

Metodologías de Pre-procesamiento y Procesamiento Utilizadas en el Tratamiento Cuantitativo de Datos SAR Para el Estudio de Ambientes en el Bajo Delta del Río Paraná, Argentina

LAURA A. FRULLA¹
JORGE A. MILOVICH¹
HAYDEE KARSZENBAUM¹
PATRICIA KANDUS²

⁽¹⁾Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Julián Alvarez 1218
(1414) Buenos Aires, Argentina
Phone (54-1) 772-1471 Fax: (54-1) 776-0410
e-mail: laura@caerce.edu.ar

⁽²⁾Laboratorio de Ecología Regional, Departamento de Biología - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires (UBA)

Abstract. From SAR point of view, the Delta of Paraná's river (Argentina), a major fresh water wetland, represents a complex area where the radar backscattered signal has the influence of the structural properties of the landscape elements as well as of the dielectric properties due to the different flooding conditions of the land cover categories. To understand the different mechanisms that take place in the interaction between the sensor and the scene characteristics and to assist in the extraction of quantitative information, a methodology approach for pre-processing and processing SAR data (obtained in different operational modes) is presented. Radarsat/SAR images were used to illustrate the methods as well as auxiliary data (Lansat/TM data, thematic maps, field work) to support the analysis and to validate the procedures.

Keywords: Image Preprocessing and Processing, Radar Image Analysis

1 Introducción

En la última década ha habido un esfuerzo sostenido con el fin de colocar en órbita sistemas satelitales de observación terrestre con radares de apertura sintética (SAR/ERS, SAR/JERS, Radarsat). Estos esfuerzos realizados en tan pequeño período de tiempo pueden considerarse como un indicador de la importancia de estas observaciones. Por otra parte, las diferencias existentes entre cada sensor, unido al hecho de que existe una disponibilidad creciente de este tipo de información, sugiere el desarrollo de técnicas que permitan el aprovechamiento de las características distintivas de cada sistema y la utilización de este tipo de datos individualmente o combinados a fin de estudiar el medio ambiente terrestre.

La zona de estudio, el Bajo Delta del Río Paraná (Argentina) constituye un importante humedal situado muy próximo a la Ciudad de Buenos Aires del cual no sólo es de gran interés su estudio y monitoreo como ecosistema natural sino también como área productiva, ya que contiene grandes plantaciones de sauce y álamo (Kandus *et al.* 1997). A los fines del radar, se trata de una zona compleja donde la señal retrodispersada contiene tanto elementos estructurales del paisaje como eléctricos debido a la presencia permanente de agua.

Si bien las imágenes SAR han demostrado su utilidad en aplicaciones hidrológicas, cuando se trata de estudiar vegetación con diferentes niveles de inundabilidad, la literatura

presenta resultados que, en algunos casos, son contradictorios debido a las diferencias en la estructura de la vegetación y en el grado de inundabilidad de la misma y al sistema utilizado (banda, polarización, ángulo de incidencia) (Pereira de Farias Costa *et al.* 1997). Por consiguiente, para facilitar la interpretación de las imágenes SAR del Bajo Delta del Río Paraná se planteó un enfoque metodológico a fin de comprender, en la señal de radar retrodispersada, los efectos debido a las características del sistema y de su tratamiento (distorsiones radiométricas y geométricas), y los de la información propia del objeto de estudio.

Este enfoque incluye el análisis de las correcciones radiométricas y geométricas aplicadas a las imágenes y la extracción de información cuantitativa de la zona de estudio. Si bien algunos de estos procedimientos, como por ejemplo, las correcciones por efectos de pérdidas de potencia en rango y por modelo de antena son transparentes al usuario ya que están incluidas en el procesamiento original de las imágenes, otros efectos tales como posibles cambios en la ganancia de la antena, saturación de la señal y ruido *speckle* deben ser corregidos por el usuario para lograr mejores resultados. Además, a fin de llevar a cabo análisis multitemporales y/o multi-modo, los datos deben calibrarse para poder relacionar los valores digitales de cada pixel con los correspondientes valores de coeficiente de *backscattering sigma nought*.

Una vez que las imágenes se corrigen por efecto de las distorsiones radiométricas y geométricas, es posible aplicar distintos procedimientos de procesamiento (análisis e interpretación). Sin embargo, es sabido, que estas dos etapas no son completamente independientes, es decir, determinados procedimientos de pre-procesamiento modifican los datos y esta modificación en algunos casos puede facilitar la posterior utilización de los mismos y en otros casos agregar artefactos o producir una disminución de la resolución y de la calidad radiométrica de las imágenes. Tomado estos elementos en consideración, este trabajo tiene por objetivos: 1) describir y analizar las variables de entrada y salida de rutinas básicas de preprocesamiento (calibración, reducción de ruido *speckle* y geolocalización) y los efectos principales que resultan de aplicarlas a imágenes SAR del sistema Radarsat correspondientes a la zona de estudio, 2) analizar mediante estadísticas de primer orden, los mecanismos de interacción sensor/escena para estructuras específicas de vegetación del Delta del Río Paraná y para distintos modos de observación del sistema Radarsat. La metodología propuesta se ilustra con imágenes Radarsat/SAR adquiridas para distintos ángulos de incidencia y en distintas fechas. Además se utilizaron imágenes Landsat 5/TM de fechas próximas a la de las imágenes SAR, mapas temáticos pre-existentes y muestras de campo, como apoyo para el análisis de los resultados y validación de los procedimientos. Las secciones siguientes presentan en primer término los procedimientos de pre-procesamiento utilizados y su análisis, a continuación los procedimientos empleados para analizar los mecanismos de interacción entre la señal y los elementos estructurales de la escena, para finalizar con la discusión de resultados y conclusiones.

