necesidad de extraer con ella los cuerpos de agua que poseen una distribución espacialmente estable en el tiempo, para observar en el conjunto de datos analizados solo la áreas afectadas por exceso o faltante de agua.

La máscara corresponde a los cuerpos de agua detectados por una imagen ASTER adquirida el día 16 de mayo de 2005. La razón por la cual se eligió esta imagen, fue debido a que en Rosario ese día se registró un valor de altura del río de 285 cm, asociándose los cuerpos de agua registrados en la imagen a cuerpos de agua permanentes, ya que en la serie hidrométrica (1970/2006) estudiada, un 67 % de los valores totales estuvieron por encima del valor mencionado.

#### 5.1.2.1.1. Índice y Clasificación Espectral

Con la imagen ASTER georreferenciadas y calibradas a reflectancia, se generaron los índices espectrales. Estos índices se calculan utilizando aquellas bandas espectrales que pongan en evidencia las coberturas citadas a través de operaciones algebraicas (cap. 3.2.3.1). Para mejorar su discriminación de las cuberturas con comportamientos reflectivos distintos, como lo son los de la vegetación, el suelo y el agua (Fig. 5.3), se construyó una imagen RGB auxiliar denominada “NDXI” o “imagen de índices”.

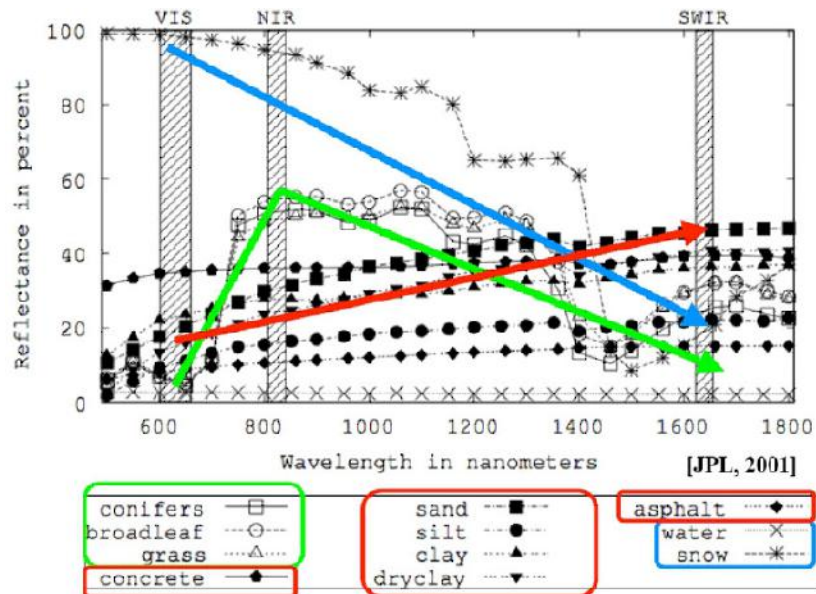


Figura 5.3: Tendencia espectral según el predominio de la cobertura presente en el espacio estudiado (Takeuchi & Yasuoka, 2005).

Esta metodología redujo el volumen de información, y discriminó las coberturas mencionadas (Fig. 5.4).

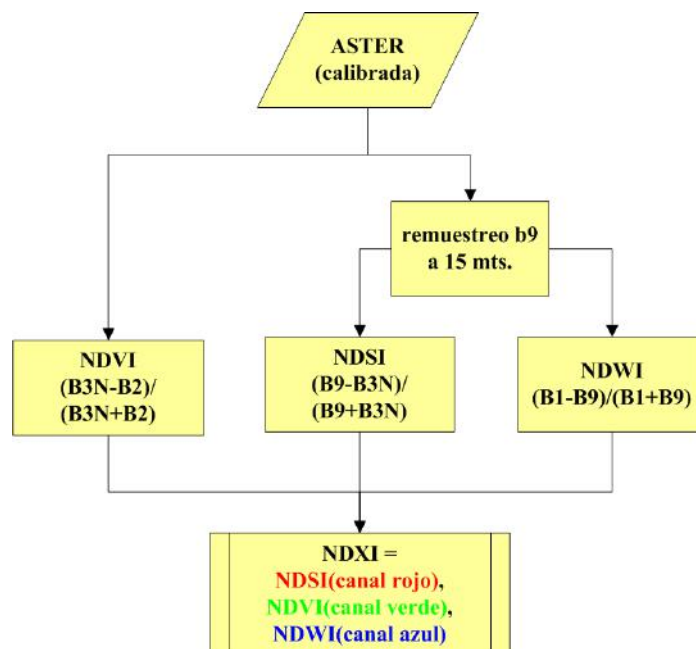


Figura 5.4: Generación de índices espectrales para la imagen ASTER.

La utilización de la imagen NDXI, ayudó al etiquetado de las coberturas de interés (en

este caso “agua” y “no agua”) mediante un análisis compuesto de interpretación óptica más un análisis de las respuestas espectrales de los índices.

#### 5.1.2.1.2. Clasificación de Agua Permanente

Para obtener la máscara de cuerpos de agua permanentes (datos ASTER) se redujo toda la información a dos clases, agua y no-agua, mediante el método de clasificación no supervisado llamado ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique). El mismo se aplicó a la imagen NDXI resultante, asignando el NDSI al canal rojo, NDVI al canal verde y NDWI al canal azul. Dicho algoritmo no implica ningún conocimiento del área de estudio. El mismo asume que los números digitales (ND) de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (cluster), la delimitación de estos conglomerados equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo. Para delimitar cada cluster se configuran dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles, y otro que configura las condiciones del proceso de agrupamiento; para el primero de estos se utilizó el método llamado distancia euclidiana:

$$d_{(d,a)} = \sqrt{\sum_{i=1,m} (ND_{a,i} - ND_{b,i})^2} \quad (5.5)$$

Donde  $d_{a,b}$ , indica la distancia entre dos píxeles cualquiera a y b;  $ND_{a,i}$  y  $ND_{b,i}$  los niveles digitales de esos píxeles en la banda i, y m el número de bandas.

Para el segundo criterio, el algoritmo de agrupamiento fue configurado de la siguiente manera:

1. Se señalaron una serie de centros de clase (entre 50 y 80).
2. Se asignaron todos los píxeles de la imagen a los centros de clases más próximos, utilizando el criterio de distancia euclidiana.
3. Se calcularon de nuevo los centros de clases teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado en la fase anterior.
4. Se reordenan los centros de clase en función de los parámetros de control indicados: mínimo de píxeles pertenecientes a una clase (1), máximo desvío estándar (1), mínima distancia de clases (5) y máximo número de fusión de pares (2).

5. Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual, debido al desplazamiento registrado en el tercer paso, no tiene por qué coincidir con la asignación realizada en el segundo paso.
6. Si el número de píxeles que han cambiado de categoría es inferior al señalado (5% del total) termina el proceso, en caso contrario, se retoma al tercer realizando otra iteración (hasta un máximo de 10). En la figura 5.5 se observa una síntesis metodológica del algoritmo.

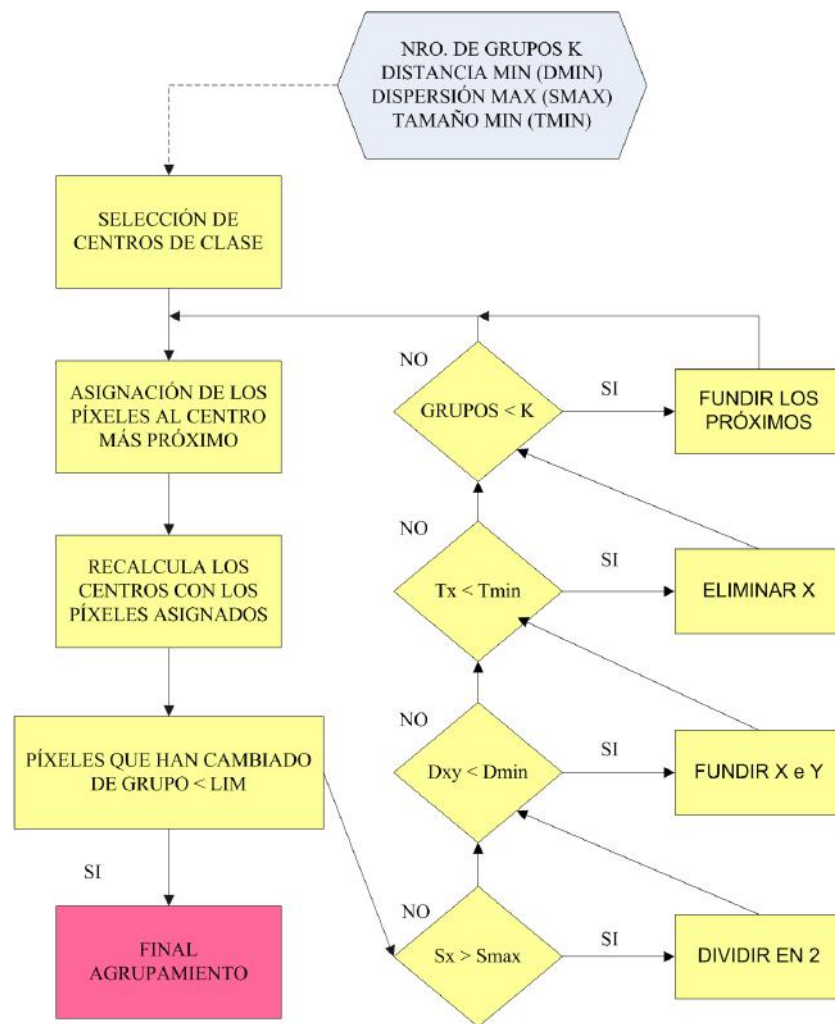


Figura 5.5: Síntesis metodológica del algoritmo ISODATA (Chuvieco, 1996).

Por último, para la generación de la máscara de agua, se agruparon los píxeles en dos clases: agua y no-agua. Esto se realizó interpretando visualmente y enlazando (link) la imagen en composición color (7-5-1 R-G-B) con la imagen NDXI y la obtenida del algoritmo ISODATA. Para aquellos píxeles difíciles de agrupar a una cobertura de forma visual, se analizó el comportamiento espectral correspondientes a la información estadística de la imagen NDXI. A

modo de ejemplo, en la figura 5.6 se observa el comportamiento espectral para la clase 28 de la imagen NDXI, dicho comportamiento muestra un alto valor espectral en la banda del índice NDWI, y bajas respuestas espectrales de las banda NDSI y NDVI, por este motivo la clase 28 fue etiquetada como “agua”.

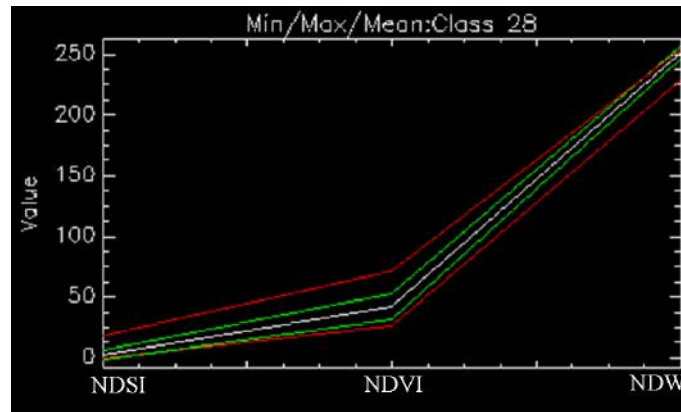


Figura 5.6: Comportamiento espectral de la imagen NDXI para la clase 28 representativa a la clase “agua” .

Como resultado final, se obtuvieron dos clases agua y no-agua utilizadas como máscara de agua. En la figura 5.7 se observa un resumen de la metodología aplicada para generar la máscara de cuerpos de agua permanentes a partir de la imagen ASTER.



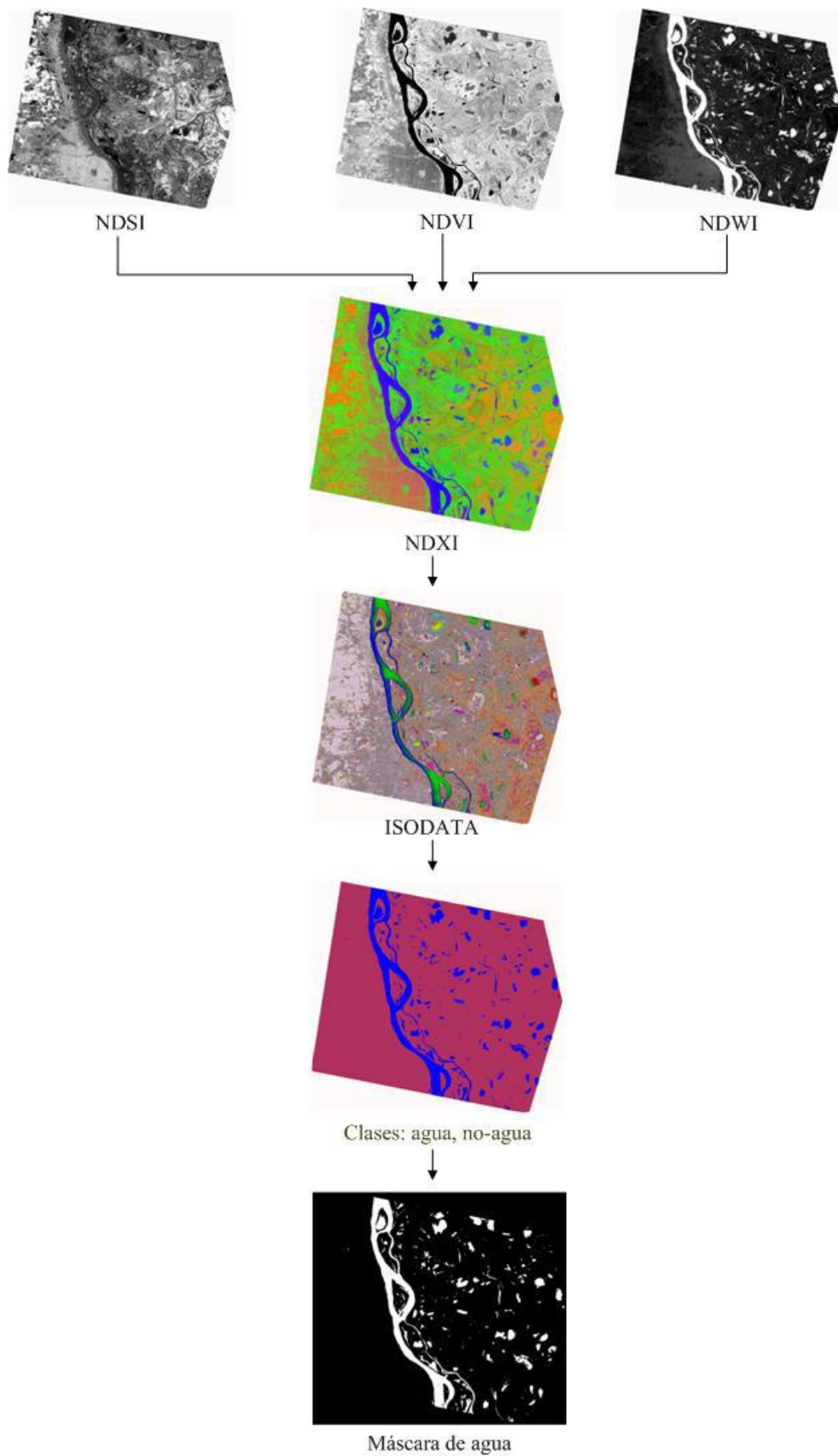


Figura 5.7: Resumen metodológico para la obtención de la máscara de agua permanente basada en información ASTER.

### 5.1.2.2. Detección de Áreas Inundadas mediante Imágenes Cosmo SkyMed

La detección de cuerpos de agua se obtuvo mediante la modificación de la metodología desarrollada por SØlbo et al. (sf). Dicha detección se realizó a partir del cómputo de filtros de textura. Como dato de entrada de este filtro, se utilizaron las imágenes CSK filtradas mediante el filtro adaptivo Lee mejorado (Lopes et al., 1990). Del resultado del filtro de textura se obtuvo: el rango de valores, la media y la varianza. Todos los datos de entrada de las imágenes SAR se encontraban en potencia ( $\sigma^\circ$ ). Para cada una de las imágenes se calculó el vector  $x(i, j)$  compuesto por:

$$X(i, j) = \begin{pmatrix} ra^{lee}\{n(i, j)\} \\ me^{lee}\{n(i, j)\} \\ var^{lee}\{n(i, j)\} \end{pmatrix}$$

Donde  $n(i, j)$  es un vector que contiene los cálculos obtenidos por una ventana móvil de dimensiones  $5 \times 5$ , ubicando al resultado en el píxel central  $(i, j)$  de la ventana. La primer ventana inteligente calculó para cada imagen lo siguiente:  $ra$  (rango local) que es el valor máximo menos el valor mínimo ( $\max - \min$ ),  $me$  (media local) y  $var$  (varianza local) para toda la matriz recorrida.

El cálculo de la media y la varianza permite diferenciar las clases agua y no agua (Solbø et al., 2003). El uso del rango (máximo - mínimo) mejora la discriminación de dichas clases. Esto parte del razonamiento de que en aquellas áreas homogéneas donde existe un ruido multiplicativo de las regiones de “agua” y “no agua”, los valores de varianza de intensidad pueden ser similares, pero su rango de valores puede variar, permitiendo esto una mejor separación de las coberturas mencionadas.

Como primer paso, se aplicó el filtro adaptivo Lee mejorado sobre el conjunto de imágenes CSK calibradas representativas de la inundación del año 2010, siendo estas utilizadas como datos de entrada para el uso del filtro de textura recién mencionado. La razón de esto fue reducir el ruido multiplicativo (variabilidad) de dichas imágenes. Esta variabilidad se encuentra asociada al ruido multiplicativo propio de la imagen SAR (cap. 3.2.4.3). A modo de ejemplo, para verificar la reducción de dicha variabilidad mediante el uso del filtro adaptivo, se compararon los datos extraídos de un área homogénea de una imagen CSK. Dicha comparación se hizo entre la imagen mencionada a la cual se le aplicó un filtró de textura (generando el vector  $x(i, j)$ ) siendo previamente filtrada por un filtro adaptivo Lee (eje Y), y el cálculo del mismo vector  $x(i, j)$  pero sin la aplicación previa del filtro adaptivo sobre la imagen (eje X) (Figs. 5.8, 5.9 y 5.10). En las figuras 5.8 y 5.9, se observa la reducción de la variabilidad de los datos del eje Y (RANGO ( $ra$ ) y VARIANZA ( $var$ ) con filtro Lee) en relación a los datos del eje X (RANGO

( $ra$ ) y VARIANZA ( $var$ ) sin filtro Lee).

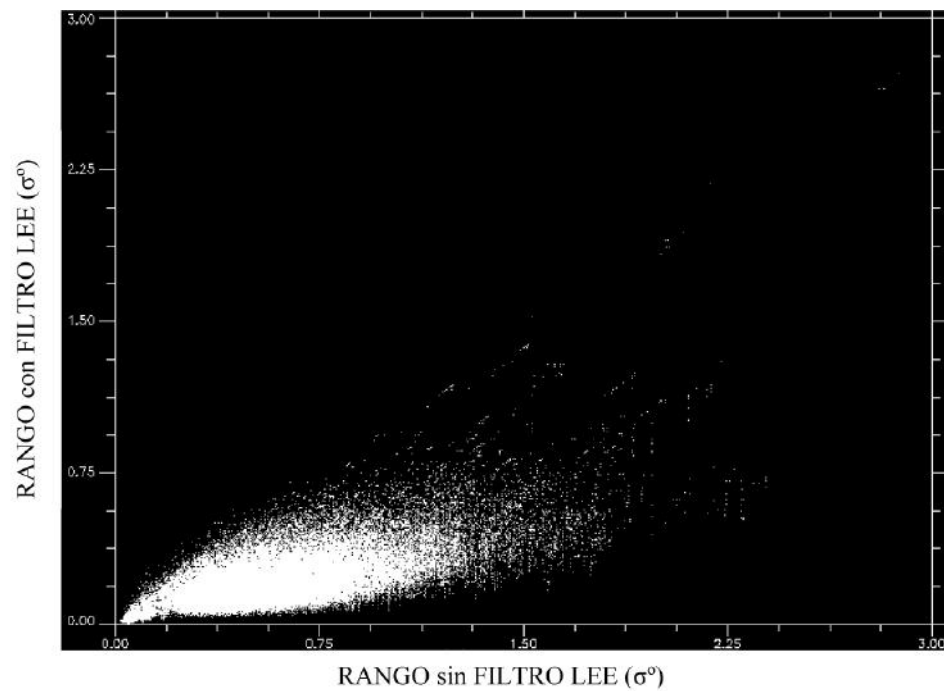


Figura 5.8: Valores de rango con filtro Lee vs. valores de rango sin filtro Lee.