2 Mediciones que realiza el radar

La relación fundamental entre las características del radar, el objeto y la señal recibida está dada por la ecuación del radar (Ulaby *et al.* 1982). En este sentido, la potencia (P) que recibe la antena (y que es la magnitud directamente medida por el sensor) está relacionada con el coeficiente de *backscattering sigma nought* (σ^0). Por otra parte la teoría electromagnética de la luz explica que la intensidad de una onda electromagnética (I) es proporcional al flujo promedio de energía por unidad de tiempo (potencia), o sea al valor cuadrático medio del

campo eléctrico. Entonces la potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda (A^2). Además, las antenas de radar detectan la intensidad del brillo que los objetos reflejan en una longitud de onda particular. Por lo tanto la potencia recibida es proporcional al brillo del objeto (b^0), quien además está relacionado con s^0 y g^0 . Las relaciones radiométricas que vinculan estas magnitudes son:

$$P \propto I \propto A^2 \propto b^0 = \frac{s^0}{\sin(a)} = \frac{g^0}{\tan(a)} \quad (1)$$

donde a es el ángulo de incidencia local.

Es muy importante considerar la diferencia que existe entre b^0 , g^0 y s^0 . La primer magnitud representa la observación del radar en su forma más pura. Es decir b^0 está relacionada con la reflectividad promedio de centros dispersores distribuidos por unidad de área del plano de rango oblicuo y para su cálculo no se requiere información acerca del ángulo de incidencia local. La segunda magnitud, g^0 , es la reflectividad media de centros dispersores distribuidos por unidad de área del frente de onda incidente y tiene la ventaja que mantiene relativamente constante la reflectividad en un amplio rango de ángulos de incidencia en el caso de superficies rugosas, pero requiere del conocimiento del ángulo de incidencia local para su cálculo. La tercera magnitud, s^0 , describe la reflectividad promedio de centros dispersores distribuidos por unidad de área en el plano local de la superficie observada. Se trata de la propiedad intrínseca a ser observada y también para su cálculo requiere del conocimiento del ángulo de incidencia local. Lo descrito se representa en la **figura 1**, donde el incremento de área utilizado para normalizar cada magnitud se representa como un segmento contenido en el plano. La otra dirección que define dicho incremento corresponde a la dirección de acimut, que obviamente es la misma para las tres magnitudes. Desde el punto de vista geométrico, en general los contajes de amplitud de productos estándar multi-vista están proyectados en la dirección de rango horizontal. En este caso, las magnitudes obtenidas a partir de estos contajes, dado que sólo involucran operaciones radiométricas, quedarán también proyectadas en rango horizontal.

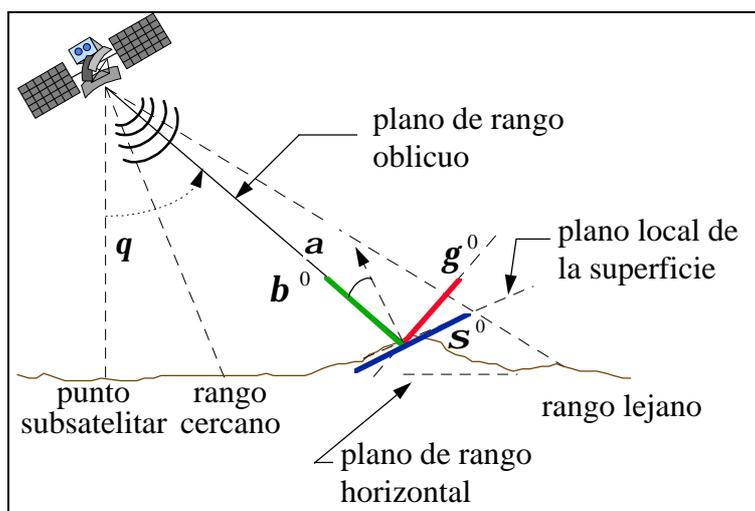


Figura 1. Magnitudes radiométricas medida por el radar y sus derivadas. Los segmentos indican la dirección en el plano de la figura del incremento de área utilizado para normalizar la magnitud correspondiente. (q es el ángulo de observación del sensor).

La ecuación (1) indica que el coeficiente de *backscattering* \mathbf{s}^0 es proporcional a la potencia P , y se lo conoce comunmente como la representación de \mathbf{s}^0 en potencia. La raíz cuadrada de \mathbf{s}^0 es proporcional a la amplitud A , y esta magnitud se conoce como la representación de \mathbf{s}^0 en amplitud (\mathbf{s}_A^0). Además \mathbf{s}^0 se puede expresar en forma logarítmica, i.e. en decibeles ($\mathbf{s}^0|_{\text{dB}}$). Esta última representación es útil puesto que la reflectividad del radar tiene un rango dinámico que puede alcanzar varios órdenes de magnitud en potencias de diez. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada etapa de preprocesamiento requiere de una representación específica de \mathbf{s}^0 . La relación entre las magnitud mencionadas es:

$$\mathbf{s}^0|_{\text{dB}} = \begin{cases} 10 \log_{10}(\mathbf{s}^0) \\ 20 \log_{10}(\mathbf{s}_A^0) \end{cases}. \quad (2)$$

3 Conjunto de datos utilizados

Este trabajo se ha desarrollado dentro del marco de los proyectos GLOBESAR 2 y se ha contado con imágenes SAR/Radarsat de los modos S1, S6 correspondientes al verano del año 1997 y una imagen S1 de invierno del mismo año. En forma adicional a las imágenes de radar se dispuso de imágenes Landsat 5-Thematic Mapper facilitadas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y de fotos aéreas pancromáticas. Además, se contó con datos de altura del nivel del agua del Puerto de Buenos Aires provenientes de los registros del Servicio de Hidrografía Naval. Estos fueron utilizados como indicadores del estado de las condiciones de marea durante la fecha de la toma de imágenes. También se obtuvieron datos sobre vientos (intensidad y dirección) y cantidad de precipitación caída para las mismas fechas. Se utilizó esta información para evaluar la influencia de las condiciones climáticas sobre la señal de radar retrodispersada para cada uno de los ambientes considerados y de la imagen en conjunto.

4 Características de la zona de estudio

Los patrones de paisaje del Bajo Delta del Río Paraná están definidos por la coexistencia de elementos naturales con otros derivados de la intervención del hombre. Todos estos ambientes son inundables en mayor o menor medida. Entre los ambientes naturales pueden mencionarse bosques correspondientes a altos relativos o medias lomas y, en situaciones de bajo, pajonales y juncales donde el sustrato se encuentra saturado o inundado por prolongados períodos de tiempo o en forma permanente. Aproximadamente el 30% de la superficie representada originalmente por estos ambientes está ocupada en la actualidad por plantaciones de sauce y álamo las cuales constituyen la principal actividad productiva del delta. Teniendo en cuenta estas características, se definió un esquema conceptual de clasificación propio, basado en rasgos estructurales y funcionales. Este esquema, si bien particular es comparable con esquemas elaborados para otros humedales y fue utilizado satisfactoriamente para la realización de un mapa temático de uso y cobertura a partir de imágenes multitemporales Landsat/TM (Kandus *et al.* 1997), utilizado en este trabajo como mapa de referencia. Para facilitar la interpretación y análisis de las imágenes de radar de esta zona, el esquema mencionado se simplificó y se redujo a tres situaciones estructurales: bosque, pajonal y juncal, con sus correspondientes categorías (Karszenbaum *et al.* 1998).

5 Preprocesamiento, procesamiento y manejo de datos SAR

La **figura 2** resume la línea metodológica planteada para el pre-procesamiento y procesamiento de datos SAR teniendo en cuenta las características de las imágenes Radarsat,

la zona de estudio y los objetivos de este trabajo. Se indica, además, la magnitud requerida como entrada a cada procedimiento.

5.1 Calibración

Este tipo de procedimientos dependen del procesador del sistema satelital considerado (en este caso para datos Radarsat) y además, a nivel del usuario, se utilizan especialmente para ajustar posibles cambios temporales en la ganancia de la antena y en las condiciones de saturación de la señal y a fin de convertir los valores de amplitud de cada pixel (expresados en contajes digitales) a valores de coeficiente de *backscattering* o de brillo (Laur *et al.* 1996). Se trata de un procedimiento necesario para estudios multitemporales y/o multiángulo (como en este caso). La ecuación utilizada para el sistema Radarsat es:

$$s^0 = [(DN^2 + A_0)/A] \sin a \tag{3}$$

donde DN son los valores de la imagen de amplitud expresados en contajes digitales, A_0 es una constante y A es una tabla de reescalado que depende de la distancia de rango. Los archivos de encabezamiento de las imágenes contienen estos valores o datos adecuados de los cuales se pueden obtener. Si bien es posible calcular s^0 para cada pixel, su significado físico cobra sentido cuando este valor se promedia sobre un grupo de pixeles correspondientes a un blanco distribuido en la imagen. Se utilizó el *software* PCI para llevar a cabo este procedimiento.

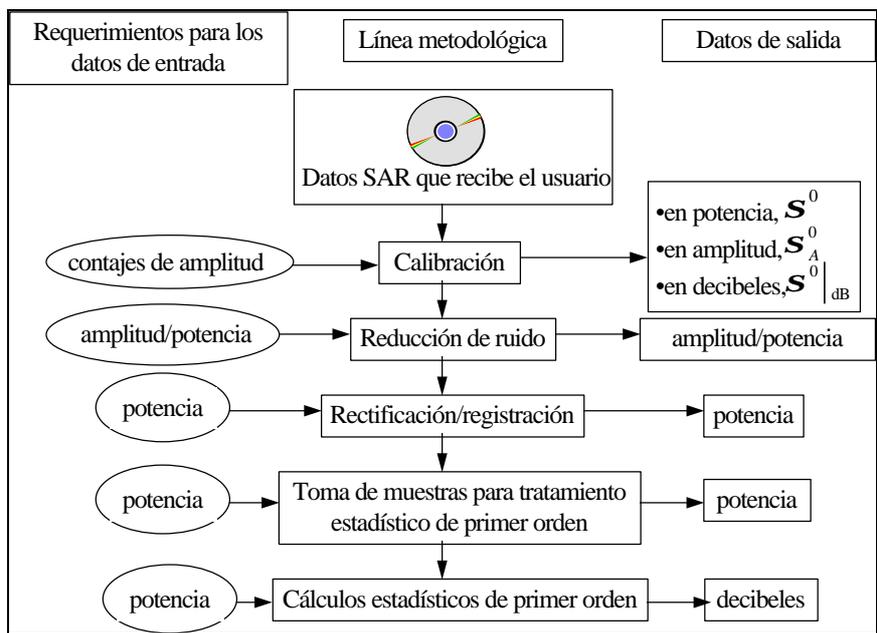


Figura 2. Línea metodológica desarrollada para el preprocesamiento y procesamiento de datos SAR.

5.2 Reducción de *speckle*

Es posible reducir el efecto del ruido *speckle* aplicando técnicas de filtrado a las imágenes SAR de varios *looks*. Si bien existen distintos tipos de filtros (Frost *et al.* 1982, Kuan *et al.* 1987), el mayor problema de los métodos se encuentra en la estimación de los valores de los parámetros de entrada de los distintos algoritmos: el tamaño de la ventana móvil, el desvío estándar del *speckle* y el factor de *damping*. La selección de estos parámetros depende en gran

medida de las características del área de estudio. Regiones con grandes variaciones en los tonos de gris, muestran detalles finos en la imagen, por lo tanto es preferible que la ventana sea pequeña. Por el contrario, para zonas homogéneas, donde casi no existen variaciones en los tonos de gris, una ventana de mayor tamaño es preferible a fin de mantener la homogeneidad de la imagen (Li 1988, Cortese *et al.* 1994). Por otro lado, la textura de regiones homogéneas proviene del ruido *speckle* y por lo tanto, contiene información relacionada con el desvío estándar del mismo. La identificación, en la imagen original, de este tipo de regiones es el primer paso para estimar el desvío estándar del *speckle*. Finalmente, aquellos filtros que incluyen el factor de damping, permitan garantizar características adaptivas. Sin embargo, el uso de valores de dumping grandes, preserva los bordes mejor, pero reduce el efecto de suavizado. Por el contrario, la utilización de valores pequeños de damping aumenta el efecto de suavizado, pero no mantiene los bordes de forma correcta (Schreier 1993). Como se indica en la **figura 2**, el tipo de representación de s^0 para la entrada/salida del filtro puede ser en amplitud o en potencia dependiendo del tipo de filtro y del diseño del *software*.