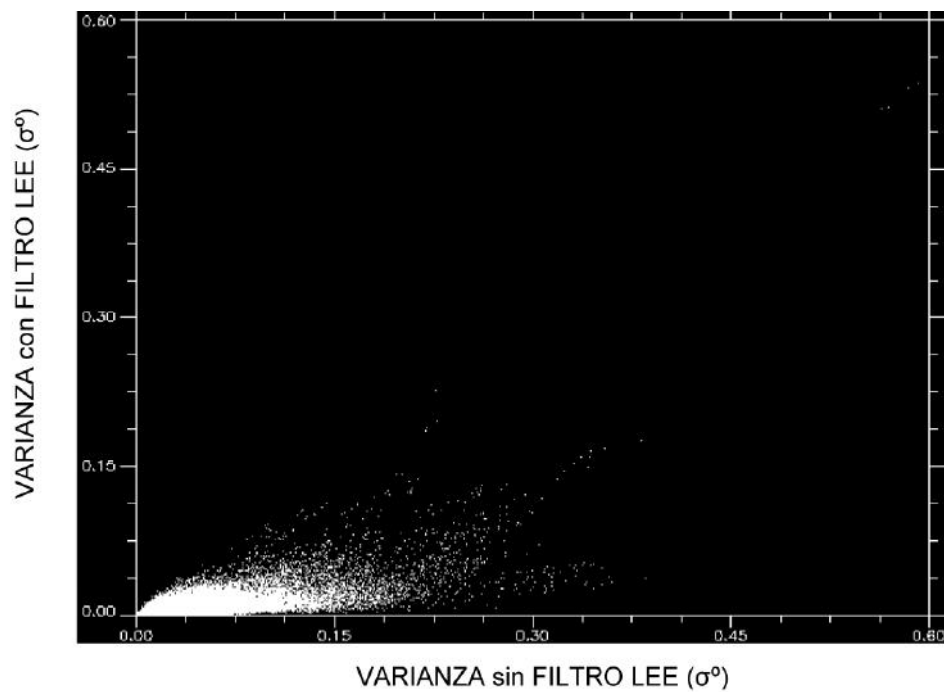


Figura 5.9: Valores de varianza con filtro Lee vs. valores de varianza sin filtro Lee.

En la figura 5.10, se comparan los valores del eje Y (MEDIA ( $me$ ) con filtro Lee) con los

valores del eje X (MEDIA ( $me$ ) sin filtro Lee). Pese a que existe una reducción de la variabilidad de los datos ( $\sigma^0$ ) en el eje Y con respecto a los del eje X, esta no es tan evidente como en las figuras anteriores (Fig. 5.8 y 5.9). Esto se debe a que el uso del filtro adaptivo en una área homogénea genera una imagen promediada (cap. 3.2.4.4.1), y posteriormente al calcular otra vez la MEDIA ( $me$ ) con el filtro de textura (eje Y), la variabilidad se reduce pero de menor forma en relación al eje X (MEDIA ( $me$ ) sin filtro Lee).

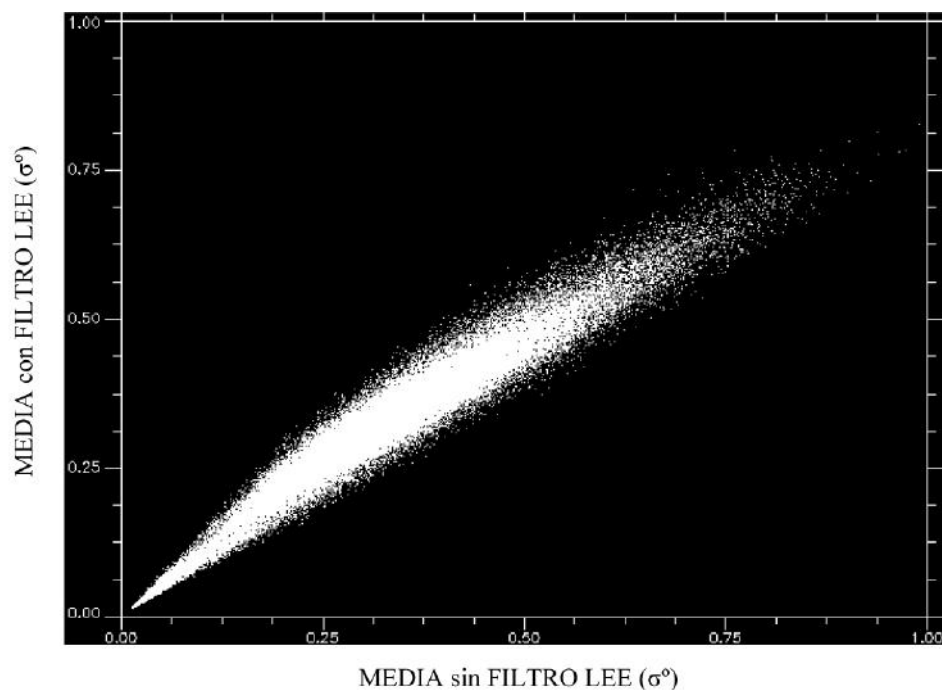


Figura 5.10: Valores de media con filtro Lee vs. valores de media sin filtro Lee.

Luego se transformaron cada uno de valores de los vectores  $x(i, j)$  a decibeles para mejorar la separación entre las coberturas (Fig. 5.11).

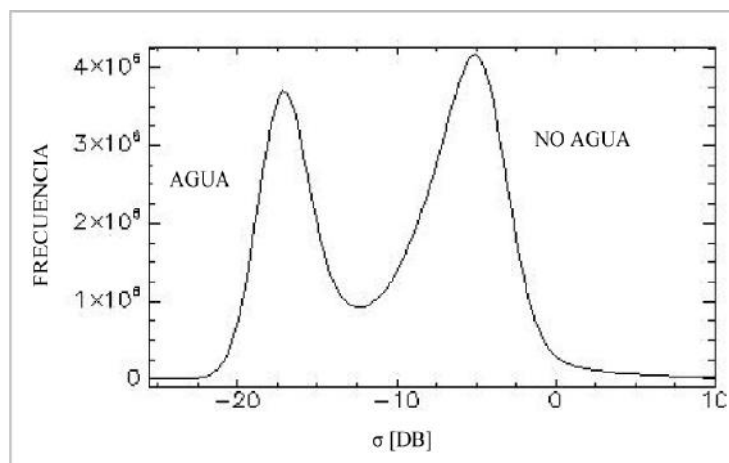


Figura 5.11: Distribución de la radiación retrodispersada de las coberturas “agua” y “no agua”.

Obtenidos los vectores  $x(i, j)$ , se extrajeron los cuerpos de agua permanentes con la máscara mencionada anteriormente.

#### 5.1.2.2.1. Identificación de Clases

#### 5.1.2.2.2. Obtención de Muestras

Habiendo procesado las imágenes con los filtros adaptivos y de texturas y, posteriormente, hecha la conversión a decibelios de todo el conjunto de vectores  $x(i, j)$ , se comenzó con la identificación y clasificación de las clases. Las muestras de energía retrodispersada que representan las clases “agua” y “no agua”, se digitalizaron sobre las imágenes originales calibradas y en potencia ( $\sigma^\circ$ ) (Fig. 5.12).

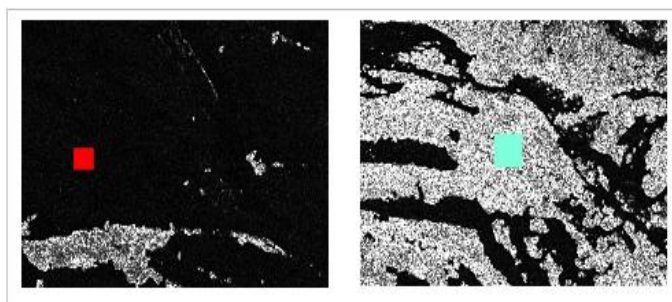


Figura 5.12: Obtención de muestras de clases “agua” y “no agua” sobre imagen Cosmo SkyMed ( $\sigma^\circ$ ).

Con las áreas de interés delimitadas (AOI), se tomaron los datos sobre los vectores  $x(i, j)$  calculados anteriormente (RANGO, MEDIA y VARIANZA). La condición que deben cumplir las muestras seleccionadas para luego ser utilizadas en un clasificador de máxima probabilidad, es la de poseer un comportamiento de valores homogéneos con una distribución normal, aunque algunos autores han mostrado resultados satisfactorios utilizando bandas de entrada que no cumplen este criterio (Swain y Davis, 1978 en Chuvieco (2008)). A modo de ejemplo en las siguientes figuras (5.13 a 5.18), se observan las distribuciones de dos muestras correspondientes, una a la clase agua y otra a la no agua, para los vectores RANGO ( $ra$ ), MEDIA ( $me$ ) y VARIANZA ( $var$ ) calculados y filtrados anteriormente. Dichas distribuciones presentan una tendencia a una distribución normal, donde el vector de VARIANZA es el que mejor se ajusta a ella.

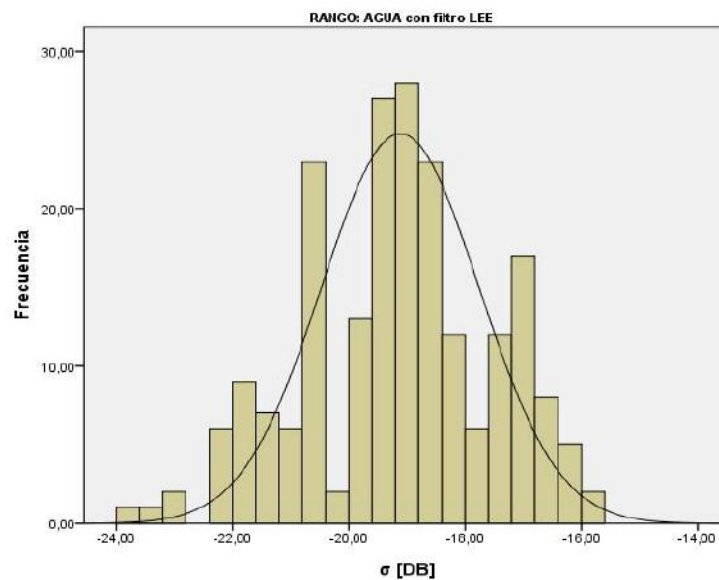


Figura 5.13: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  RANGO.

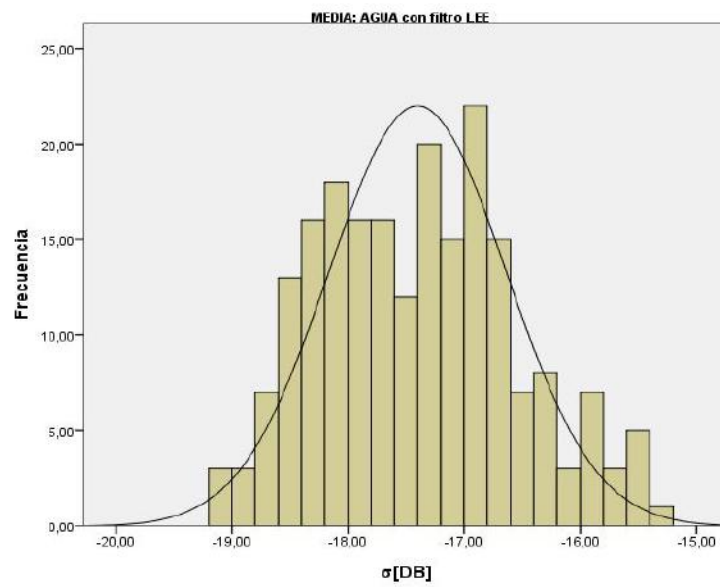


Figura 5.14: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  MEDIA.

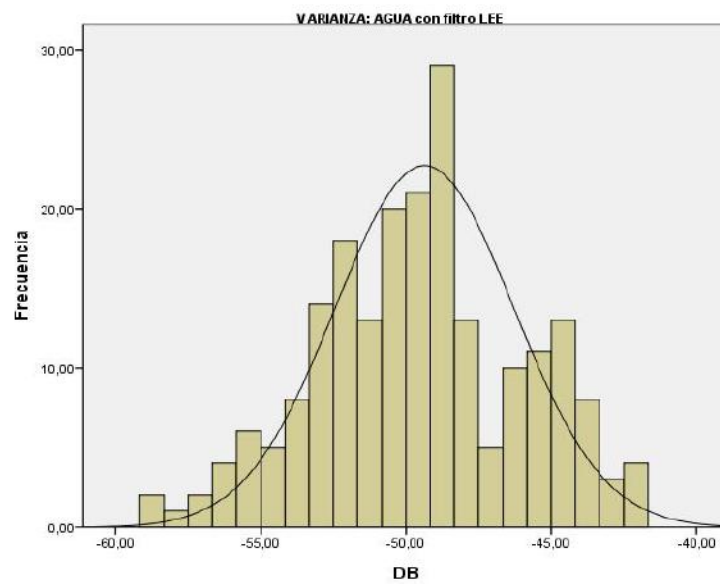


Figura 5.15: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  VARIANZA.

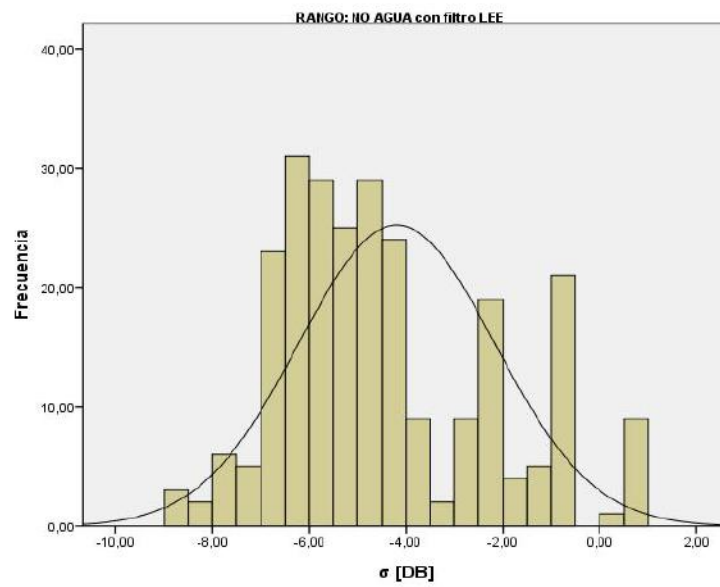


Figura 5.16: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura NO AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  RANGO.

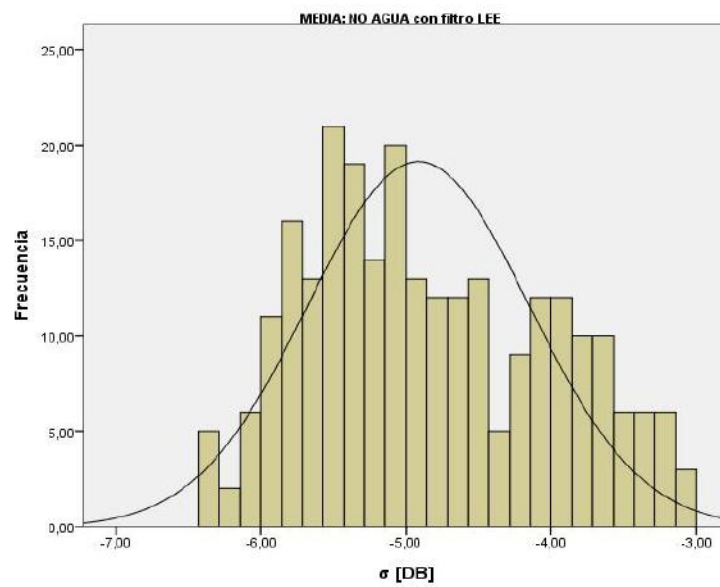


Figura 5.17: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura NO AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  MEDIA.



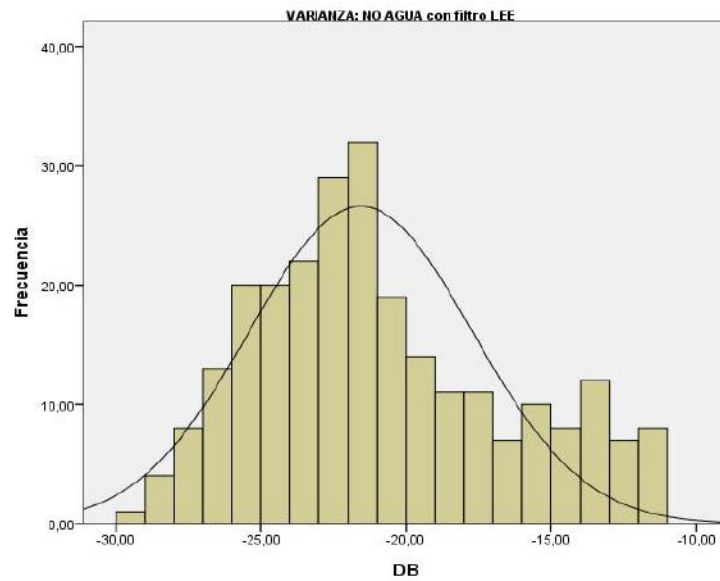


Figura 5.18: Distribución de los valores de la AOI de la cobertura NO AGUA del vector calculado  $x(i, j)$  VARIANZA.

Las muestras representativas a las clases, deben poseer entre ellas una diferencia de valores para que dicho método no “confunda” una clase con otra, para que esto suceda, la “diferencia” de separación entre una clase y otra debe ser lo suficiente tal que los valores representantes de la clase tengan un comportamiento “único” en la imagen, de esta forma el clasificador agrupará de manera precisa a las clases espectrales.

### 5.1.2.2.3. Algoritmo de Clasificación de Máxima Probabilidad

Seleccionadas las muestras para cada clase, el algoritmo de clasificación seleccionado fue el de Máxima Probabilidad. Este método considera que los valores ND de cada clase se ajustan a una distribución normal (gaussiana) y permite describir a las clases por dicha función. Para el buen funcionamiento del mismo, es requisito la utilización de muestras que cumplan con la distribución normal mencionada. Dicho requisito ha sido comprobado en numerosos estudios, sin embargo, algunos autores han demostrado que los resultados siguen siendo bastantes consistentes aún en el caso donde las bandas espectrales no cumplan ese criterio (Chuvieco, 2008).

Las clases “agua” y “no agua” se obtuvieron mediante el algoritmo de máxima verosimilitud:

$$p(x/A) = (2\pi)^{-m/2} |V_A|^{-0,5} \exp\{-0,5(M_x - M_A)^T V_A^{-1} (M_x - M_A)\} \quad (5.6)$$

Donde  $p(x/A)$  es la probabilidad de que un píxel  $x$  pertenezca a la clase A,  $m$  indica el número de bandas,  $|V_A|$  la determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase A,  $M_x$  el vector de ND asociado con el píxel  $x$ ,  $M_A$ , el vector de ND medios de la categoría A, y los superíndices T y -1, la transpuesta y la inversa de las matrices respectivamente.

Determinada la probabilidad de pertenencia del píxel  $x$  al resto de las categorías (en este caso solo hay 2), este será asignado a la clase A si su probabilidad de pertenecer a esa clase es mayor que a la clase B (no agua) o viceversa:

$$X \in \begin{cases} A; p(x/A) > p(x/B) \\ B; p(x/B) > p(x/A) \end{cases} \begin{matrix} \forall A \neq B \\ \forall B \neq A \end{matrix}$$

#### 5.1.2.2.4. Verificación de la Clasificación de Áreas Inundadas

La interpretación visual puede considerarse una forma cualitativa de verificación de los resultados pero no lo suficiente para validarlos, por este motivo, es importante verificar con información externa considerada fiel representante de la realidad del terreno en el momento de la adquisición de los datos. Como esto es imposible en la realidad ya que resulta muy dificultoso y costoso obtener datos de toda el área en estudio, es necesario la utilización de técnicas de muestreo confiables que, con la mayor precisión posible y a un costo aceptable, nos brinde información sobre el error de los resultados conseguidos (Chuvienco, 1996).