Se evaluó el comportamiento, para la zona de estudio, de cuatro filtros específicos para reducción de *speckle*: Enhanced Frost, Gamma Map, Kuan y Frost. Se utilizaron criterios cualitativos tales como la comparación visual de las imágenes filtradas con respecto a la original y el análisis de transectas para la evaluación de la degradación de las pendientes. Por otro lado se utilizaron criterios cuantitativos basados en la estadística de las imágenes filtradas y original, tales como la conservación del valor medio, la reducción de la desviación estándar y el valor medio de la diferencia absoluta entre la imagen original y las filtradas. La **figura 3** muestra la diferencia entre el valor medio de la imagen filtrada y el valor medio de la imagen original para cada uno de los cuatro filtros, la **figura 4** muestra el desvío estándar correspondiente a cada filtro y la **figura 5** el valor medio de la diferencia absoluta entre la imagen original y la resultante de cada filtro.

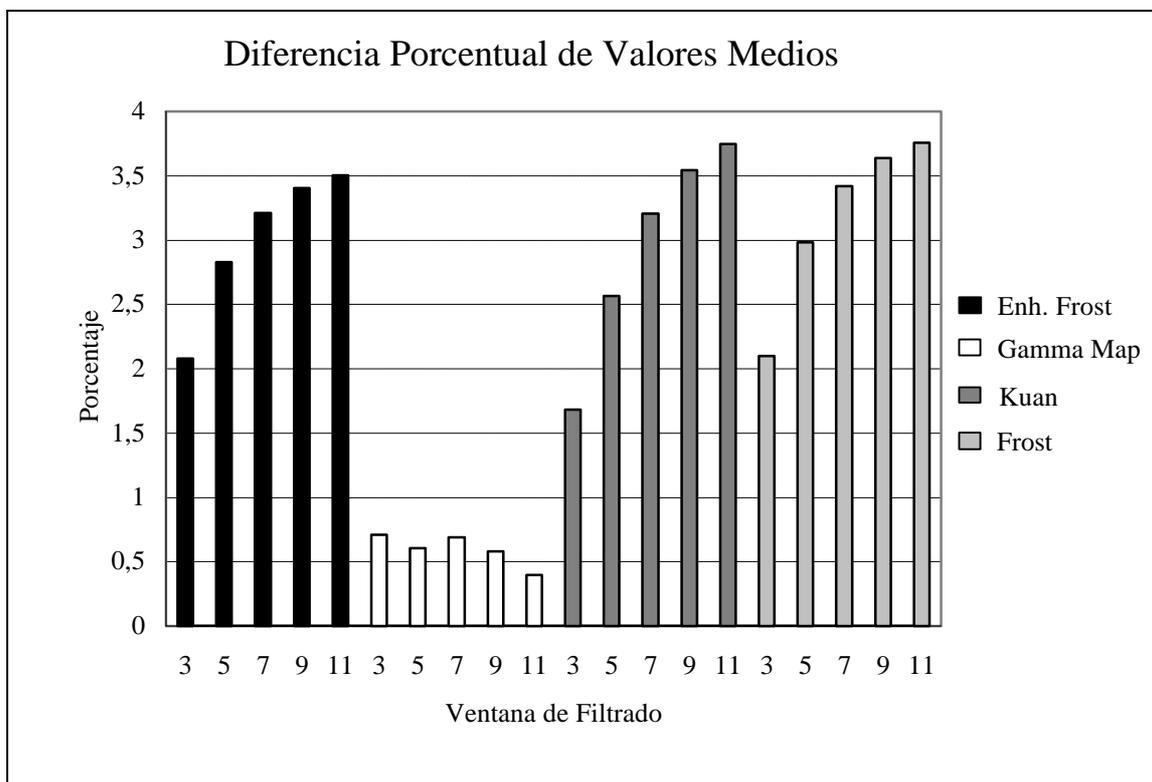


Figura 3

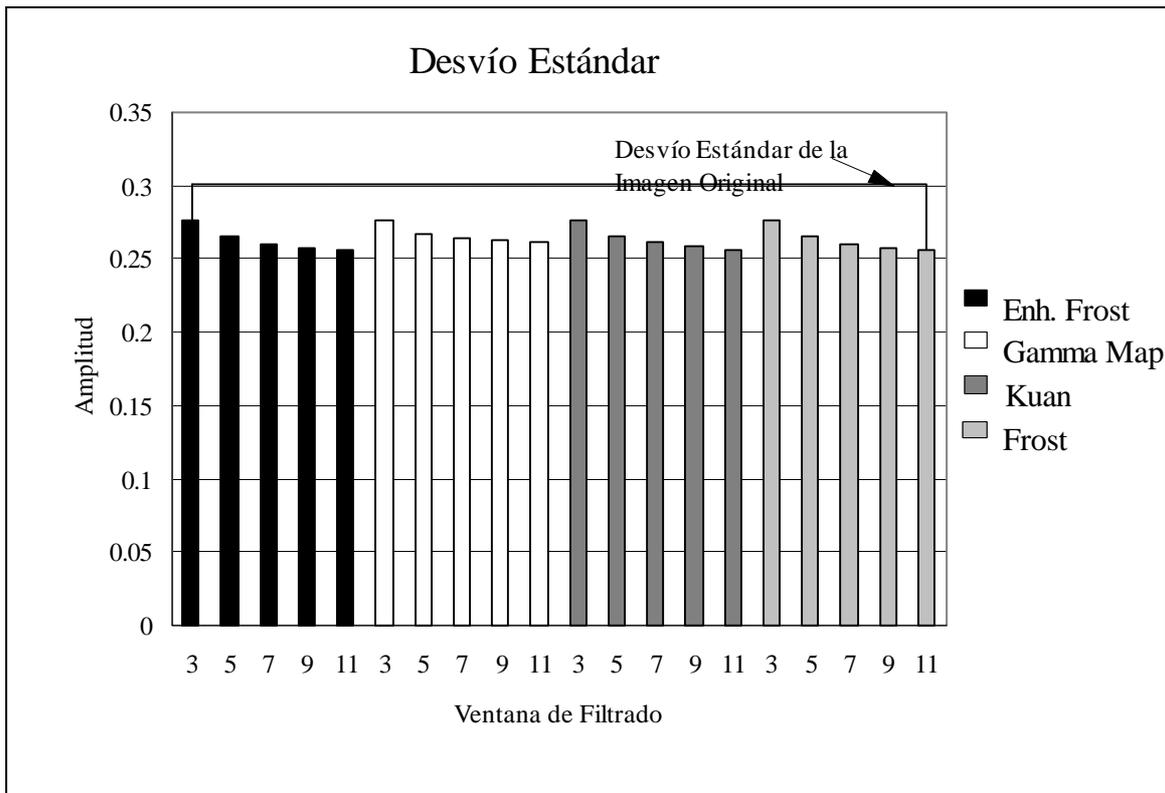


Figura 4

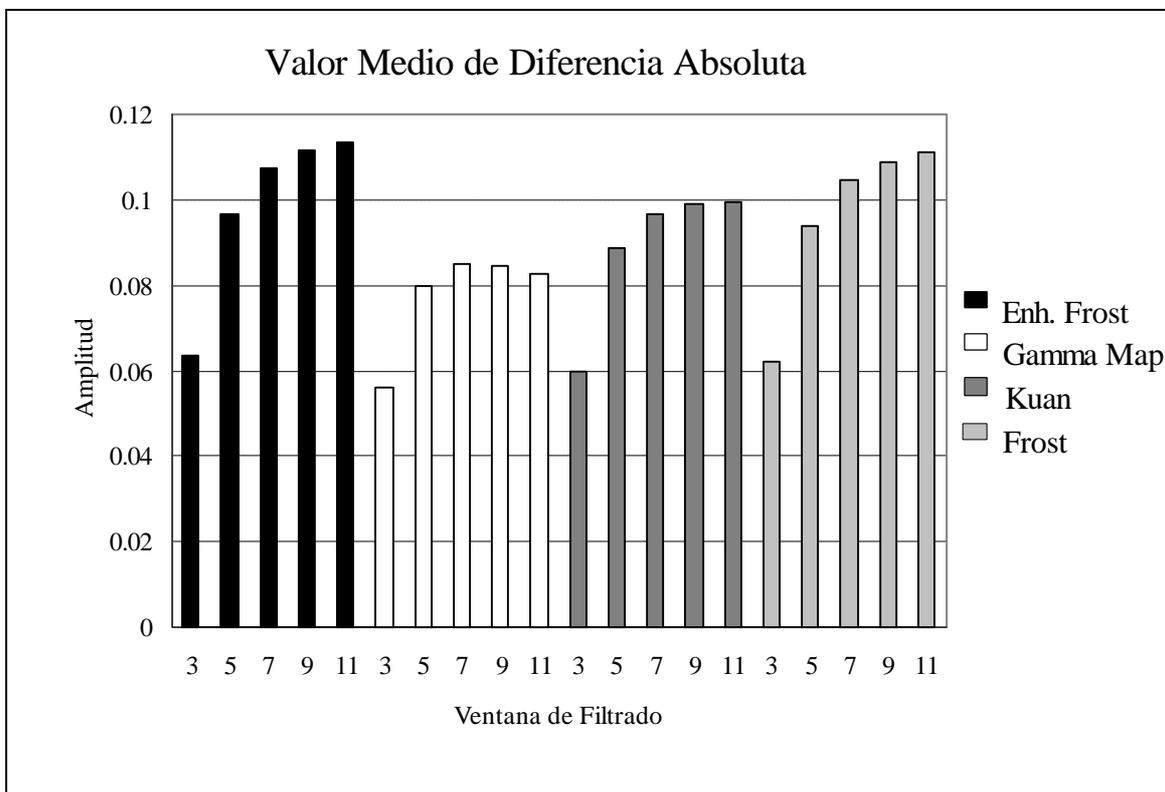


Figura 5

5.3 Correcciones geométricas

Las correcciones geométricas, ya sea utilizando un modelo digital de terreno a fin de obtener una orto-imagen o una corrección polinomial asumiendo una superficie plana, involucran la utilización de técnicas de reemuestreo que a su vez incluyen la aplicación de interpolaciones radiométricas entre píxeles vecinos. La ecuación de radar generalizada para blancos extendidos calcula la potencia recibida mediante la suma pesada (en el límite, una integral) incluyendo valores s^0 en incrementos de área relevantes. Si se amplía este concepto, la magnitud más adecuada para la interpolación radiométrica en el procedimiento de reemuestreo es s^0 en potencia. Resulta obvio que si el método de interpolación utilizado es el del vecino más próximo, el resultado será el mismo cualquiera sea el tipo de representación utilizada para s^0 . En relación con los métodos de reemuestreo, es conveniente considerar lo siguiente: 1) el método del vecino más próximo mantiene la estadística global pero cambia la textura local, 2) la interpolación bilineal degrada la resolución, y 3) la convolución cúbica o un *kernel sinc* tienden a mantener la fidelidad en los valores locales y texturas. Por lo tanto, se recomienda este último método. Previamente a la extracción cuantitativa de información de las imágenes, es necesario corregirlas geométricamente a una dada proyección geográfica. De esa manera es posible la superposición de las distintas imágenes entre sí y la ubicación en las mismas de muestras tomadas en el terreno. La zona de estudio no posee diferencias importantes de elevación por lo que no es necesario la utilización de un modelo de terreno para realizar una ortorectificación. Por lo tanto, se empleó una corrección mediante reemuestreo por convolución cúbica de la imagen calibrada en potencia mediante una transformación polinómica obtenida a partir de la toma de puntos de control. Se utilizó como referencia una imagen TM georeferenciada a una proyección Gauss-Kruger con un tamaño de pixel de 28.5 metros. Las imágenes se rectificaron con un tamaño de pixel de 14.5 metros para los modos *standard* y de 7.125 metros para el modo *fine*. Los errores *r.m.s.* obtenidos estuvieron comprendidos entre 20 y 40 metros.