Para verificar y comparar la exactitud de la metodología implementada para la detección de áreas inundadas, se utilizó un clasificador ISODATA (cap. 5.1.2.1.2.). Se debe resaltar que el algoritmo ISODATA, al ser no supervisado, no requiere conocimiento del área de estudio ni demasiado procesamiento computacional. Dicho clasificador se configuró como: mínimo de píxeles por clases 5 y un máximo de 10, umbral de cambio de 5 %, mínimo de píxel por clase 1, máximo desvío estándar 1, mínimo de distancia de clases 5, máximo de números de fusión de pares de clases 2 y un máximo de iteraciones posibles de 15. El objetivo de su aplicación fue el de comparar la precisión del agrupamiento de clases de la metodología desarrollada para la detección de áreas inundadas, con la de un algoritmo de clasificación no supervisado. Esto se realizó con una imagen CSK en modo HIMAGE adquirida el 12 de mayo de 2011 (cap. 4.3), pudiendo verificar con datos tomados en campo el día 10 de mayo de 2011 la exactitud de

ambos. Dicha verificación es considerada el último paso de la metodología para la detección de áreas inundadas. Para su realización se utilizaron una serie de muestras independientes de la clasificación espectral. Estas muestras se obtuvieron en zonas aledañas al puente Rosario - Victoria el día 10 de mayo de 2011. Allí se etiquetaron muestras de clases de “agua” y “no agua” tomando puntos GPS y fotos de las coberturas (Figs. 5.19 a 5.21).

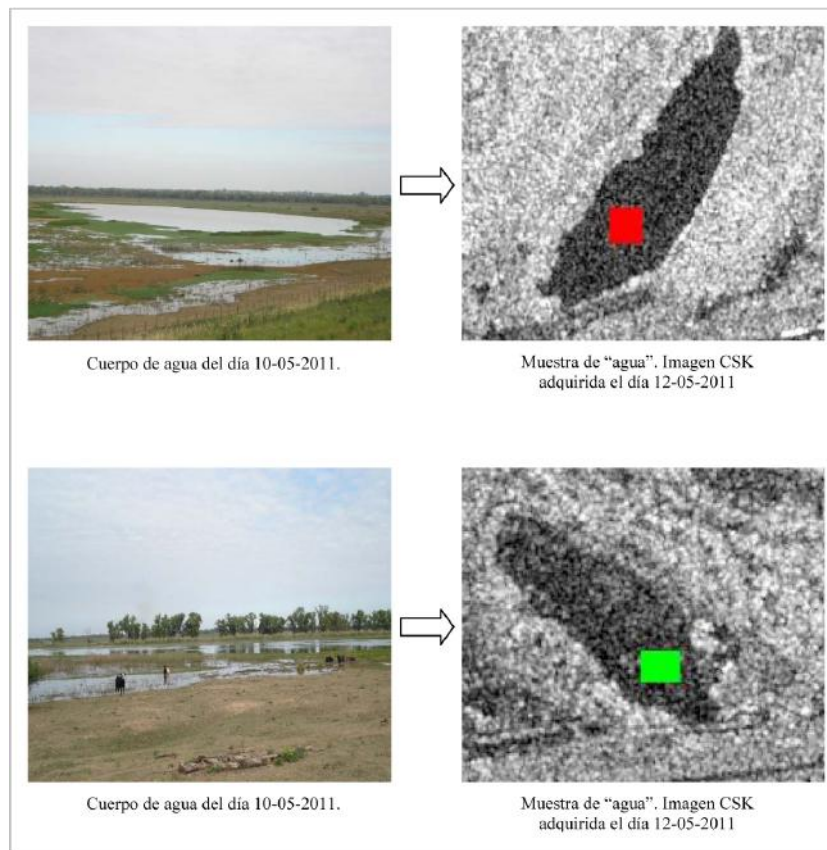


Figura 5.19: Muestras de cuerpos de agua verificadas en campo.

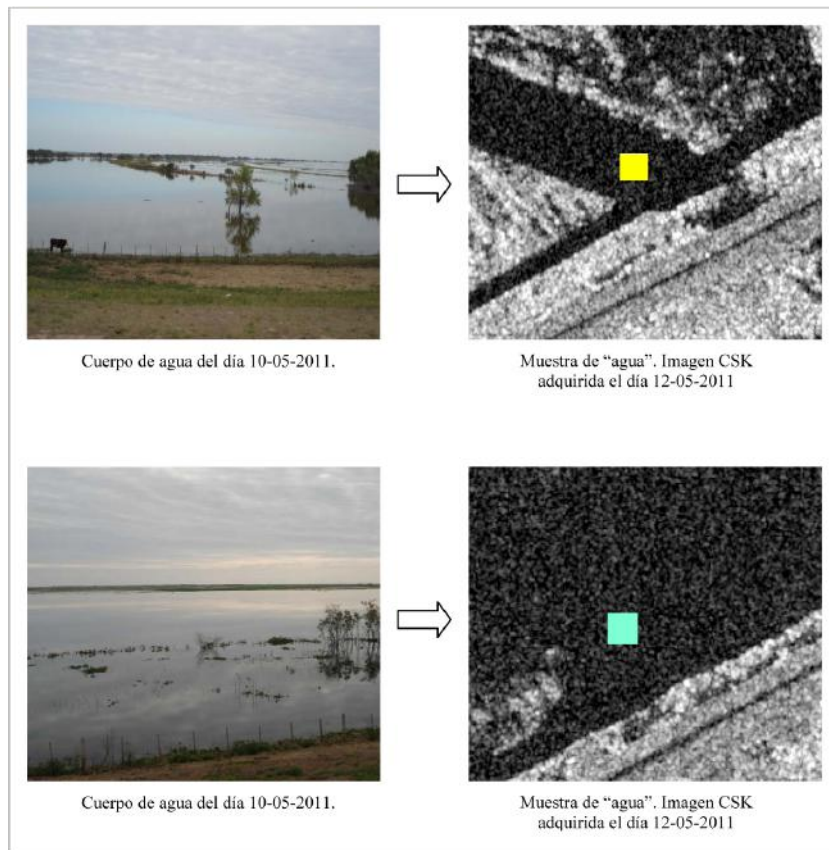


Figura 5.20: Muestras de cuerpos de agua verificadas en campo.

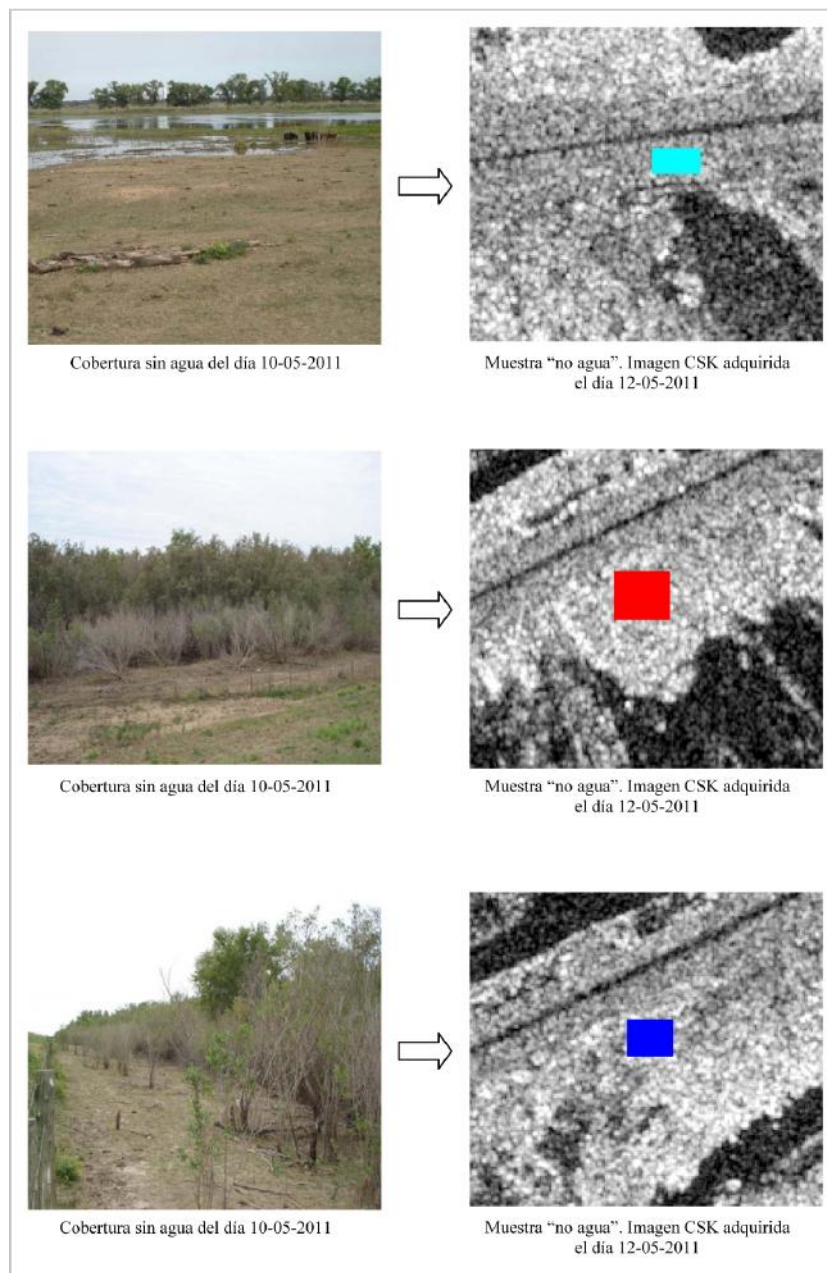


Figura 5.21: Muestras de coberturas sin agua verificadas en campo.

Luego en gabinete se volcó toda la información, y se digitalizaron las coberturas para corroborar la precisión de los clasificadores utilizados. Con dichas muestras es posible estimar el error de los resultados mediante una matriz de confusión, en donde se restan las concordancias y diferencias entre las clases obtenidas y las muestras tomadas en campo. Este tipo de muestreo permite conocer el grado de acierto y confusión existente entre las categorías. Para verificar la exactitud de la clasificación espectral se utilizó la técnica de matriz de confusión y el denominado coeficiente Kappa. Con la primera, se obtienen los conflictos entre categorías, las columnas

indican las clases de referencia (obtenidas de las muestras de campo) y las filas las categorías resultantes de la clasificación. Estos tipos de matrices otorgan información de los errores del proceso de clasificación, tanto por omisión (exceso) o por comisión (defecto) (Tablas 5.5 y 5.6). La segunda técnica es un coeficiente muy utilizado como parámetro de calidad, el mismo tiene en consideración las distribuciones marginales de la matriz de error. Este índice indica cuanto ha mejorado el sistema de clasificación respecto a una clasificación aleatoria de los  $n$  elementos en  $m$  grupos. Su valor oscila entre 0 y 1, índices de 1 significa un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa y, cercanos a 0, sugiere que el acuerdo observado es puramente al azar (Ariza López et al., 1996).

Tabla 5.5: Matriz de confusión obtenida para una imagen Cosmo SkyMed HIMAGE adquirida el 12/05/2011 por el método de clasificación supervisado de máxima probabilidad

		Píxeles					Porcentaje		
Clasificación	Clases	Agua	No Agua	Total	Clasificación	Clases	Agua	No Agua	Total
	Sin clasificar	0	0	0		Sin clasificar	0	0	0
	Agua	1.374	0	1.374		Agua	98,71	0	65,93
	No Agua	18	692	710		No Agua	1,29	100	34,07
	Total	1.392	692	2.084		Total	100	100	100

		Píxeles				Porcentaje	
Clasificación	Clases	Comisión	Omisión	Clasificación	Clases	Comisión	Omisión
	Agua	0/1.374	18/1.392		Agua	0	1,29
	No Agua	18/710	0/692		No Agua	2,54	0

Tabla 5.6: Matriz de confusión obtenida para una imagen Cosmo SkyMed HIMAGE adquirida el 12/05/2011 por el método de clasificación no supervisado ISODATA.

		Píxeles					Porcentaje		
		Clases	Agua	No Agua			Total	Clases	Agua
Clasificación	Sin clasificar	0	0	0	Clasificación	Sin clasificar	0	0	0
	Agua	1.116	5	1.121		Agua	80,17	0,72	53,79
	No Agua	276	687	963		No Agua	19,83	99,28	46,21
	Total	1.392	692	2.084		Total	100	100	100

		Píxeles				Porcentaje	
		Clases	Comisión			Omisión	Clases
Clasificación	Agua	5/1.121	276/1.392	Clasificación	Agua	0,45	19,83
	No Agua	276/963	5/692		No Agua	28,66	0,72

Las matrices de confusión nos muestran como resultado que, para la imagen clasificada el método de máxima probabilidad agrupó mejor que el ISODATA, omitiendo solo 18 píxeles (1,29 %) de la clase Agua de referencia. En cambio, para la clasificada por el método ISODATA, la clase Agua omitió 276 píxeles (19,83 %) y la clase No Agua 5 píxeles (0,72 %). El coeficiente Kappa fue para la primera de 0,98 y para la ISODATA de 0,72.

### 5.1.3. Pre-análisis de estudio de la banda X ante distintas coberturas

Este capítulo tiene como objetivo la generación de información sobre el comportamiento de la radiación retrodispersada para banda X en áreas con bosques inundados, pastizales inundados, camalotes, pajonal inundado, cuerpos de agua y áreas urbanas. Se caracterizó el comportamiento para distintos modos de adquisición del sistema de radar. La información con la que se trabajó posee distintas resoluciones espaciales, polarizaciones y modo de adquisición (ascendente o descendente) y además se le aplicó un filtro Lee mejorado de 5 x 5.

Se generó información sobre el comportamiento de las coberturas mencionadas para imágenes CSK PINGPONG adquiridas los días 6 y 10 de mayo de 2011. Dichas imágenes poseen una resolución espacial de 10 metros, un número de looks de 3,11, con un ángulo de inclinación de 40 °, polarización HH y VV, tomadas ambas en dirección descendente (Figs. 5.22 y 5.23).

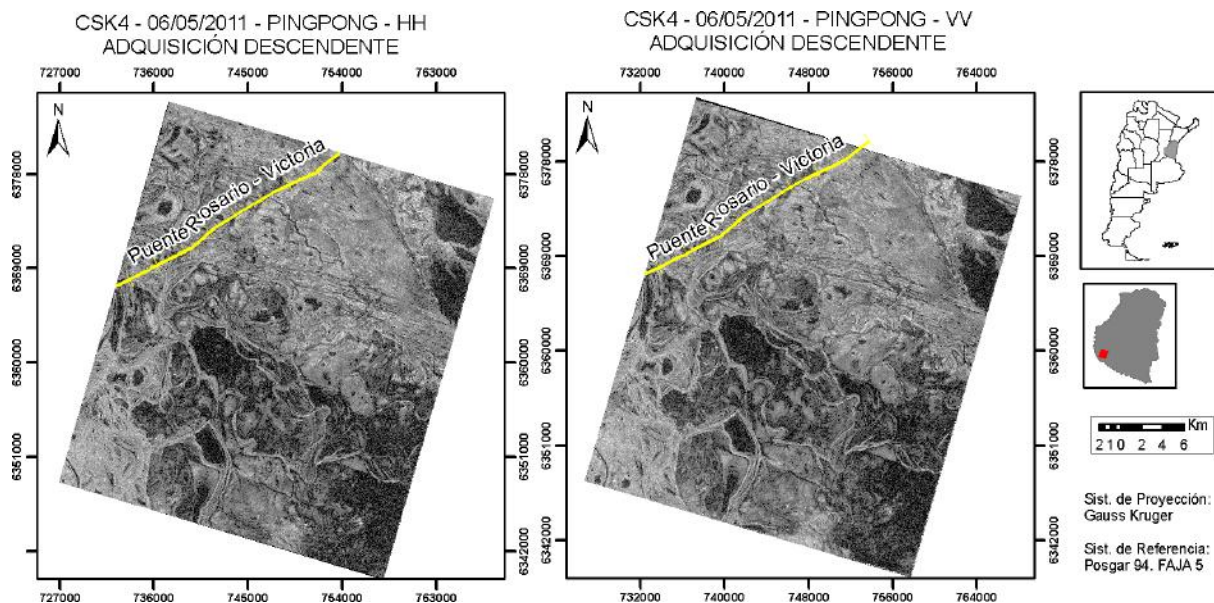


Figura 5.22: Imágenes PINGPONG CSK adquiridas el 06 de mayo de 2011.

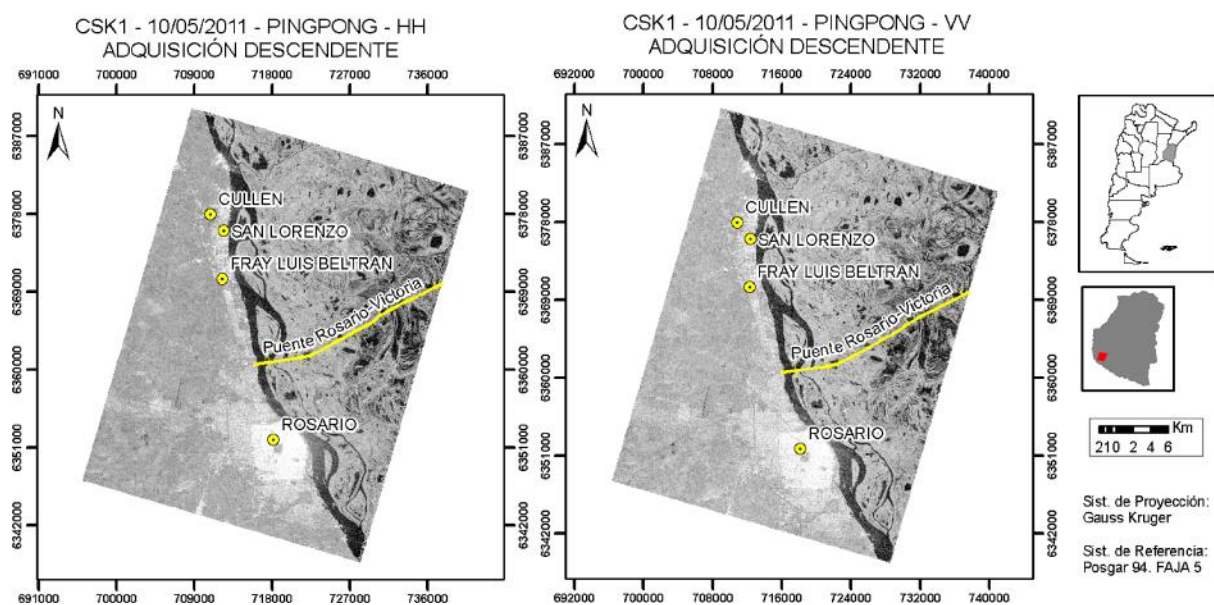


Figura 5.23: Imágenes PINGPONG CSK adquiridas el 10 de mayo de 2011.

También se verificó el comportamiento de las mismas coberturas, pero para las imágenes CSK en modo de adquisición HIMAGE, de los días 08 y 12 de mayo de 2011. Dichas imágenes poseen una resolución espacial de 2,5 metros, con una polarización HV y HH tomadas en dirección ascendente (Fig. 5.24).