Para las imágenes en modo estándar (S1 y S6), el análisis de las amplitudes y gráficos de dispersión de los vectores de errores residuales para los puntos de control mostró una distribución prioritaria en el sentido del rango cuando se suponía polinomios de grado 1. Esto indica una deformación residual en la dirección del rango mayor que en la dirección de azimut. Este efecto desaparece cuando se selecciona un polinomio de grado 2. El análisis de los valores de posicionamiento geográfico presentes en el *header* de las imágenes muestra iguales resultados, siendo más importante el efecto para el modo S1, lo cual concuerda con lo esperado.

5.4 Extracción de información cuantitativa de las imágenes de radar

Como se ha señalado en el párrafo anterior, resulta difícil (sin datos adicionales y/o modelos) separar la contribución de las características eléctricas de las geométricas en las imágenes de radar. A fin de extraer información cuantitativa acerca de los mecanismos de interacción del sensor con los elementos seleccionados (pajonal, bosque, juncal), se llevó a cabo un análisis del contenido textural de los mismos. La textura contiene importante información acerca del arreglo estructural de la superficie y de la relación de éste arreglo con el entorno. En este trabajo se han utilizado estadísticas de primer orden para analizar la textura que esta zona, dadas sus características, ofrece al radar. Para llevar a cabo el objetivo propuesto, se extrajeron de las imágenes preprocesadas, entre 50 y 100 muestras de aproximadamente 50 píxeles cada una para cada uno de los ambientes seleccionados. Este paso se llevó a cabo

sobre imágenes de potencia, según se indica en la **figura 2**. Como datos de referencia se utilizaron fotos aéreas y datos de campo existentes. A fin de asegurar que las muestras obtenidas correspondían a cada uno de los ambientes seleccionados, se trabajó sobre una imagen TM geolocalizada de marzo de 1997 (fecha de verano próxima a los modos S1 y S6) y se obtuvieron los perfiles espectrales de todas las muestras. Este análisis confirmó la pertinencia de las muestras.

A fin de utilizar las estadísticas de primer orden para determinar la textura característica, se calcularon medias m , desvíos estándar s y coeficientes de variación s/m (indicador del grado de heterogeneidad). Es decir, se tomaron m regiones como muestras de un ambiente dado, cada una de estas m regiones posee valores estadísticos. Es decir, para la región i se conocen: m_i : valor medio, s_i : desvío estándar y n_i : número de píxeles correspondientes a la región y también los valores máximo y mínimo alcanzados en cada muestra. Los valores estadísticos analizados se calcularon considerando dos situaciones diferentes:

- Caso 1: Se calcularon los valores medios y los desvíos estándar de cada ambiente correspondientes al conjunto de “todos los píxeles” de “todas las muestras”. Es decir, el valor promedio resultante de cada ambiente contiene la influencia del ruido *speckle*.
- Caso 2: Se calcularon los valores medios y los desvíos estándar de cada ambiente a partir del conjunto de muestras. En este caso cada muestra es un individuo, definido por un valor medio. Los valores resultantes contendrán muy poca información debida al ruido *speckle* (ya que éste se encuentra reducido por la operación “promedio”).

Para poder analizar los resultados y a fin de poder compararlos con los obtenidos por otros autores, los valores promedio y desvío para los dos casos se convirtieron de potencia a S^0 (decibelios). Finalmente, para cada muestra de cada ambiente, se calcularon también los coeficientes de variación. Estos valores se promediaron y se obtuvo un único valor medio para cada ambiente y el desvío estándar correspondiente. Las **figuras 6 y 7** muestran este análisis.

6 Resultados y conclusiones

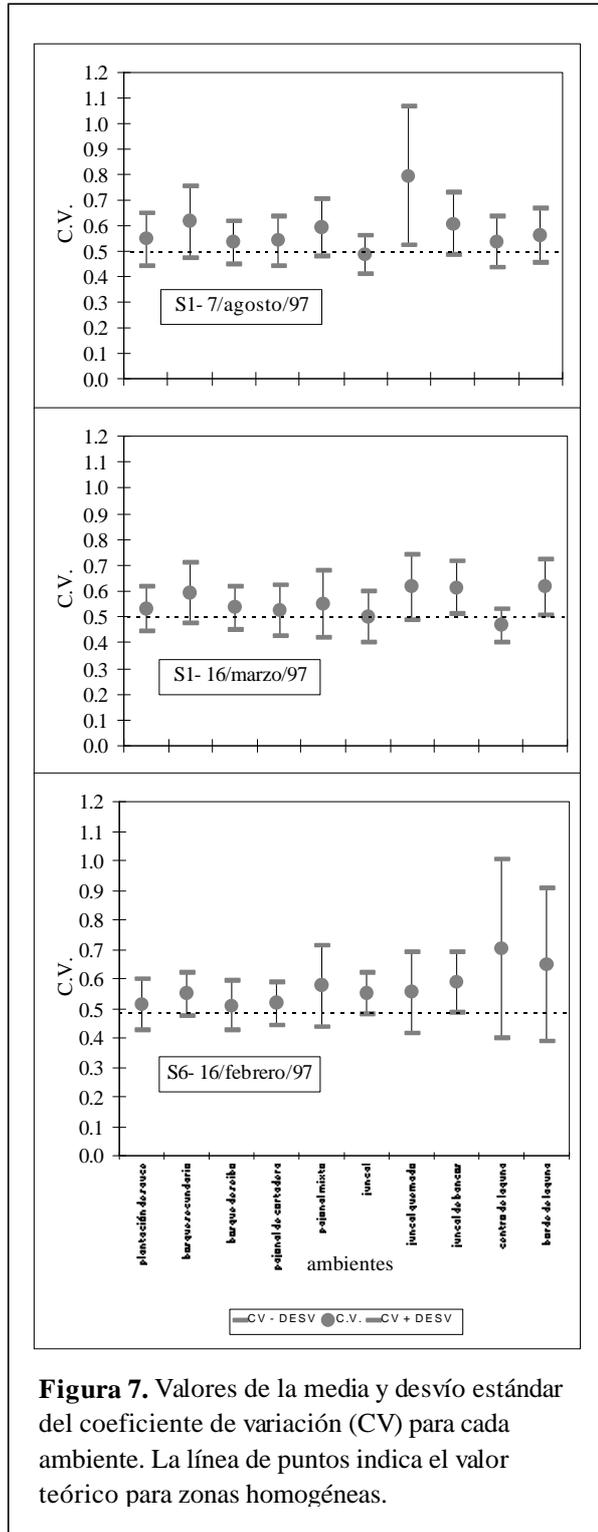
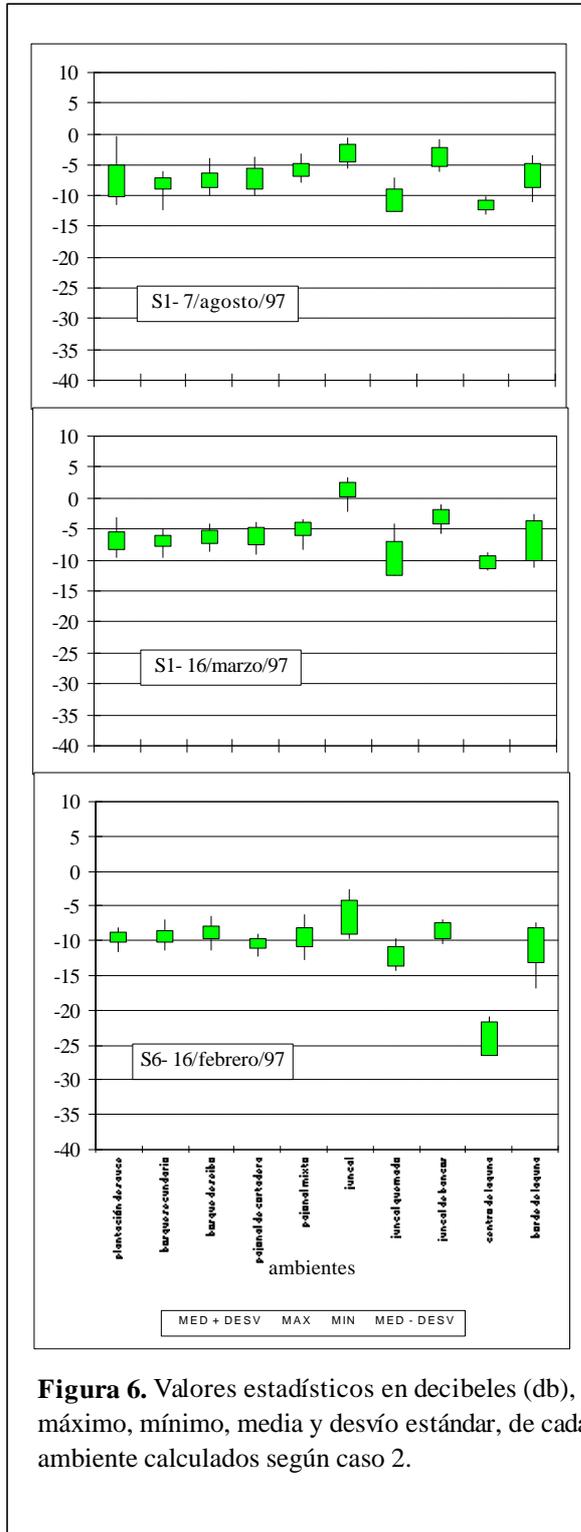
De la **figura 3** se observa que el filtro que mejor conserva el valor medio es el Gamma Map, presentando diferencias menores al 0.75 % con respecto al valor medio de la imagen original para cualquier tamaño de ventana. Los demás filtros presentan diferencias que oscilan aproximadamente entre el 1.75 % y el 3.75%, aumentando con el tamaño de la ventana. El desvío estándar de las imágenes filtradas (**figura 4**) disminuye a medida que aumenta el tamaño de la ventana de filtrado, indicando una disminución en el contenido de información. Si bien para una dada dimensión de ventana, todos los filtros producen valores equivalentes de desvío estándar, la imagen filtrada mediante el algoritmo Gamma Map presenta valores levemente superiores, indicando una pequeña pero mayor conservación del contenido de información original. La **figura 5** presenta una cuantificación de las imágenes de diferencia absoluta. El filtro Gamma Map produce las menores diferencias, y por lo tanto la menor pérdida de información. Por otra parte, el análisis de transectas mostró para el filtro Gamma Map una muy buena conservación de las pendientes.

Los resultados obtenidos llevaron a la elección del filtro Gamma Map para el tratamiento posterior de las imágenes. Debe tenerse en cuenta que esto significa que este filtro es el que mejor se comporta en el área de estudio analizada y no puede extrapolarse esta conclusión a otras regiones.