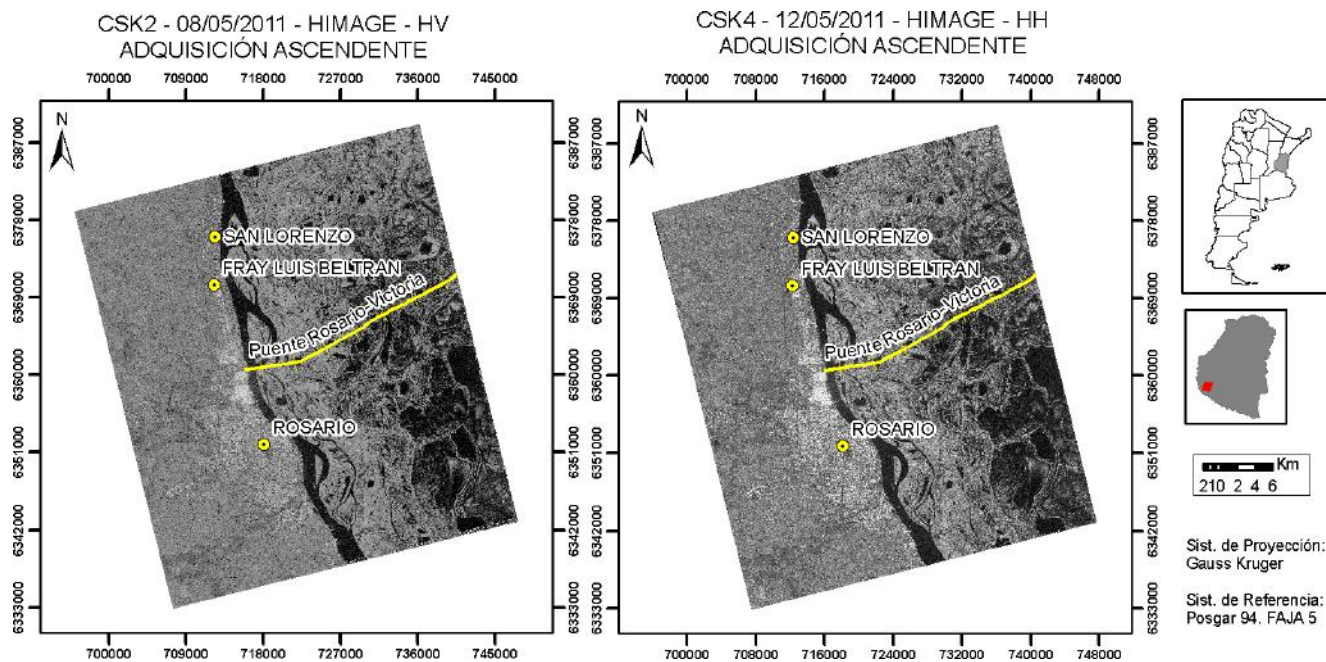


Figura 5.24: Imágenes HIMAGE CSK adquiridas el 08 y 12 de mayo de 2011.

Para las fechas de las imágenes analizadas, coberturas como pastizal y pajonal se encontraban cubiertas parcialmente por agua (Fig. 5.25, A y B). La cobertura bosque inundado, hace referencia a bosques con su superficie cubierta por una “película” de agua (Fig. 5.25, C) y la cubierta denominada agua, indica áreas inundadas (Fig. 5.25, D). La cobertura camalote corresponde a una planta acuática que forman islas que se mantienen a flote en el río.

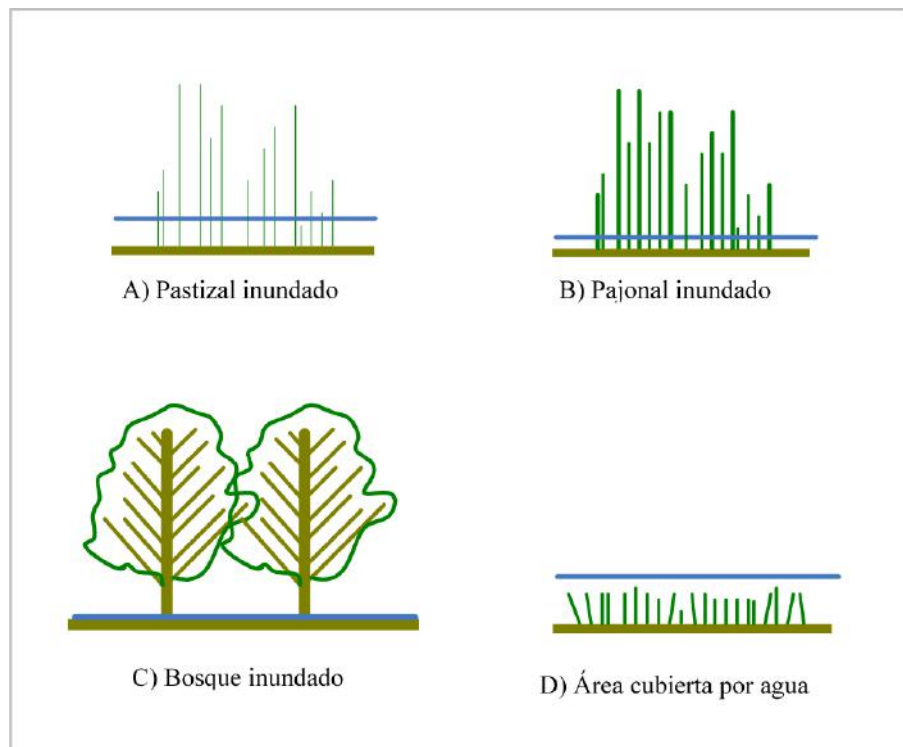


Figura 5.25: Interpretación gráfica de las condiciones ambientales de las coberturas analizadas en campo.

Mediante información de campo se obtuvieron muestras de bosque, pastizales, camalotes, pajonal y cuerpos de agua (Figs. 5.26 a 5.35). Se tomaron puntos GPS y, con imagen en mano, se etiquetaron las coberturas mencionadas.



Figura 5.26: Camalotes.



Figura 5.27: Camalotes.



Figura 5.28: Bosque inundado.



Figura 5.29: Bosque inundado



Figura 5.30: Cuerpo de agua.



Figura 5.31: Cuerpo de agua.



Figura 5.32: Pajonal inundado.



Figura 5.33: Pajonal inundado.



Figura 5.34: Pastizal inundado.



Figura 5.35: Pastizal inundado.

En la figura 5.36 se observan las áreas digitalizadas correspondientes a las coberturas relevadas en campo el día 10 de mayo del 2011. La condición hidrométrica del ambiente estudiado

corresponde a un nivel alto según la serie estudiada 1970/2006 (tabla 5.7).

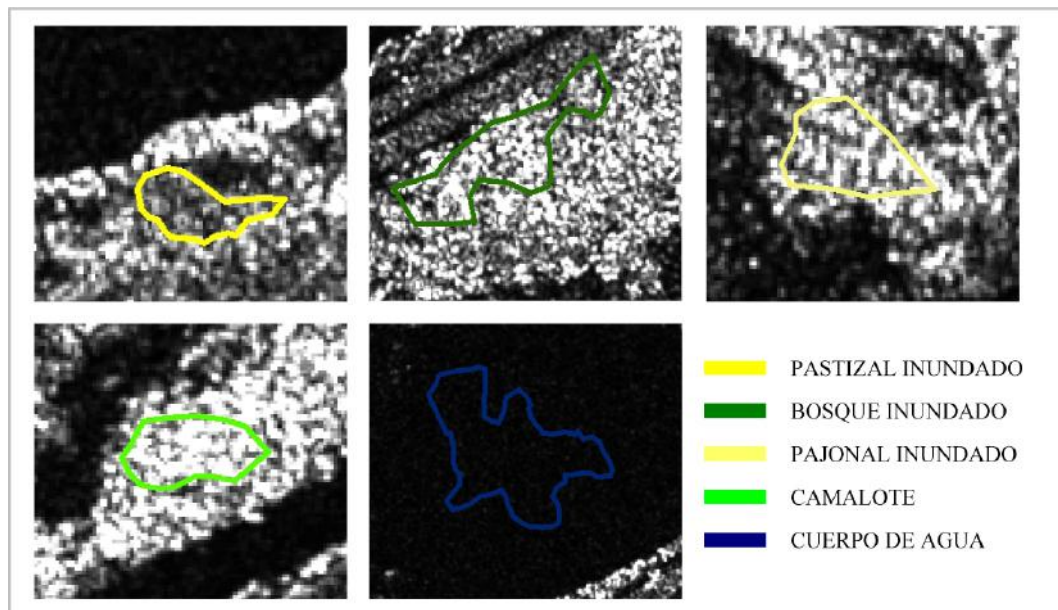


Figura 5.36: Digitalización sobre imagen CSK de coberturas identificadas en campo.

Tabla 5.7: Información hidrométrica relacionada a las fechas de adquisición de los datos utilizados para la generación de información sobre el comportamiento de la radiación retrodispersada para banda X ante distintas coberturas.

Fecha	Niveles de agua			Nivel hidrológico
	Caudales en Rosario (m <sup>3</sup> /s)	Alturas en Rosario (cm)	Alturas en Victoria (cm)	
06/05/2011	27.583	491	460	ALTO
08/05/2011	27.383	492	458	ALTO
10/05/2011	27.086	494	455	ALTO
12/05/2011	26.987	494	454	ALTO



# Capítulo 6

## Análisis y Resultados

### 6.1. Áreas Inundadas

Siguiendo la metodología utilizada para la detección de áreas inundadas mediante imágenes Cosmo SkyMed (Cap. 5.1.2.2.), se obtuvieron clasificaciones de “agua” y “no agua” para el conjunto de datos utilizados. Se verificó la exactitud de la clasificación supervisada por el método de máxima probabilidad con muestras relevadas en campo. Mediante la generación de una matriz de confusión, se comparó la precisión del método desarrollado con una clasificación de áreas inundadas generadas por un clasificador no supervisado como lo es el ISODATA. Se pudo observar que la precisión de la metodología desarrollada fue superior a la de este último, ya que los resultados de la matriz de confusión dieron un acierto de píxeles clasificados de manera correcta de 2.066 sobre un total de 2.084 (99,13% de aciertos) y, para el clasificador ISODATA, fue de 1.803 sobre un total de 2.084 (86,51% de aciertos), con un coeficiente kappa de 0,98 y 0,72 respectivamente.

Para la generación de cartografía temática, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG). En él se visualizan las áreas cubiertas por agua para la serie de datos CSK, permitiendo gracias a su alta frecuencia de relevamiento de información, y a su alta resolución espacial, el monitoreo de la inundación del Delta del Río Paraná del año 2010 (ver ANEXO). A modo de ejemplo, las figuras 8.1 y 8.9 muestran las áreas inundadas para las fechas 27 de febrero y 28 de julio del 2010. El primer mapa corresponde a una fecha donde existió un nivel hidrológico alto según la escala generada (cap. 4.1) y el segundo, a un nivel medio bajo. En ambos productos las zonas en color rojo muestran las áreas inundadas, y el trazo de líneas en color amarillo corresponden a aguas permanentes obtenidas mediante la máscara generada con información ASTER (cap. 5.1.2.1).

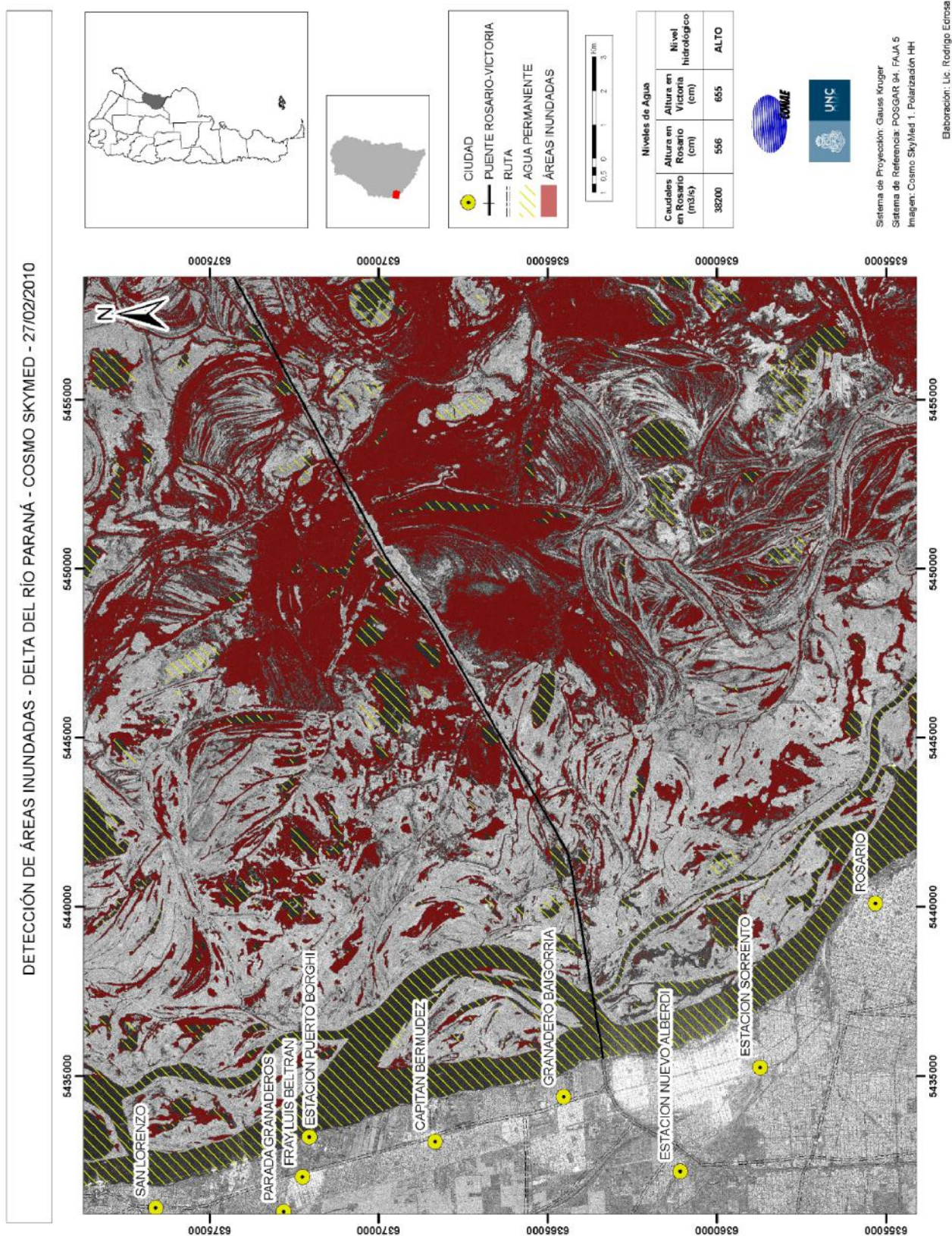


Figura 6.1: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná para el día 27/02/2010.

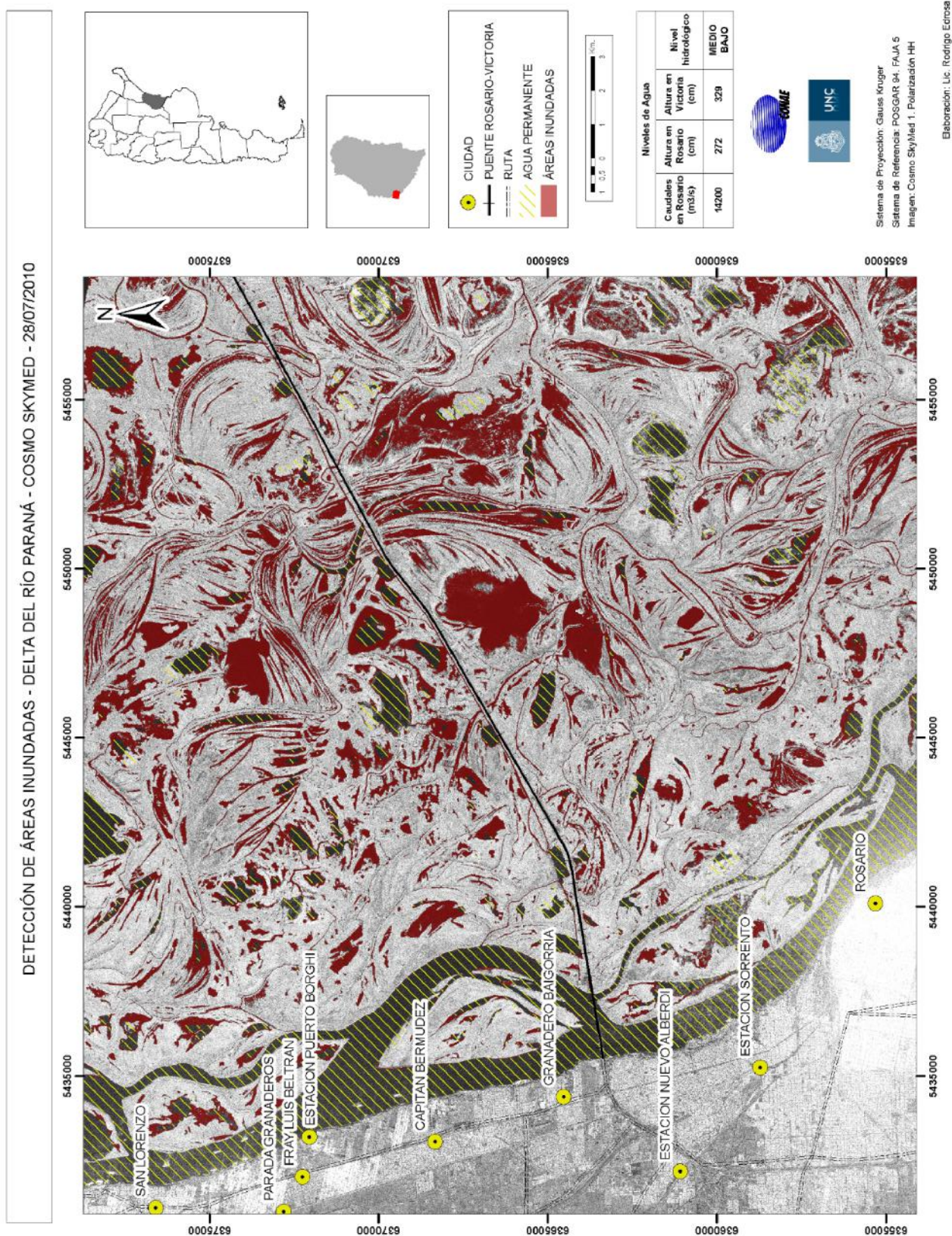


Figura 6.2: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná para el día 28/07/2010.

Para una mejor comprensión espacio-temporal de los productos cartográficos generados (ANEXO), se cuantificó el número de hectáreas inundadas y se las relacionó con el caudal medido en Rosario para las mismas fechas, altura del río y precipitaciones medidas en Rosario y en Victoria (Instituto Nacional del Agua, 2011) (Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, 2010) (Tabla 6.7)(Figs. 6.3 a 6.7).

Tabla 6.1: Comportamiento de la inundación para cada fecha estudiada mediante imágenes CSK.

Fecha	Has. inundadas	Volumen de agua en Rosario (m <sup>3</sup> /s)	Alt. de río en Rosario (cm)	Alt. de río en Victoria (cm)
27/02/2010	22.115	38.200	556	655
16/04/2010	23.941	26.300	447	476
10/05/2010	19.935	25.000	432	448
18/05/2010	18.622	24.900	432	450
27/05/2010	24.120	25.100	434	450
11/06/2010	27.177	24.100	425	448
12/07/2010	15.139	16.000	315	378
21/07/2010	15.899	14.200	276	353
28/07/2010	12.860	14.200	272	329



Figura 6.3: Comportamiento del caudal del Río Paraná medido en Rosario (Santa Fe) vs. el número de hectáreas inundadas detectadas por el conjunto de datos CSK utilizado.

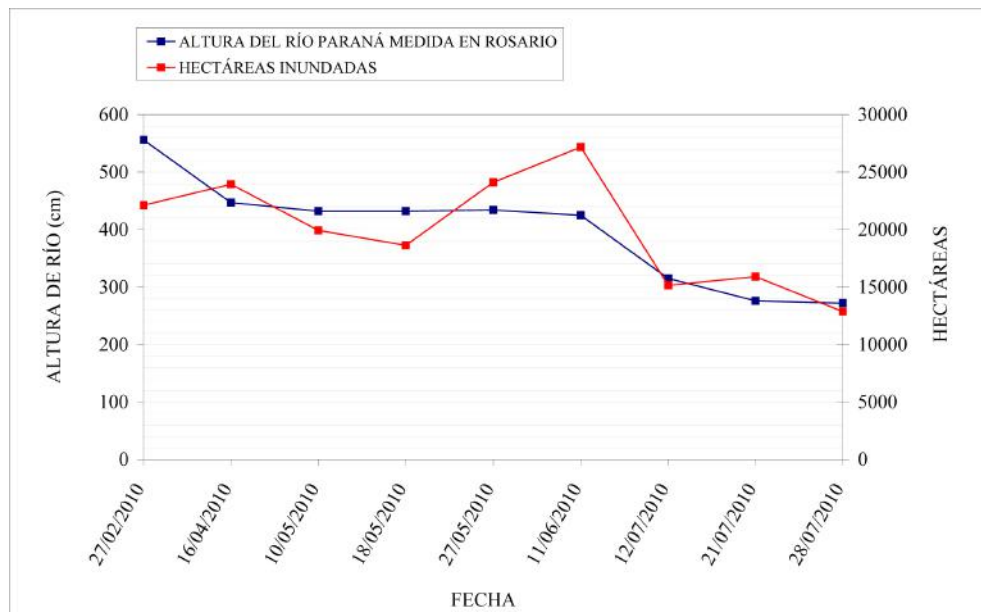


Figura 6.4: Altura del Río Paraná medida en Rosario (Santa Fe) vs. el número de hectáreas inundadas detectadas por conjunto de datos CSK utilizado.

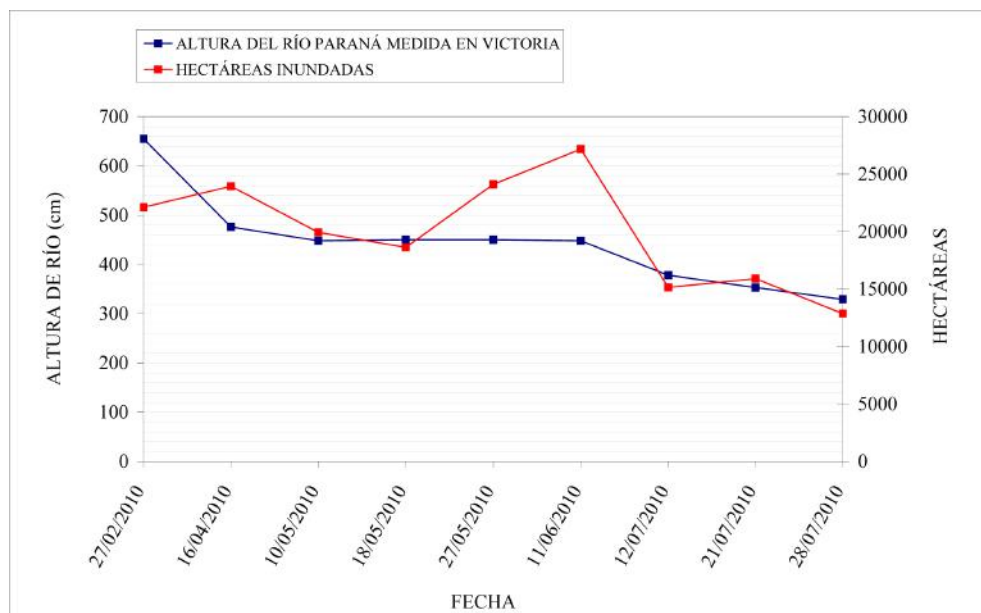


Figura 6.5: Altura del Río Paraná medida en Victoria (Entre Ríos) vs. el número de hectáreas inundadas detectadas por el conjunto de datos CSK utilizado.

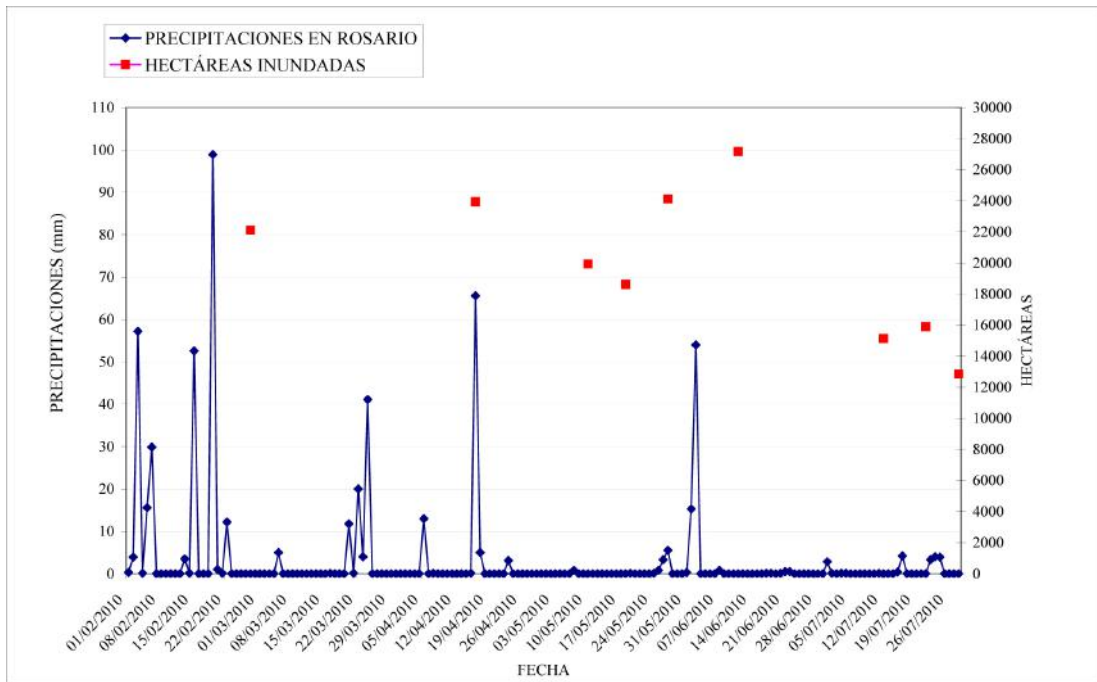


Figura 6.6: Precipitaciones en Rosario vs. el número de hectáreas inundadas detectadas por el conjunto de datos CSK utilizado (Dirección de Hidráulica de Entre Ríos).

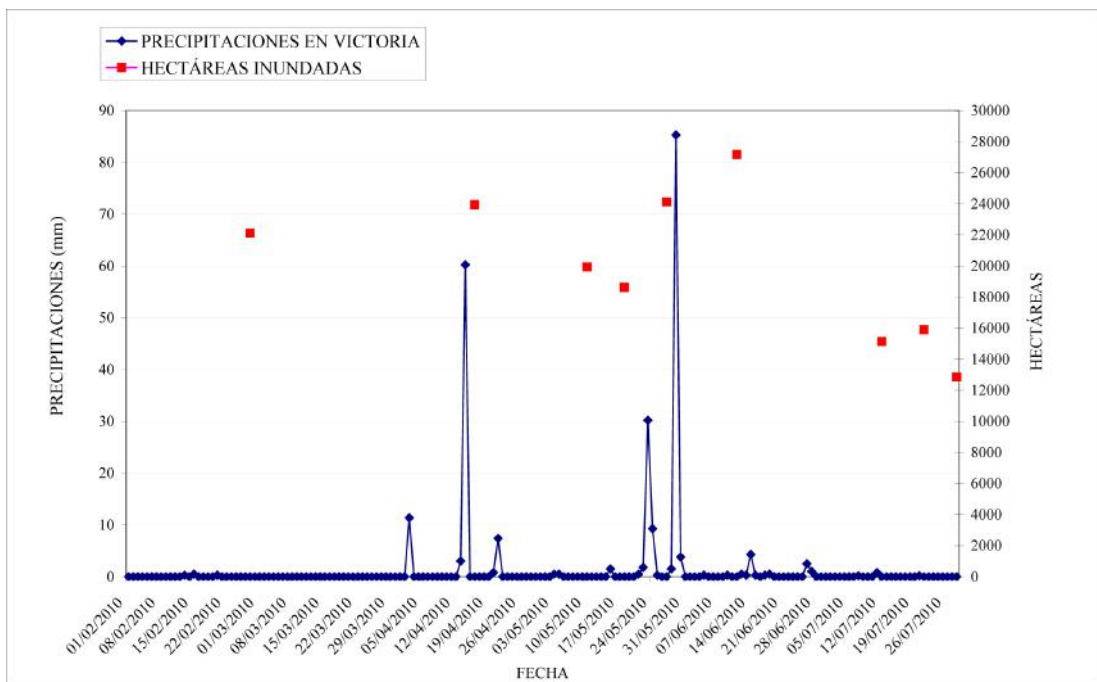


Figura 6.7: Precipitaciones en Victoria vs. el número de hectáreas inundadas detectadas por el conjunto de datos CSK utilizado (Dirección de Hidráulica de Entre Ríos).

De esta información se puede inferir que aunque el río haya tenido su máximo nivel de

altura de aguas en Rosario el día 23 de febrero de 2010 con 558 cm (cap. 2.2.1), el número de hectáreas inundadas para el 27 de febrero (altura de río en Rosario de 556 cm) fue de 22.115, menor que las registradas el día 16/04/2010 con 23.941 hectáreas a una altura de río de 447 cm en Rosario. Esto puede deberse al tiempo de retardo del flujo excedente (pulso) sobre la región. Para el período del 16/04/2010 al 18/05/2010, se observa una relación directa entre el comportamiento del caudal, las alturas del río, las precipitaciones tanto en Rosario como en Victoria, con el número de hectáreas inundadas, variando esta última en función de las primeras. Por el contrario, para el período del 18/05/2010 al 11/06/2010, el área de estudio se vio influenciada por las precipitaciones locales en Rosario y Victoria, incrementándose el número de hectáreas inundadas (sobre todo los bajos topográficos) sin afectación en las lecturas hidrométricas de escala local. Por último, para el período del 11/06/2010 al 28/07/2010 el número de hectáreas inundadas cae en función de la altura de río, su caudal y las precipitaciones.

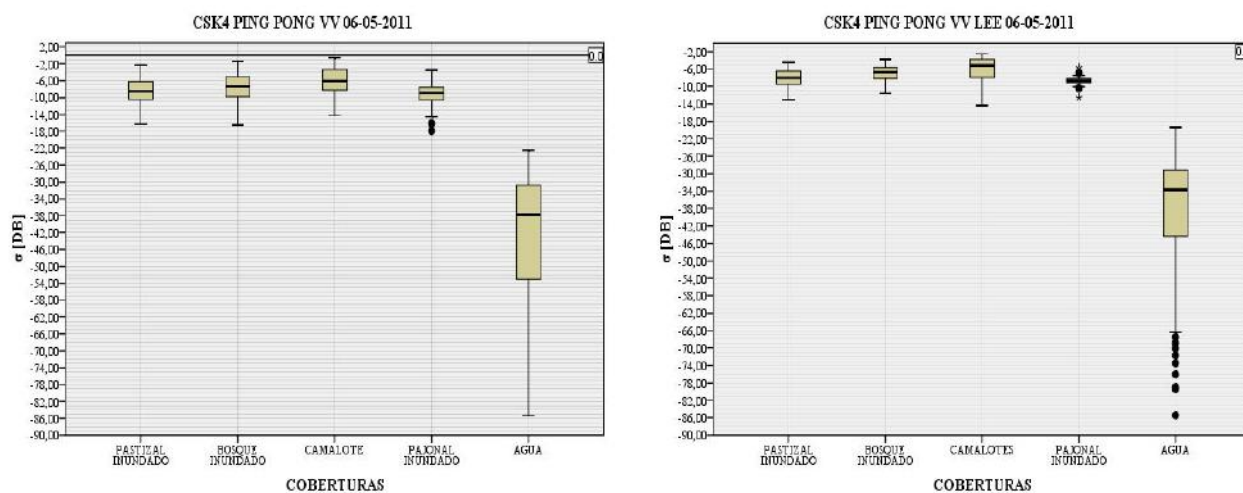
## 6.2. Análisis de estudio de Banda X ante distintas coberturas

Conocer la respuesta del sistema de banda X sobre las coberturas típicas presentes en el área bajo estudio, permitió la generación de una base de datos sobre el comportamiento de la energía retrodispersada para coberturas como: pastizal inundado, bosque inundado, camalotes, pajonal inundado, agua y, para algunas imágenes, áreas urbanas. A partir de la generación de diagramas de cajas se observó dicho comportamiento, y la posibilidad de diferenciar las coberturas a partir de su respuesta ante las ondas electromagnéticas emitidas y recibidas por el sistema radar. Los diagramas de cajas representan: la línea horizontal y el entorno de la caja, indican la mediana y la media respectivamente. Las cajas incluyen un desvío estándar de 2, los bigotes representan el 5% y el 95% de los datos, y los puntos los valores extremos. Es importante aclarar que para su interpretación, fue necesario contar con información técnica del sensor a bordo del satélite y las condiciones ambientales de la escena monitoreada. El nivel de las aguas en Rosario era alto según la referencia explicada anteriormente (valores de altura de río mayores o iguales a 463 cm), y todas las coberturas se encontraban inundadas o semi-inundadas (cap. 5.1.3).

Se generaron para todas las imágenes CSK adquiridas en el año 2011 (cap. 4.3), diagramas de cajas de las imágenes con y sin filtro Lee mejorado. El uso de este filtro, redujo la varianza de las muestras y en algunos casos, incrementó la separabilidad entre ellas.

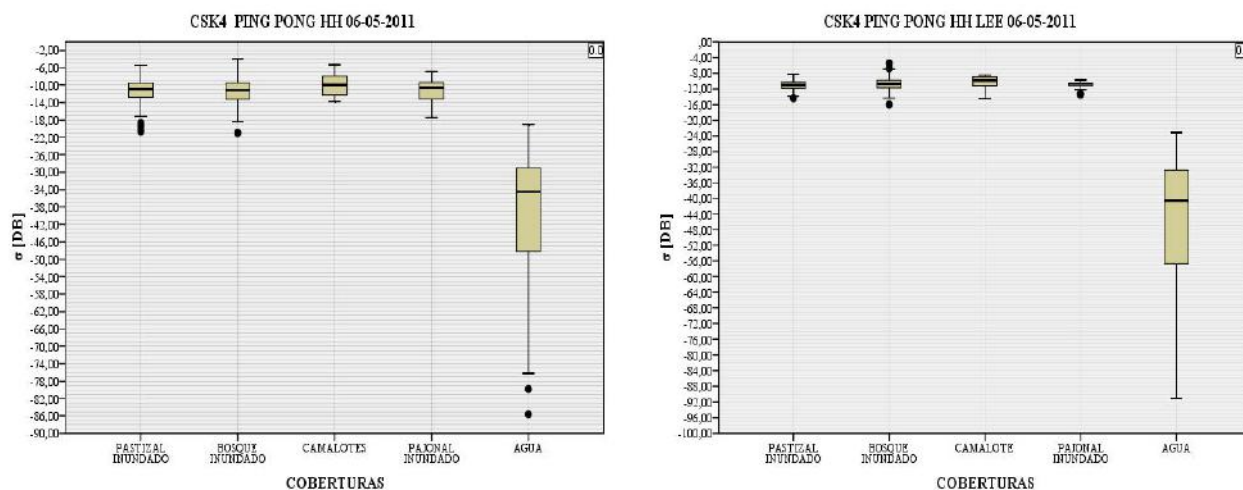
Los diagramas de cajas de la imagen adquirida el día 06-05-2011 en modo PINGPONG con polarización VV, muestran una importante diferenciación entre los valores de retrodisper-

sión de la cobertura de agua y las restantes. Para estas últimas (camalote, bosque inundado, etc.), el comportamiento espectral entre ellas es prácticamente similar (Fig. 6.8). Para las imágenes con el mismo modo de operación, pero con polarización HH, se observa un comportamiento parecido al VV aunque la diferencia espectral entre la clase agua y las restantes es menor (Fig. 6.9).



(a) Modo PING PONG - polarización VV - modo descendente. (b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo PING PONG - polarización VV - modo descendente.

Figura 6.8: Respuesta para el modo de adquisición PINGPONG de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha 06/05/2011.

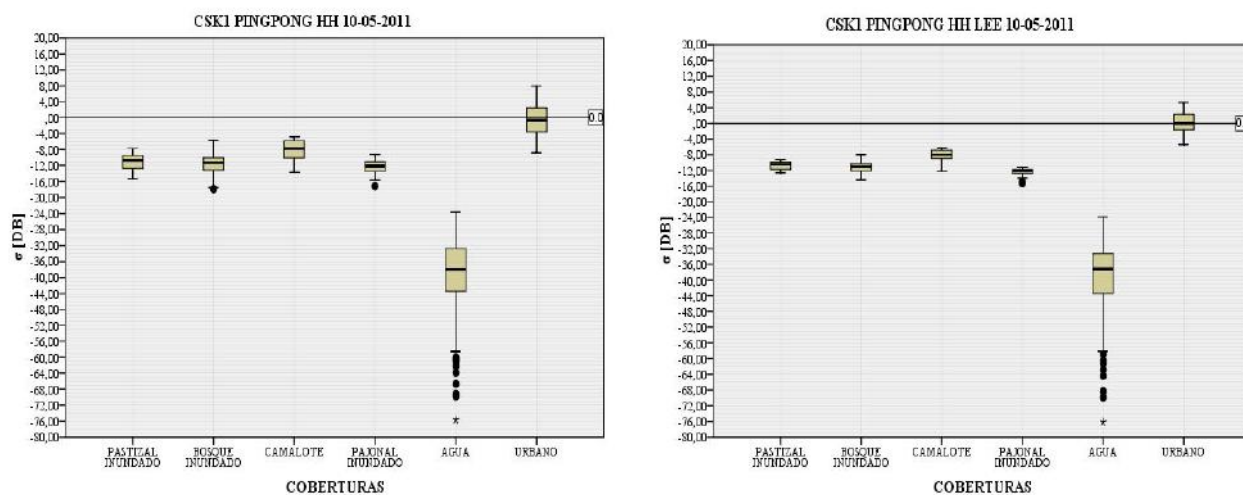


(a) Modo PING PONG - polarización HH - modo descendente. (b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo PING PONG - polarización HH - modo descendente.

Figura 6.9: Respuesta para el modo de adquisición PINGPONG de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha 06/05/2011.



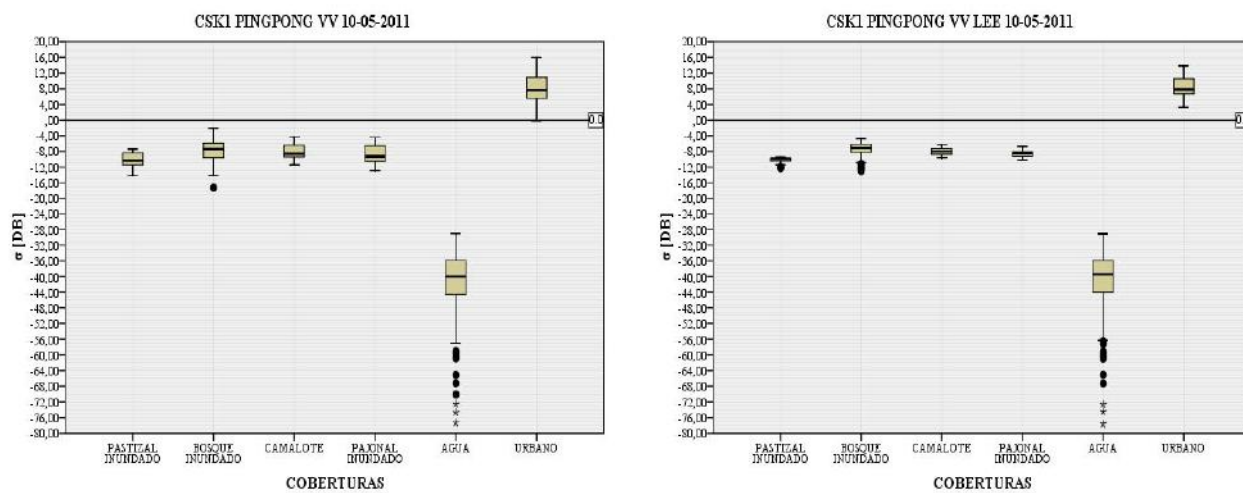
Los diagrama de cajas representando al comportamiento espectral de las imágenes adquiridas el día 10-05-2011, muestran para la polarización HH y VV un comportamiento de las coberturas como el explicado anteriormente, pero incorporándose la cobertura “urbano” que posee una respuesta espectral alta en relación a las demás. Dicha respuesta es aún mayor para la polarización VV (Fig.6.10 y 6.11)



(a) Modo PING PONG - polarización HH - modo descendente.

(b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo PING PONG - polarización HH - modo descendente.

Figura 6.10: Respuesta para el modo de adquisición PINGPONG de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha 10/05/2011.