La zona de estudio carece de topografía, por lo que no es necesario utilizar un modelo de terreno para su corrección. Teniendo en cuenta este hecho y el resultado de los análisis, las

imágenes se corrigieron utilizando polinomios de orden 2 y remuestreo por convolución cúbica.

Las **figura 6** muestra las estadísticas correspondientes a los distintos ambientes según lo descrito en la metodología como caso 2. En términos generales, se observa que los tres tipos de fisonomías propuestas tienen valores medios muy semejantes. Existe poca diferencia entre los valores de s^0 correspondientes a los modos S1 y S6 siendo mayores los del modo S1. A su vez, el rango de valores de s^0 de todos los ambientes para ambos modos es muy similar.



En particular, los ambientes de bosque y pajonal no son diferenciables entre sí en ninguno de los modos utilizados y los valores de σ^0 oscilan entre -5 y -10 decibelios. A diferencia de éstos, los ambientes de juncal presentan valores más elevados de σ^0 para el modo S1 probablemente debido a que, al tratarse de juncos en agua quieta, estos actúan como *corner reflectors* (efecto esquina) naturales. En el caso de las lagunas, la porción central de la misma presenta valores bajos de σ^0 debido a que la presencia de una película de agua quieta actúa como un reflector especular. El borde de las lagunas, al presentar mayor densidad de vegetación, tiene una respuesta similar a la de los otros ambientes.

Con respecto al modo S1 los valores de marzo son mayores (mayor cantidad de biomasa verde en pie) que los de agosto. En cuanto al rango de dispersión, este varía poco entre ambas fechas. Sin embargo, cabe señalar que en el caso de las plantaciones de sauce, estas presentan mayor variabilidad en agosto, probablemente debido a que al estar los árboles sin hojas, existe una mayor influencia del sotobosque en la señal retrodispersada.

Al considerar los mismos ambientes pero de acuerdo a las estadísticas calculadas según el caso 1, se observó que el efecto del ruido *speckle* aparece bien marcado ya que aumenta de manera significativa la dispersión de los datos. Sin embargo los valores medios de σ^0 son similares a los del caso 2.

Finalmente, se representaron los valores del coeficiente de variación para todos los ambientes y los modos considerados. La **figura 7** muestra los resultados obtenidos. Esta figura también presenta el coeficiente de variación correspondiente a zonas homogéneas para una imagen de potencia de 4 *looks*. Los valores de coeficiente de variación de todos los ambientes, tanto para el modo S1 como S6, se encuentran muy próximos al valor teórico calculado para zonas homogéneas, que es de 0,5. En aquellos casos donde se registraron valores del coeficiente de variación mayores (entre 0,6 y 0,8) éstos son indicadores de una heterogeneidad propia de cada ambiente. Sin embargo los mismos presentan una gran dispersión lo que imposibilita atribuirles una textura particular. A fin de verificar estos resultados, se procedió a calcular el coeficiente de variación para toda la imagen del modo S1 y para distintos tamaños de ventanas (5, 7 y 11) y se observó una gran homogeneidad en las imágenes resultantes. Si bien el coeficiente de variación constituye un indicador de texturas muy utilizado, en este caso, los resultados no son satisfactorios, es decir, este método de textura aporta poco a la separabilidad de los ambientes.

Agradecimientos

Se agradece Dr. D. A. Gagliardini por su continuo apoyo, al CONICET y a la Universidad de Buenos Aires por los subsidios que permitieron realizar esta investigación, a CONAE por los datos TM y a CCRS/RADARSAT por las imágenes de radar y el apoyo recibido.

Referencias

- Cortese, A.; Frulla, L.A.; Jacobo-Berlles, J.; Mejail, M.; Frery, A. On the optimization of speckle filtering techniques for ERS-1 SAR images over Argentina. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Symposium on Resource and Environment Monitoring*, Rio de Janeiro, Brazil, 26-30 Septiembre 1994, Vol. 30, Part 7a, 95-99.
- Frost, V.S.; Stiles, J.A.; Shanmugan, K.S.; Holtzman, J.C. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4, 157-165, 1982.

- Kandus, P.; Karszenbaum, H.; Frulla, L.A. Land cover classification system for the Lower Delta of the Paraná River (Argentina): Its relationship with Landsat Thematic Mapper spectral classes". Aceptado para su publicación en *Journal of Coastal Research* (USA).
- Karszenbaum, H.; Kandus, P.; Frulla, L.A.; Milovich, J.A. Contribution of Optical and SAR Imagery in the Identification and Distribution of Land Cover Features in the Lower Delta of Parana's River, Argentina. Enviado para su publicación en los *Proceedings* del IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'98, Seattle, USA, 6-10 Julio 1998.
- Kuan, D.T.; Sawchuck, A.A.; Strand, T.C.; Chavel, P. Adaptive restoration of images with speckle. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ASSP-35, 373-383, 1987.
- Laur, H.; Bally, P.; Meadows, P.; Sanchez, J.; Schaettler, B.; Lopinto, E. Derivation of the Backscattered coefficient s^0 in ESA ERS SAR PRI products. *ESA publication*, Document N°ES-TN-RS-PM-HL09, Issue 2, Rev. 2, 1996, pp. 41.
- Lee, J.S. Speckle suppression and analysis for SAR images. *Optical Engineering*, 25, 636-643, 1986.
- Li, Ch. Two adaptive filters for speckle reduction in SAR images by using the variance ratio. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, 641-653, 1988.
- Pereira de Farias Costa, M.; Novo, E.M.L.M.; Ahern, F.J. Integração de dados de radar adquiridos com diferentes ângulos de incidência para estudos de reservatório na Amazônia. *ESA Publications* SP-407, 125-131, 1997.
- Schreier, G. (Editor). *SAR Geocoding: Data and systems*. Germany: Wichmann, 1993, pp. 437.
- Ulaby, T.; Moore, R.K.; Fund, A.K. *Microwave remote sensing. Active and passive*. Vol. 1 and 2 (New York: Addison-Wesley Publishing Company), 1982.