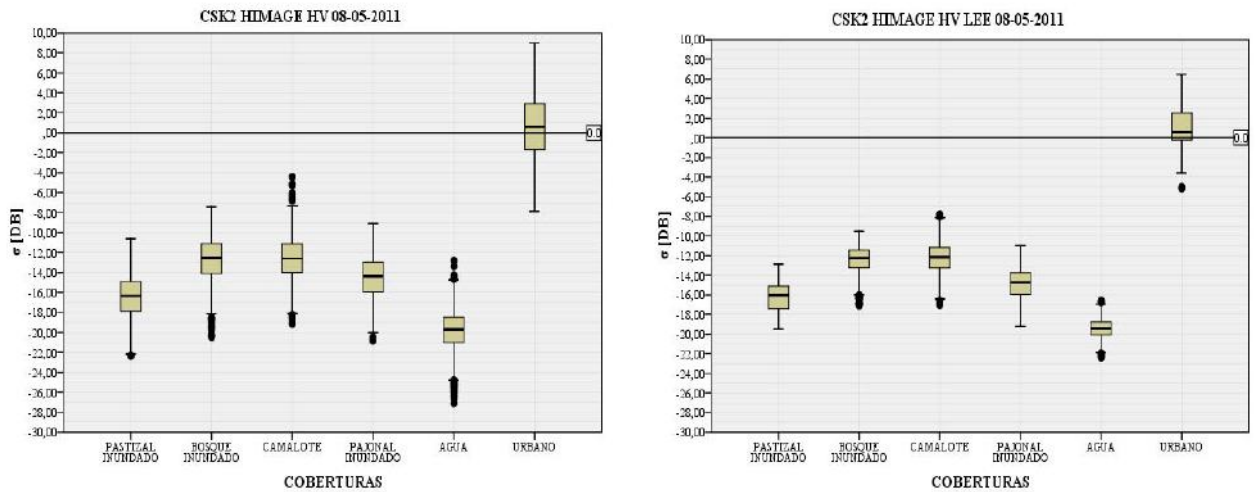


(a) Modo PING PONG - polarización VV - modo descendente.

(b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo PING PONG - polarización VV - modo descendente.

Figura 6.11: Respuesta para el modo de adquisición PINGPONG de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha 10/05/2011.

Los diagramas de cajas correspondiente a la imagen adquirida el 08-05-2011 en modo HIMAGE con polarización HV, muestran valores para las coberturas pastizal inundado, bosque inundado, camalote y pajonal inundado, inferiores a los adquiridos en modo PINGPONG explicados anteriormente, evidenciando una superposición de valores ( $\sigma_{DB}$ ), incluso también para la clase agua (aunque de menor forma) (Fig. 6.12).

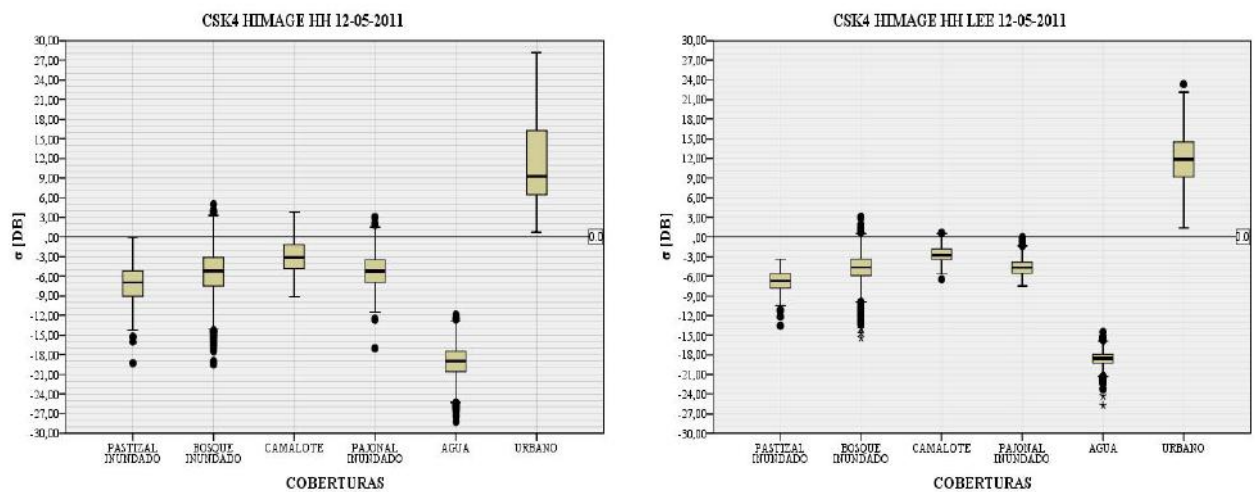


(a) Modo HIMAGE - polarización HV - modo ascendente.

(b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo HIMAGE - polarización HV - modo ascendente.

Figura 6.12: Respuesta para el modo de adquisición HIMAGE de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha 08/05/2011.

Por último, la imagen adquirida el día 12-05-2011 en modo HIMAGE, polarización HH (Fig. 6.13), muestra un incremento de  $\sigma_{DB}$  en todas las coberturas con superposición de valores, aunque para la clase urbano y más aún para la clase agua, la separación de sus valores es mayor que para la polarización HV en modo HIMAGE explicada anteriormente .



(a) Modo HIMAGE - polarización HH - modo ascendente.

(b) Imagen con filtro LEE mejorado, modo HIMAGE - polarización HH - modo ascendente.

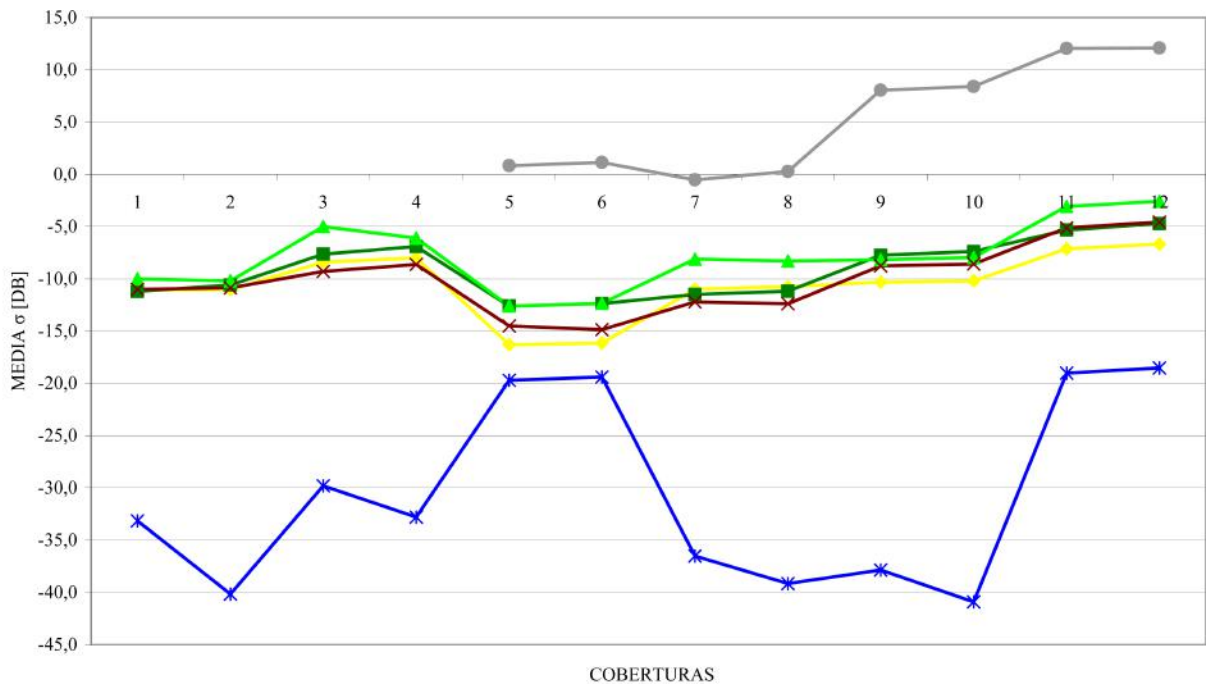
Figura 6.13: Respuesta para el modo de adquisición HIMAGE de la energía retrodispersada por las distintas coberturas para la fecha de adquisición 12/05/2011.

La tabla 6.2 muestra los valores del comportamiento espectral de las coberturas graficadas por los diagramas de cajas recientemente explicados, incluyendo además características básicas de las imágenes como el modo de adquisición, polarización, uso de filtro Lee, ángulo de incidencia y dirección de órbita.

Tabla 6.2: Respuesta de la energía retrodispersada para distintas coberturas.

ID	Fecha de la imagen	Modo de adquisición	Pol	Filtro LEE	Áng. Inc.	Dirección de órbita	Respuesta energía electrodispersada $\sigma$ [DB]																														
							Pastizal inundado			Bosque inundado			Camalote			Pajonal inundado			Agua			Urbano															
							Min.	Med.	Dev.	Min.	Med.	Dev.	Min.	Med.	Dev.	Min.	Med.	Dev.	Min.	Med.	Dev.	Min.	Med.	Dev.													
1	06/05/2011	PING PONG	HH		40	Descendente	-20,5	-5,4	-11,1	2,6	-20,9	-3,9	-11,2	3,1	-13,7	-5,2	-10,0	2,6	-17,4	-6,8	-11,0	2,5	-85,6	-18,7	-33,2	22,3											
2	06/05/2011	PING PONG	HH	*	40	Descendente	-14,4	-8,2	-11,0	1,2	-16,0	-5,4	-10,6	1,5	-14,5	-8,4	-10,2	1,5	-13,5	-9,7	-10,9	0,8	-91,0	-23,2	-40,2	17,3											
3	06/05/2011	PING PONG	VV		40	Descendente	-16,3	-2,3	-8,4	2,9	-16,6	-1,4	-7,6	3,4	-14,3	-0,5	-5,0	3,6	-17,9	-3,5	-9,3	2,7	-85,4	-22,5	-29,8	25,5											
4	06/05/2011	PING PONG	VV	*	40	Descendente	-13,0	-4,4	-8,0	1,8	-11,6	-3,7	-6,9	1,8	-14,3	-2,6	-6,1	2,7	-12,6	-5,7	-8,6	0,9	-85,4	-19,1	-32,8	19,3											
5	08/05/2011	HIMAGE	HV		40	Ascendente	-22,3	-10,6	-16,3	2,2	-20,4	-7,4	-12,6	2,1	-19,1	-4,4	-12,6	2,2	-20,8	-9,1	-14,5	2,2	-27,1	-12,8	-19,7	1,8	-7,85	8,97	0,83	3,23							
6	08/05/2011	HIMAGE	HV	*	40	Ascendente	-19,5	-12,9	-16,2	1,5	-17,1	-9,5	-12,4	1,3	-17,0	-7,8	-12,3	1,7	-19,2	-10,9	-14,9	1,7	-22,4	-16,6	-19,4	0,9	-5,2	6,5	1,1	2,3							
7	10/05/2011	PING PONG	HH		40	Descendente	-15,4	-7,7	-11,0	2,1	-17,8	-5,7	-11,5	2,3	-13,7	-4,7	-8,1	2,6	-17,1	-9,2	-12,2	1,8	-75,7	-23,7	-36,5	12,8	-8,8	8,0	-0,5	3,8							
8	10/05/2011	PING PONG	HH	*	40	Descendente	-12,7	-9,3	-10,7	1,0	-14,5	-8,0	-11,2	1,4	-12,1	-6,4	-8,3	1,6	-15,3	-11,2	-12,4	0,9	-76,1	-23,8	-39,2	8,5	-5,4	5,3	0,3	2,6							
9	10/05/2011	PING PONG	VV		40	Descendente	-14,3	-7,4	-10,3	1,9	-17,3	-2,1	-7,7	2,6	-11,4	-4,3	-8,2	1,9	-13,0	-4,5	-8,8	2,4	-77,3	-28,8	-37,9	13,4	-0,2	16,0	8,1	3,5							
10	10/05/2011	PING PONG	VV	*	40	Descendente	-12,3	-9,5	-10,2	0,7	-13,0	-4,8	-7,4	1,7	-9,6	-6,3	-8,0	0,9	-10,2	-6,8	-8,6	0,8	-77,6	-29,0	-40,9	7,5	3,2	13,9	8,4	2,6							
11	12/05/2011	HIMAGE	HH		40	Ascendente	-19,3	-0,1	-7,1	2,8	-19,5	5,0	-5,3	3,4	-9,1	3,8	-3,1	2,5	-17,0	3,0	-5,1	2,6	-28,3	-11,8	-19,0	2,4	-0,6	23,3	12,0	5,2							
12	12/05/2011	HIMAGE	HH	*	40	Ascendente	-13,6	-3,4	-6,7	1,6	-15,4	3,1	-4,7	2,3	-6,5	0,6	-2,6	1,1	-7,5	0,0	-4,6	1,3	-25,7	-14,5	-18,5	1,0	1,4	23,3	12,1	4,5							

La figura 6.14 muestra el comportamiento de la media espectral calculada para cada cobertura según las características descritas en la tabla 6.2 identificadas mediante el número de ID. Para el modo PINGPONG (cap 4.3), los valores de retrodispersión más elevados para la coberturas pastizal inundado, bosque inundado, camalote y pajonal inundado, se observaron en la polarización VV. La cobertura agua presentó los valores de retrodispersión más bajos en HH, aunque también se observaron en los ID 9 y 10 (VV) valores similares a los HH, esto puede deberse a la presencia o ausencia de vientos en la zona el día de adquisición generando una mayor rugosidad en la superficie acuática. En el modo HIMAGE, las coberturas pastizal inundado, bosque inundado, camalote y pajonal inundado, presentaron los valores más bajos de retrodispersión en polarización HV en comparación a HH. Para la cobertura agua, se registraron valores similares tanto para HV como para HH. Por último, la cobertura urbano tuvo los valores de retrodispersión más elevados en el modo HIMAGE con polarización HH.



ID	Fecha de la imagen	Modo de adquisición	Pol	Filtro LEE	Áng. Inc.	Dirección de órbita	ID	Fecha de la imagen	Modo de adquisición	Pol	Filtro LEE	Áng. Inc.	Dirección de órbita	ID	Fecha de la imagen	Modo de adquisición	Pol	Filtro LEE	Áng. Inc.	Dirección de órbita
1	06/05/2011	PING PONG	HH		40	Descendente	5	08/05/2011	HIMAGE	HV		40	Ascendente	9	10/05/2011	PING PONG	VV		40	Descendente
2	06/05/2011	PING PONG	HH	*	40	Descendente	6	08/05/2011	HIMAGE	HV	*	40	Ascendente	10	10/05/2011	PING PONG	VV	*	40	Descendente
3	06/05/2011	PING PONG	VV		40	Descendente	7	10/05/2011	PING PONG	HH		40	Descendente	11	12/05/2011	HIMAGE	HH		40	Ascendente
4	06/05/2011	PING PONG	VV	*	40	Descendente	8	10/05/2011	PING PONG	HH	*	40	Descendente	12	12/05/2011	HIMAGE	HH	*	40	Ascendente

Figura 6.14: Comportamiento de la media espectral de cada cobertura.

# Capítulo 7

## Conclusiones

A partir del uso de técnicas de percepción remota, se generó cartografía temática correspondiente a la inundación del año 2010 en el Delta superior del Río Paraná, pudiéndose identificar la propagación de las zonas cubiertas por agua. También se produjo información sobre la respuesta de la energía retrodispersada de las coberturas “típicas” presentes en el área de estudio, para los modos de operación HIMAGE y PINGPONG del satélite Cosmo SkyMed, con y sin aplicación de técnicas de filtrado.

El uso de imágenes Cosmo SkyMed permitieron monitorear la inundación. El sistema radar utilizado, obtuvo imágenes de la zona bajo estudio independientemente de las condiciones climáticas. Las principales características del sensor como su alta resolución espacial y temporal, brindaron información de gran detalle a una alta frecuencia de revisita. El sensor, al poseer un ángulo de adquisición de datos de 40° de inclinación, favoreció al efecto de reflexión especular, obteniéndose información de alto contraste entre los cuerpos de agua y las restantes coberturas.

La metodología implementada para la identificación de zonas cubiertas por agua, logró obtener resultados más precisos que los realizados por una clasificación no supervisada ISODATA. Dichos resultados se verificaron a partir de información relevada en campo.

Áreas semicubiertas por agua, debido a su alta respuesta de la energía retrodispersada percibida por el radar, no pudieron ser clasificadas como tal, detectándose solo las zonas cubiertas por agua superficial.

Se corroboró que para el sistema de banda X, existe una gran confusión de los valores de energía retrodispersada para coberturas tales como: camalotes, pastizales inundados, pajonales inundados y bosques inundados, limitando esto a su identificación y clasificación por medio de su respuesta ante el pulso eléctrico emitido y recibido por el radar.

Se considera relevante la cartografía producida para el área bajo estudio, pese a que existieron zonas semicubiertas por agua que no pudieron ser detectadas como tal. El mecanismo

de interacción dominante fue el de reflexión especular, haciendo esto posible la identificación de áreas cubiertas por agua pero no aquellas cubiertas por vegetación o bosques con suelos inundados.

Para un mejor monitoreo de la inundación, hubiese sido de gran importancia contar con un mayor número de imágenes CSK logrando una mejor cobertura temporal del evento.

La información generada por esta investigación, permite contar con datos de referencia para estudios que utilicen este tipo de sistema de radar (Banda X) en ambientes como el estudiado.

## 7.1. Consideraciones Finales

Se destaca la originalidad del trabajo fundamentada en:

1. El sistema de Banda X que permite una observación sistemática bajo cualquier condición climática.
2. La constelación SIASGE - COSMO SkyMed que proporciona a una alta resolución espacial, la máxima revisita SAR en la actualidad.

Además, la metodología desarrollada tuvo como consecuencias:

1. Una clasificación supervisada verificada en campo.
2. Una serie cartográfica de áreas inundadas con la mayor precisión espacial hasta la actualidad.
3. El desarrollo de una metodología de procesamiento SAR en ambientes característicos de los grandes Deltas pudiéndose aplicar en ambientes similares.

Como trabajo a futuro, se podría verificar a partir del uso de otros filtros espaciales y, si es posible o no, mejorar la clasificación espectral para el sistema de Banda X de las coberturas típicas presentes en el Delta; y utilizar otro sistema de Radar como por ejemplo bandas C y L, y corroborar la precisión de la metodología propuesta.

Del uso de otro sistema de radar como complemento del sistema Banda X, surge la necesidad del sistema SIASGE. Se prevee que dicho sistema sea una herramienta potente entre otras cosas, para el monitoreo y estudio de áreas inundadas. El mismo conforma una constelación de satélites Italo-Argentino para beneficio de la sociedad, gestión de emergencias y desarrollo económico, conformado por 4 satélites Cosmo SkyMed y 2 SAOCOM (satélite argentino de radar

de Banda L a lanzarse en los años 2014 y 2015). Este convenio de cooperación entre ambos países, brindará un importante volumen de datos para el monitoreo y estudio de emergencias ambientales, por este motivo, es de suma importancia el desarrollo de metodologías operativas para la generación de sistemas de alerta temprana a emergencias.



# Bibliografía

- Abrams, M., Hook, S., & Ramachandran, B. (2002). *ASTER User Handbook version 2*. Recuperado de [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_documents/aster_user_guide_v2.pdf) el 08/04/2011.
- Ariza López, F., Pinilla Ruiz, C., López Luque, R., & Borque Arancón, M. J. (1996). *Control de calidad del proceso de clasificación de imágenes de satélite*. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. Recuperado de [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=834](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=834) el 31/07/2011.
- Basterra, N. I., Valiente, M. A., & Glibota, G. (s/f). *Evaluación del riesgo ambiental por inundación con SIG del valle fluvial del Río Paraná próximo a los núcleos urbanos de Resistencia y Corrientes*. Centro de Gestión Ambiental y Ecología (CEGAE). Recuperado de <http://www.ign.gob.ar/descargas/sig/Publicaciones%20pdf/27.pdf> el 04/02/2011.
- Bustamante, J., Diaz Delgado, R., & Aragonés, D. (2005). *Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección*. Recuperado de [http://www.64.233.169.104/search?q=cache:iEsKxsbUiTcJ:www2.ebd.csic.es/ee/publi/Bustamante\\_etal\\_2005.pdf+indice+normalizado+de+agua+NDWI&hl=es&ct=clnk&cd=2&gl=ar](http://www.64.233.169.104/search?q=cache:iEsKxsbUiTcJ:www2.ebd.csic.es/ee/publi/Bustamante_etal_2005.pdf+indice+normalizado+de+agua+NDWI&hl=es&ct=clnk&cd=2&gl=ar) el 06/02/2010.
- Chavez, P. S. (1989). *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of the Environment. N° 24: pp. 459-479.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: CD-Room Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Madrid: Ariel ciencia.
- Curlander, J. C. & Mc Donough, R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar. System and Signal Processing*. EE.UU. Wiley Interscience.

- Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (2010). *Precipitaciones-datos históricos*. Recuperado de <http://www.hidraulica.gov.ar/precipitacionesHistorico.php> el 16/06/2011.
- E-geos (2011). *Calibration Cosmo Sky Med*. Agencia Espacial Italiana/Compañía Teleespacio. Recuperado de [http://www.e-geos.it/products/pdf/COSMO-SkyMed-Image\\_Calibration.pdf](http://www.e-geos.it/products/pdf/COSMO-SkyMed-Image_Calibration.pdf) el 10/05/2011.
- Edrosa, R., Soldano, A., & Serafini, C. (2008). *Generación de cartografía sobre susceptibilidad a inundación en las islas del delta superior y medio del Río Paraná*. SELPER. XII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. Desastres Naturales y antrópicos. Evaluación y gestión del riesgo. La Habana, Cuba. ISBN: 978 959 247 0637. Spanish.
- Eliezer, B. (2009). *Taller Ecologista. Islas del Paraná: la última frontera. La ley de Arrendamiento de Entre Ríos y el Proceso de Ocupación de los Humedales del Delta*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/13137673/La-Ultima-Frontera1> el 02/07/2009.
- Giraut, M., Minotti, P., & Ludueña, S. (2002). *Integración de Imágenes SAC-C, Landsat y Spot Pancromático para la Determinación de Susceptibilidad Hídrica*. Recuperado de [http://www.hidricosargentina.gov.ar/selper\\_bol\\_giraut.pdf](http://www.hidricosargentina.gov.ar/selper_bol_giraut.pdf) el 10/12/2008.
- Goniadzki, D., Borús, J., Almeira, G., & Giordano, L. (2010). *Cuenca del Plata. Breve Caracterización de la Emergencia 2009/2010*. Recuperado de [www.yacyreta.org.ar/pdf/hidrologia/2010/Escenario2010ABR.doc](http://www.yacyreta.org.ar/pdf/hidrologia/2010/Escenario2010ABR.doc) el 04/04/2011.
- Instituto Nacional del Agua (2011). Sistema de información y alerta hidrológico. Recuperado de <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=siyah> el 04/03/2011.
- Laur, H., Bally, P., Meadows, P., Sanchez, J., Schaettler, B., Lopinto, E., & Esteban, D. (2004). *Derivation of the Backscattering Coefficient in ESA ERS SAR PRI Products*. Recuperado de [http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ers\\_sar\\_calibration\\_issue2\\_5f.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ers_sar_calibration_issue2_5f.pdf) el 14/03/2011.
- Lopes, A., Touzi, R., & Nezry, E. (1990). *Adaptative Speckle Filters and Scene Heterogeneity*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.
- Lopez-Martinez, C., Ferro-Famil, L., & Pottier, E. (2005). *Single vs. Multi Polarization SAR*. Paris: European Space Agency. Recuperado de <http://earth.esa.int/polsarpro/tutorial.html> el 06/04/2011.
- Lopinto, E. (2010). *An Introduction to the Synthetic Aperture Radar*. Course of the Italian Space Agency 2010.

- Neiff, J. J. (1997). *El Régimen de Pulsos en Ríos y Grandes humedales de Sudamérica*. Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos. Malvárez, A.I. y P. Kandus (eds.), ORCYT-MAB (UNESCO), Montevideo, Uruguay.
- Parmuchi, M., Karszenbaum, H., & Kandus, P. (2002). *Mapping Westland using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier*. Remote Sensing. Vol. 28. Nro. 2, pag. 175-186.
- Portal Cuenca del Plata - Gran Chaco (2009). *La cuenca del Plata*. Recuperado de <http://www.cuencadelplata-granchaco.org/cuenca-del-plata/> el 10/03/2011.
- Prat, M., Salomon, J., Gentile, E., & Natenzon, C. (1998). *El Delta del Paraná. Aspectos naturales y antrópicos*. Bordeaux: Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée.
- Sabins, F. F. (2000). *Remote Sensing Principles and Interpretation*. 3d ed. United States of America: FREEMAN.
- Salvia, M. (2010). *Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del macro-sistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos*. Recuperado de [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_4691\\_Salvia.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_4691_Salvia.pdf) el 03/02/2011.
- Satellite Imaging Corporation. (2010). *ASTER Satellite Imagery*. Recuperado de <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/aster.html> el 20/12/2008.
- SØlbo, S., Pettinato, S., Paloscia, S., Santi, E., Brusotti, P., & I., S. (s/f). *Mapping of Flooding in The Alessandria Area with ERS*. Recuperado de [www.norut.no/content/download/565263/1232251/.../IT811-7-04.pdf](http://www.norut.no/content/download/565263/1232251/.../IT811-7-04.pdf) el 03/03/2011.
- Smith, A. (2004). *University of Idaho. How to convert ASTER Radiance Values to Reflectance*. Recuperado de <http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984> el 30/03/2011.
- Solbø, S., E., M., Guneriussen, I., & Eltoft, T. (2003). *Mapping surface-water with Radarsat at arbitrary incidence angles*.
- Soldano, A. (2007). *Aplicación de la teledetección en emergencias hidrológicas*. Recuperado de <http://hydriaweb.com.ar/kb/entry/121/> el 20/12/2010.
- Soldano, A., Giraut, M., & Goniadzki, D. (2004). *Mapa de Suceptibilidad Urbana Ante Inundaciones, Caso: Ciudad de Goya, Provincia de Corrientes*. Recuperado de <http://www.rimd.org/advf/documentos/4922eda73d020.pdf> el 10/07/2009.
- Space Ref. (s/f). *Vandenberg AFB Delta II Launch Successful*. Recuperado de <http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=22804> el 28/03/2011.

- SSPYVN (2008). *Planos de Reducción*. Ministerio de Obras Públicas. Inversión Pública y Servicios. Subsecretaría de Transporte de la Nación. Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables.
- Takeuchi, W. & Yasuoka, Y. (2005). *Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data*. Journal of the Japan Society of Photogrametry and Remote Sensing, N°6 (43): pp. 7-19.
- Telespazio. (s/f). *Satélites COSMO-SkyMed*. Recuperado de <http://www.aurensis.com/page.php?id=354&lang=ESP> el 29/03/2011.
- Thome, K., Biggar, S., & Slater, P. (2001). *Effects of assumed solar spectral irradiance on intercomparisons of earth-observing sensors*. Proceedings SPIE Vol. 4540, pp 260-269; Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites, H. Fujisada, J. Lurie, and K. Weber, Eds.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981a). *Microwave Remote Sensing Active and Passive*. (Vol. 1) Artech House.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981b). *Microwave Remote Sensing Active and Passive*. (Vol. 2) Artech House.
- UNESCO (2011). *Environment and development in coastal regions and in small islands. Introduction to Remote Sensing of Coastal Environments. Electromagnetic radiation*. Recuperado de <http://www.unesco.org/csi/pub/source/rs8.htm> el 25/07/2011.
- UNISDR (2004). *International Strategy for Disaster*. Recuperado de <http://www.unisdr.org/eng/countryinform/argentina-disaster.htm>. el 25/03/2011.
- Zucol, A. F., Brea, M., Lutz, A., & Anzotegui, M. L. (2004). *Aportes al conocimiento de la paleobiodiversidad del Cenozoico superior del Litoral argentino: Estudios paleoflorísticos*. Serie Miscelánea. INSUGEO 12: pp. 91-101.

## Capítulo 8

# ANEXO: Cartografía Elaborada

El siguiente anexo muestra la cartografía hídrica superficial generada mediante técnicas de percepción remota del todo el conjunto de datos utilizado para la inundación del año 2010.

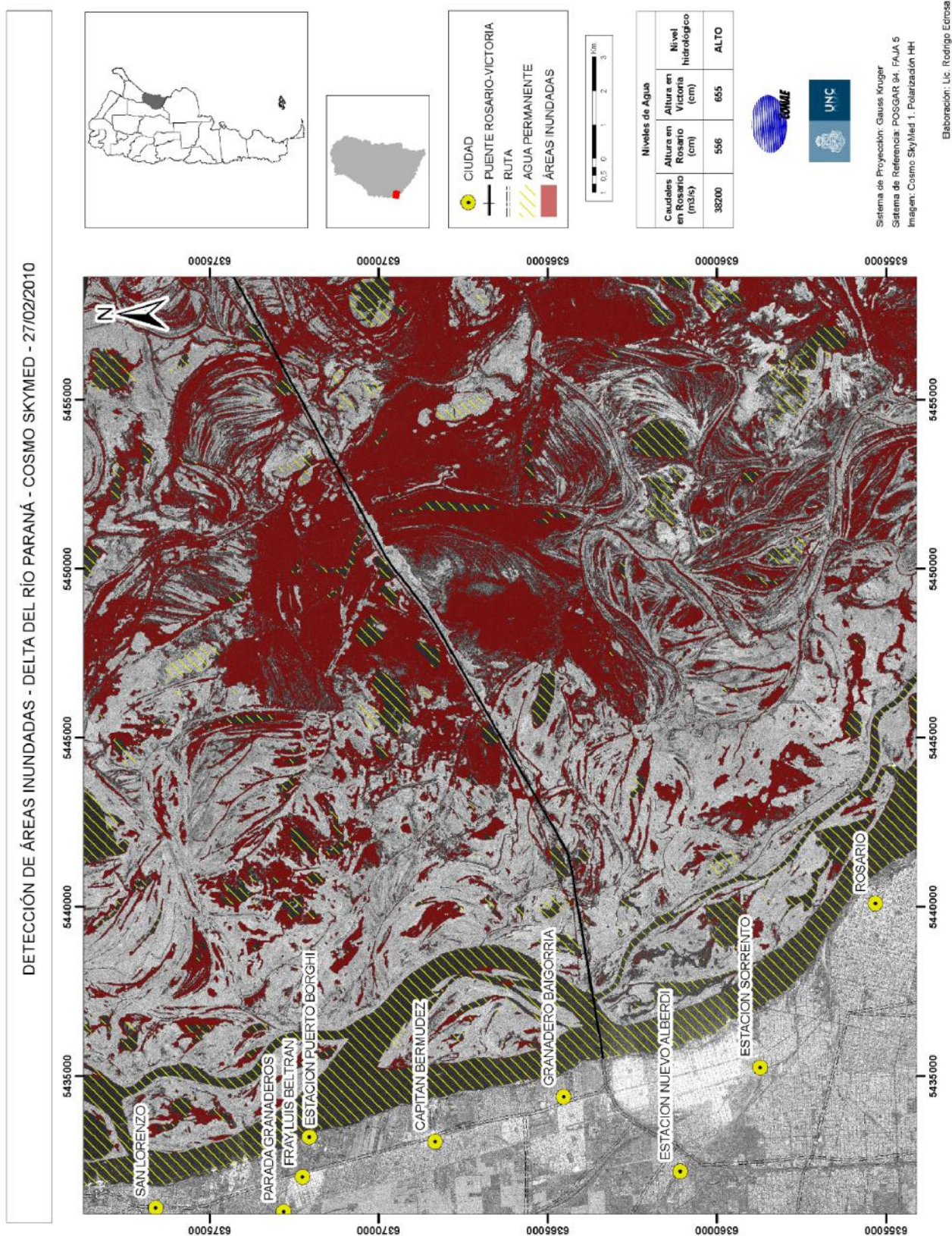


Figura 8.1: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 27/02/2010.

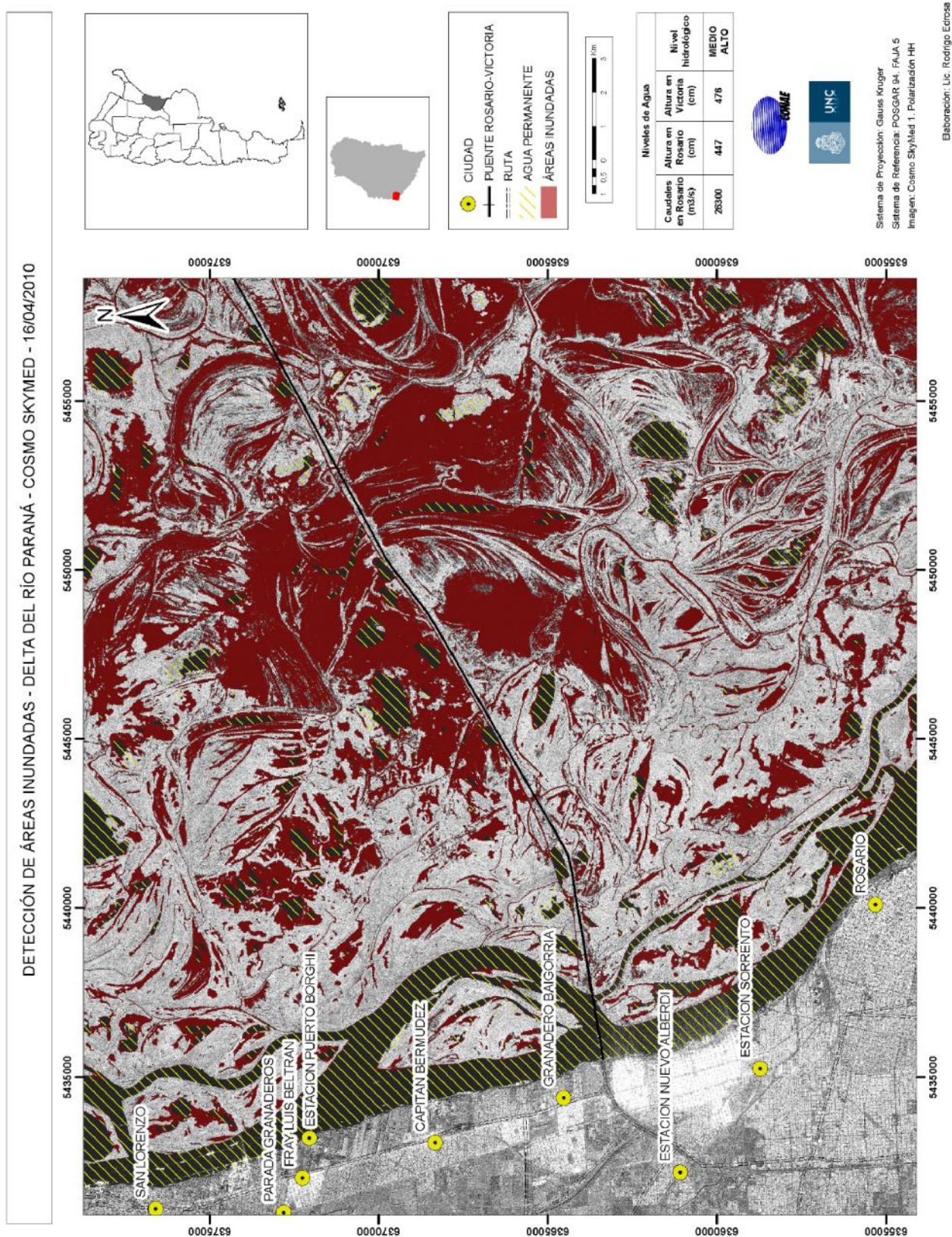


Figura 8.2: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 16/04/2010.

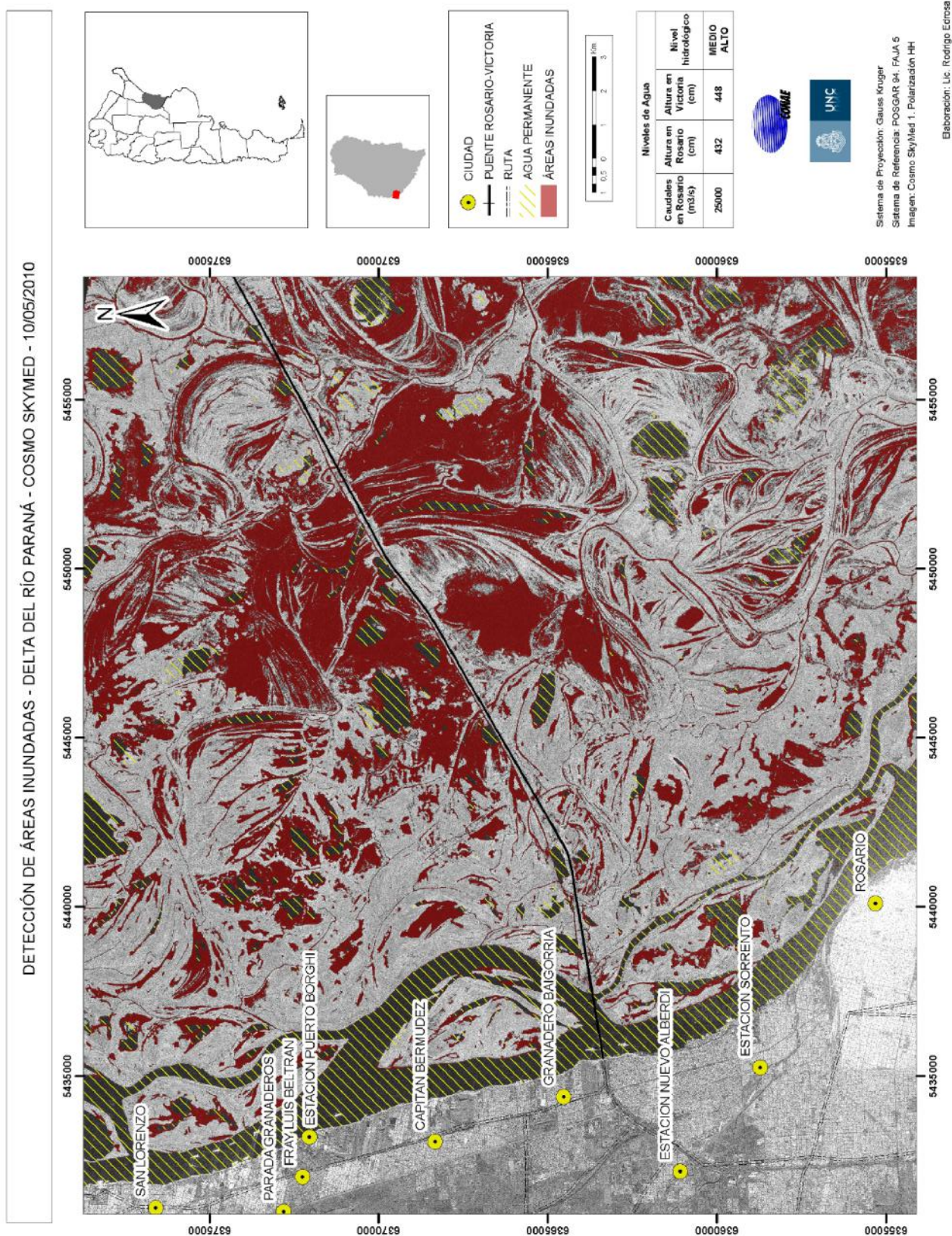


Figura 8.3: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 10/05/2010.



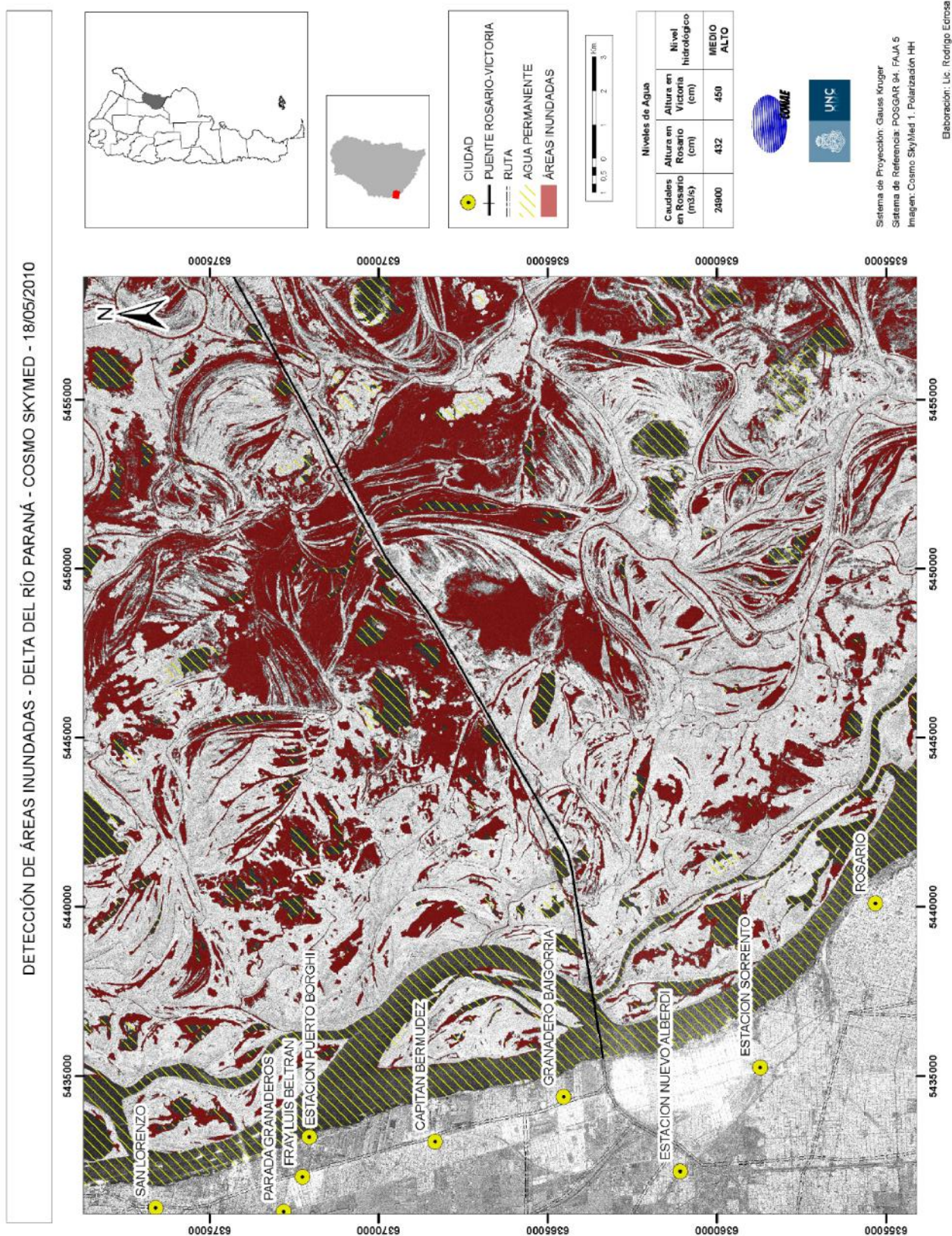


Figura 8.4: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 18/05/2010.

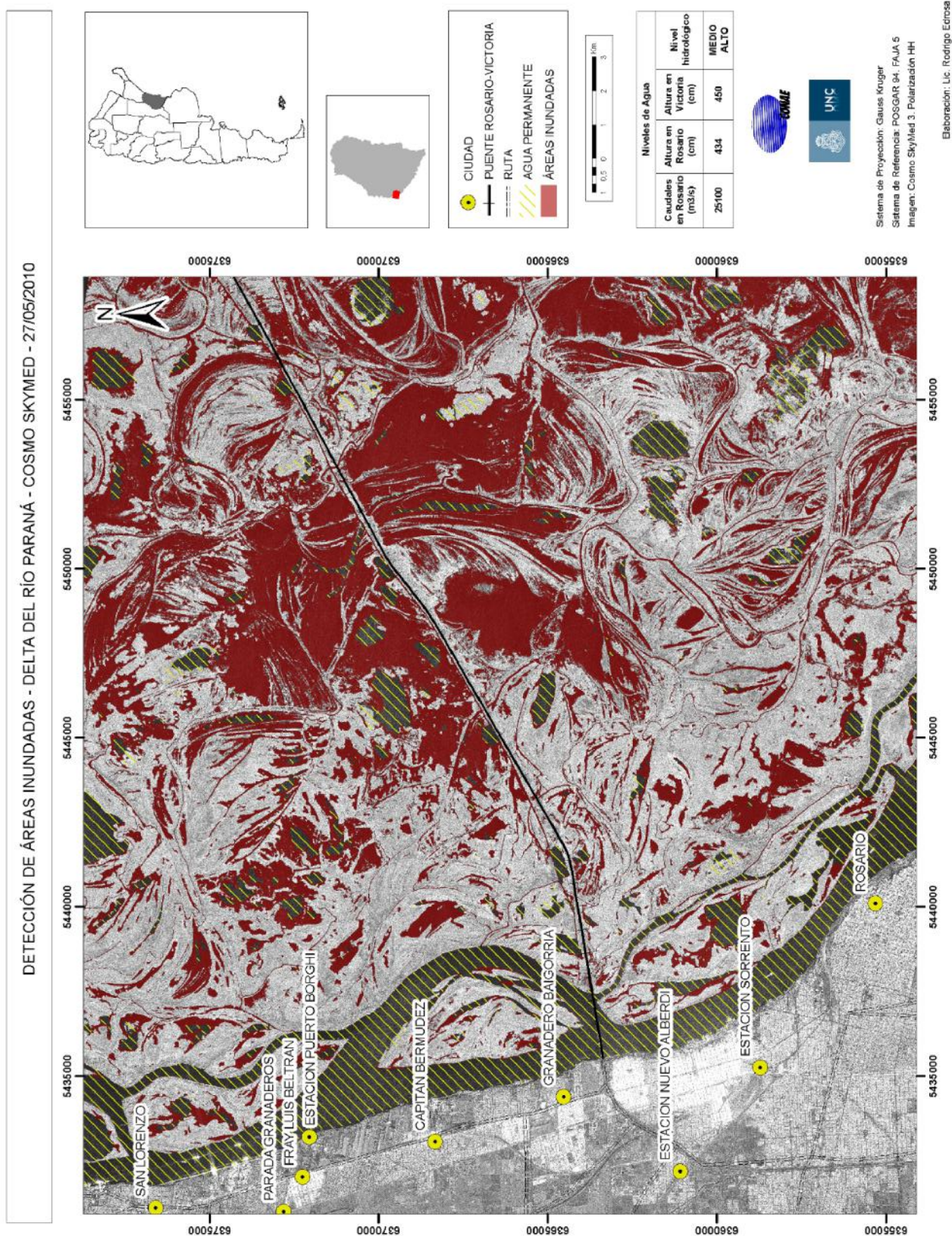


Figura 8.5: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 27/05/2010.

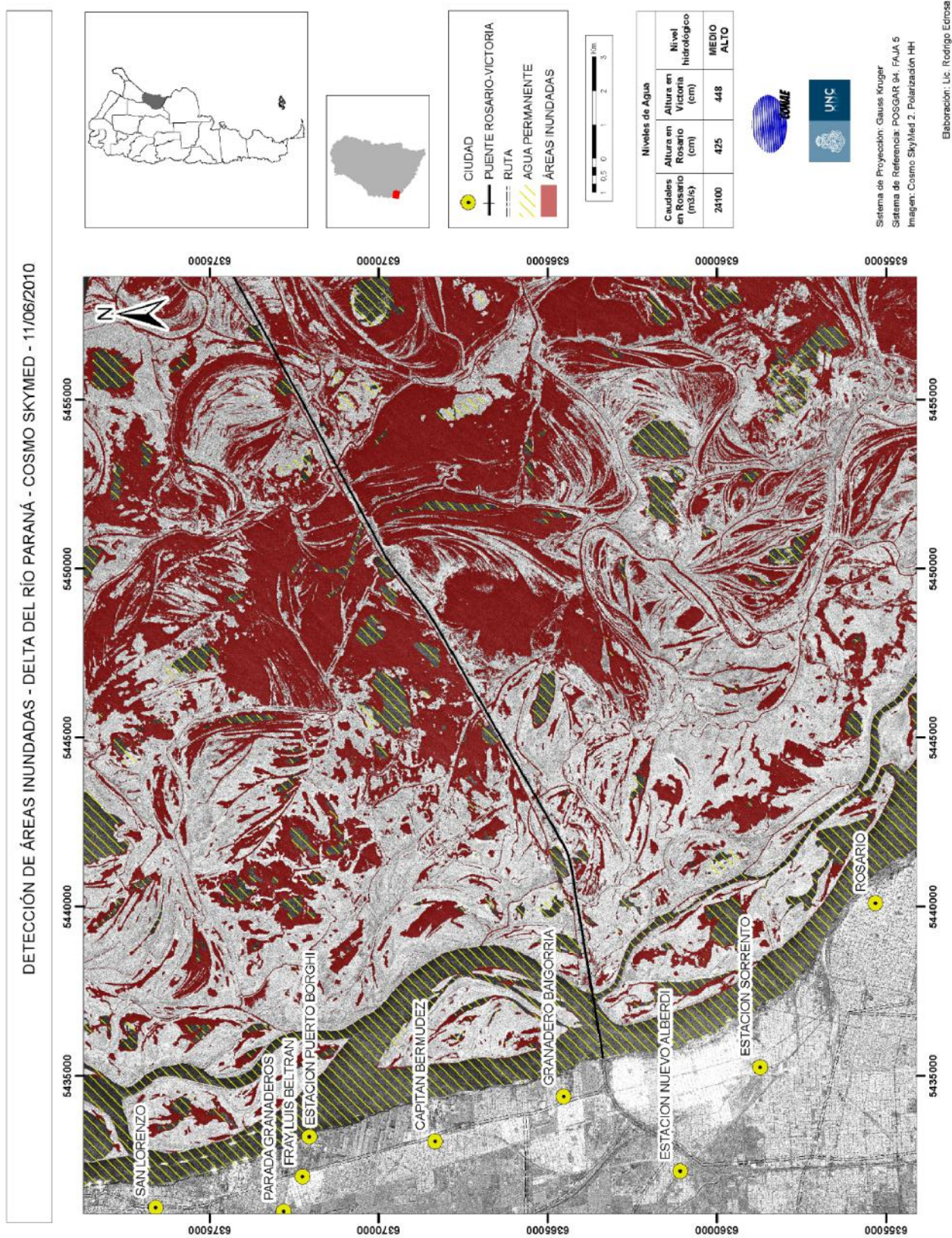


Figura 8.6: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 11/06/2010.

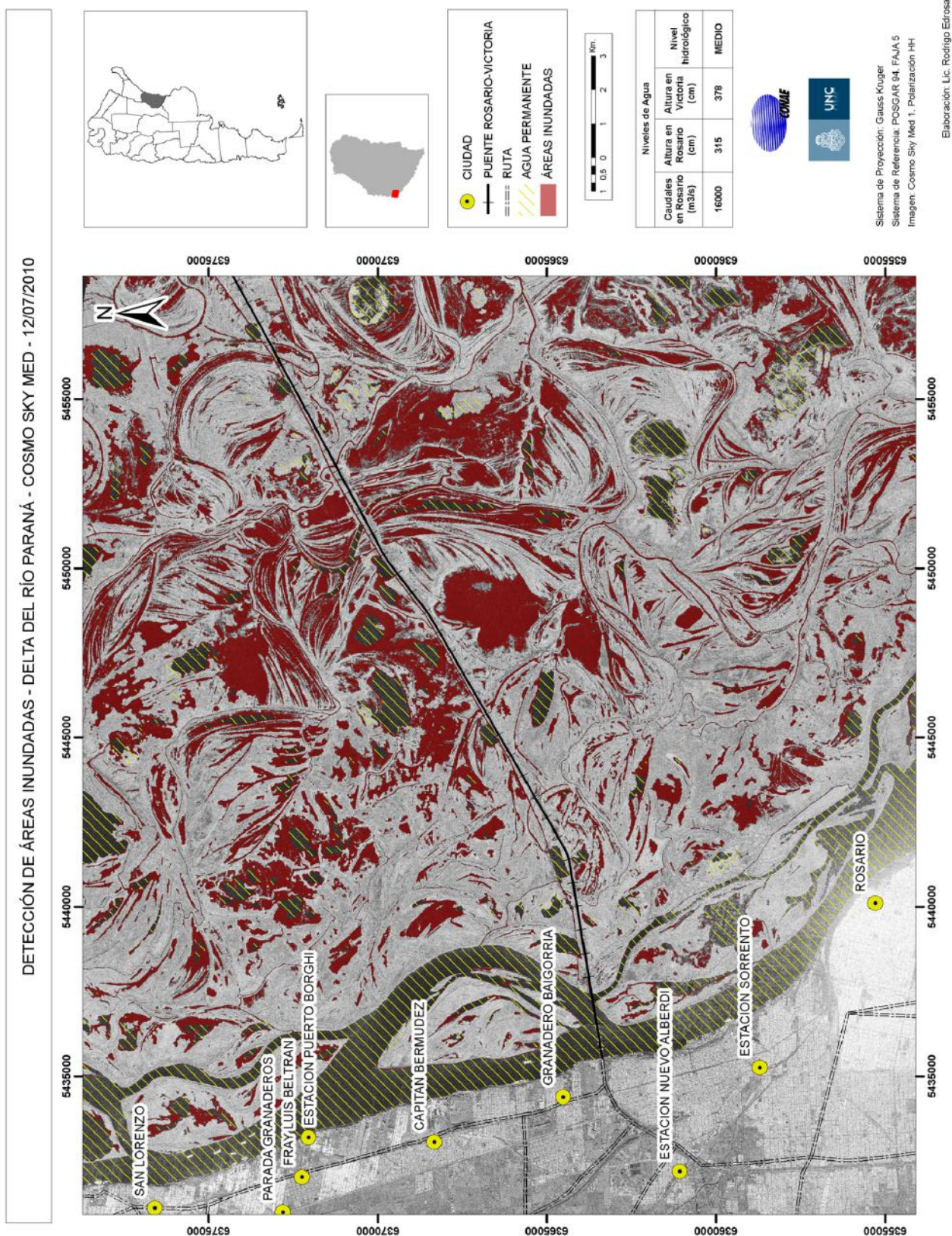


Figura 8.7: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 12/07/2010.

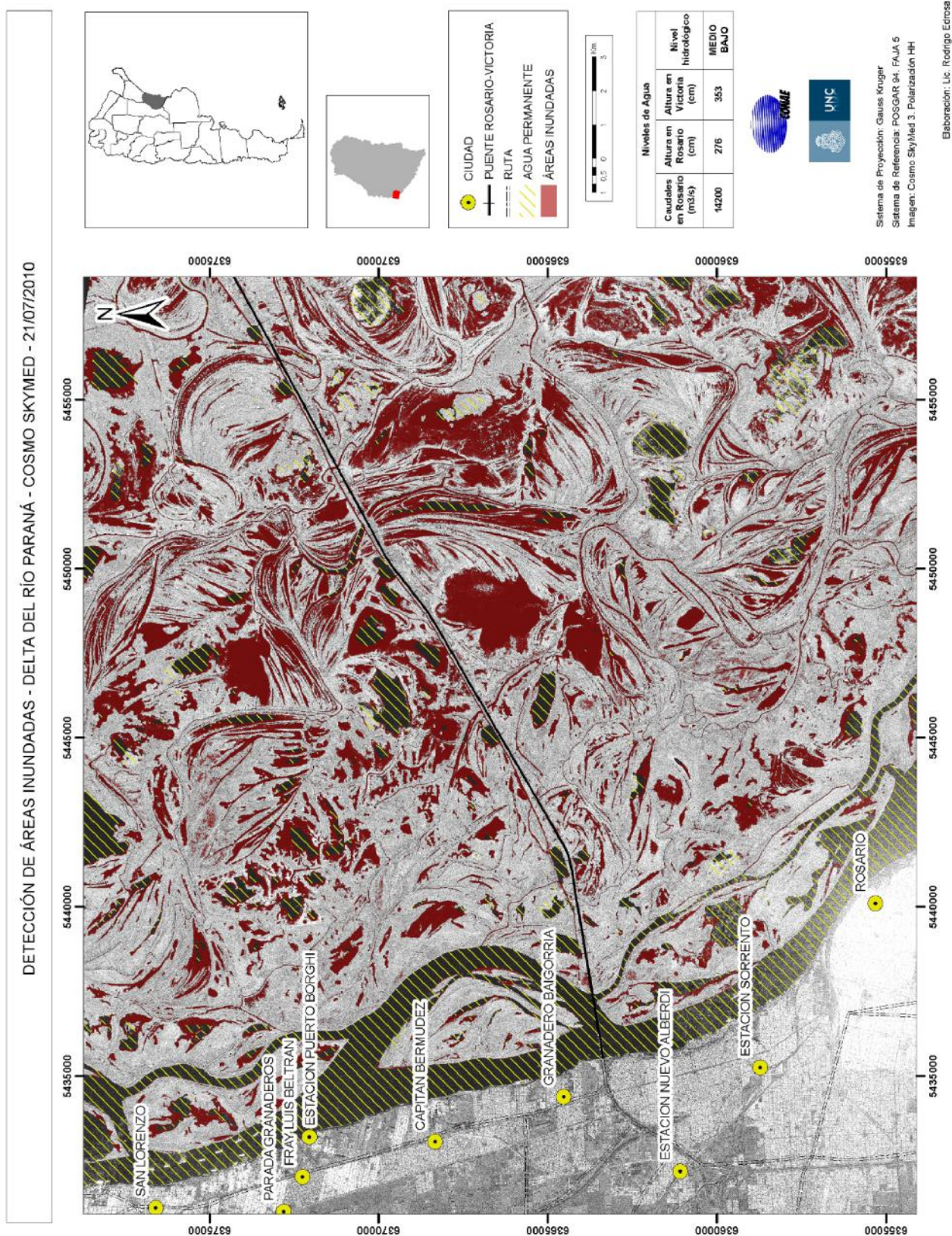


Figura 8.8: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 21/07/2010.

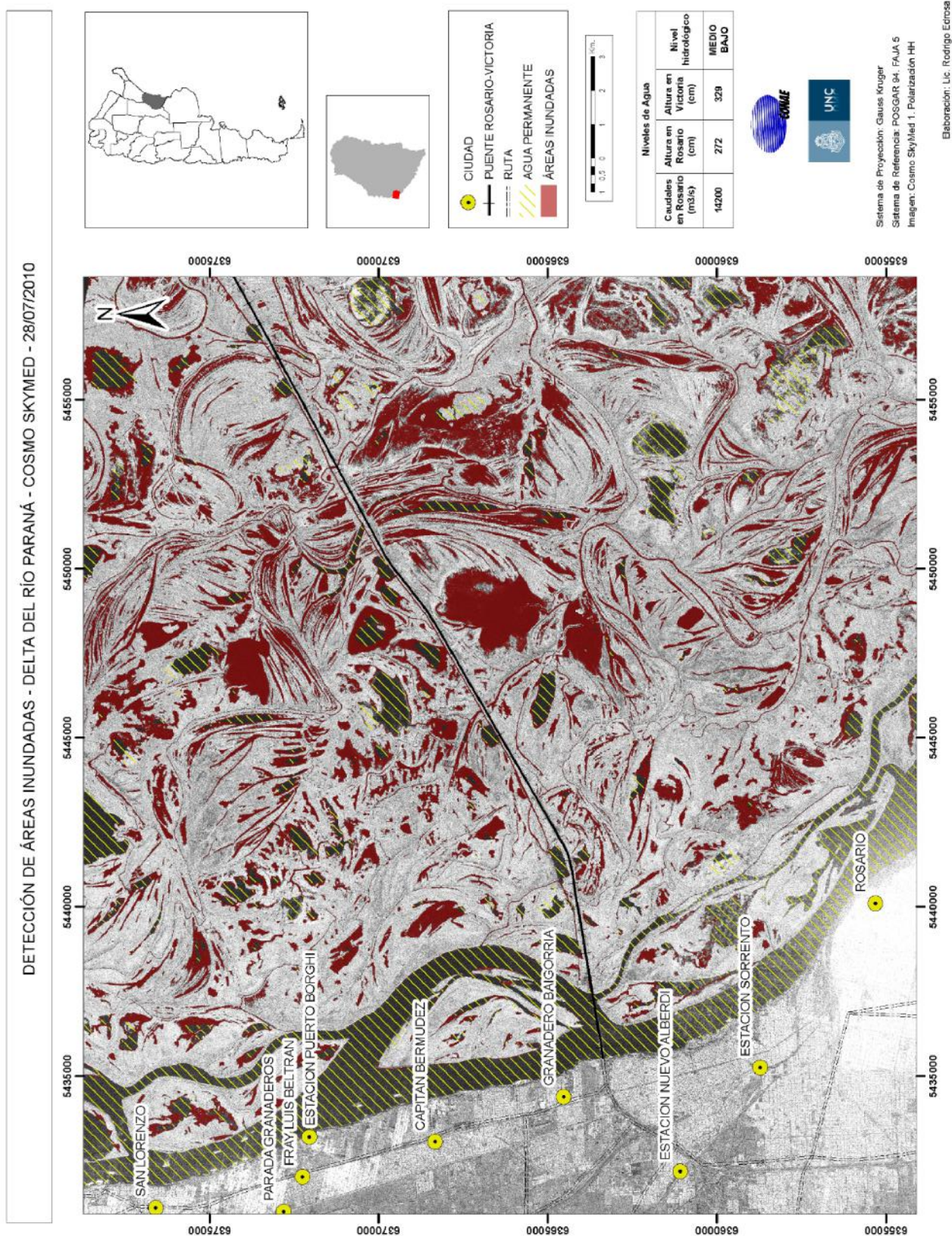


Figura 8.9: Cartografía elaborada. Detección de áreas inundadas Delta del Río Paraná. Fecha 28/07/2010.