

# ELABORACIÓN DE CARTAS TEMÁTICAS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN PLANICIES DE INUNDACIÓN. CUENCA INFERIOR DEL RÍO SALADO (SANTA FE, ARGENTINA)

ING. FERNANDO BODOIRA<sup>1</sup>  
MS. SILVIO GRACIANI<sup>1</sup>  
DR. ALFREDO TRENTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral  
CC 217- (3000) Santa Fe  
fbodoira@yahoo.com.ar

## RESUMEN

En este trabajo se expone una metodología para transformar los datos de cada píxel de las imágenes satelitales en coeficientes de rugosidad  $n$  de Manning. Los datos fueron tomados en la cuenca inferior del río Salado durante invierno y verano usando imágenes satelitales Landsat 7 ETM y trabajos de campo. Se consideraron siete clases que corresponden a diferentes alturas de vegetación y tipos de terreno. Para transformar cada clase en coeficientes  $n$ , las clasificaciones respectivas se convirtieron en archivos vectoriales con coordenadas geográficas y número de clase. Se empleó para este propósito un algoritmo de conversión raster-vector. Fue empleada la ecuación de Keulegan según fondos hidráulicamente rugosos para determinar el coeficiente  $n$ . Cuando se compararon valores para invierno y verano, debido al crecimiento de la vegetación, el coeficiente de rugosidad mostró un incremento promedio del 45%.

**Palabras-clave:** Planicie; Imagen Satelital; Rugosidad; Salado.

## ABSTRACT

A methodology to transform every pixel data from satellite images into Manning's  $n$  roughness coefficient is presented in this work. The data were taken at the lower basin of the Salado River during winter and summer using Landsat 7 ETM satellite images and field measurements. Seven classes of interest, which correspond to different vegetation heights and ground types, were considered. In order to transform each class into  $n$  coefficients, the respective classifications were

converted into vector files of geographical coordinates and class number. The raster-to-vector conversion algorithm was used for this purpose. The Keulegan equation for hydraulically rough beds was used to determine the  $n$  coefficient. When summer and winter values were compared, due to vegetation growing, the roughness coefficient showed an average increase of 45%.

**Keywords:** Floodplain; Satellite Image; Rugosity; Salado.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las planicies de inundación adyacentes a los cauces principales de los ríos de llanura, desempeñan un papel activo en la conducción y almacenamiento de crecidas, constituyéndose en zonas propensas para la depositación de sedimentos suspendidos (Asselman y Wijngaarden, 2002), en particular de finos, los que necesitan ambientes con escaso nivel de turbulencia para poder sedimentar (Tsai et al., 1987). La resistencia al flujo debido a la vegetación propia de las planicies de inundación redundan en menores velocidades del escurrimiento que en el cauce principal y naturalmente menores profundidades, convirtiéndose la misma en una de las mayores causas responsable de la retención de sedimentos como así también tiene gran importancia en el almacenamiento y regulación de los caudales picos.

La rugosidad superficial expresada en este caso por el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning representa la resistencia total al escurrimiento. En 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning (Chow 2000) presentó la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde:  $v$  es la velocidad media,  $R$  es el radio hidráulico,  $S$  es la pendiente de la línea de energía y  $n$  es *el coeficiente de rugosidad*.

La ecuación (1) fue desarrollada a partir de 7 ecuaciones diferenciales, basadas en los datos experimentales de Bazin y además verificada mediante 170 observaciones. Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se convirtió en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme.

Al aplicar la ecuación de Manning la mayor dificultad es determinar el coeficiente de rugosidad  $n$ , ya que no existe un método exacto para evaluarlo. El mismo se ve afectado por un cierto número de factores como ser: la superficie del terreno (irregularidades de fondo), la vegetación, las obstrucciones ya sean antrópicas o no, cambios estacionales, etc.

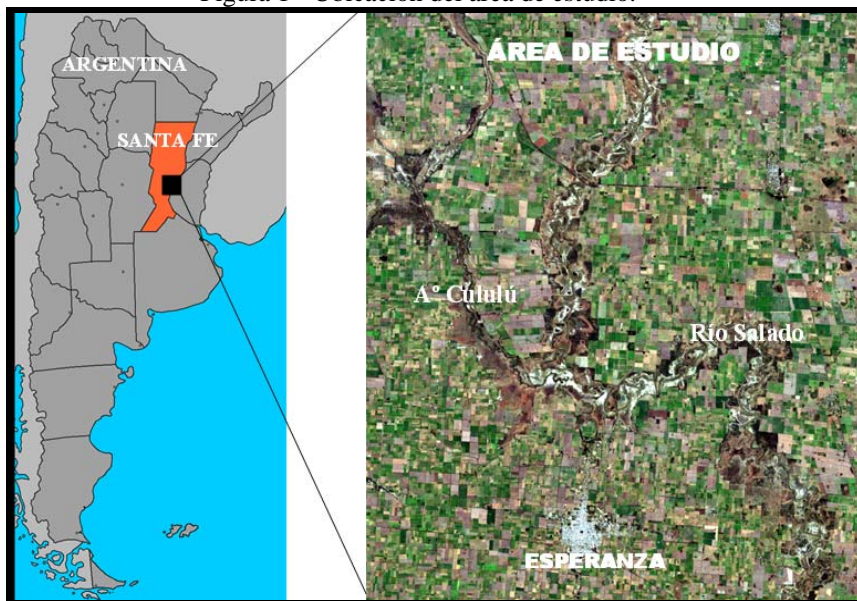
Para la determinación correcta del coeficiente de rugosidad existe diferentes métodos, uno analítico basado en la distribución logarítmica vertical de velocidades en la sección transversal de un canal y tres de base empírica los cuales

son: la fórmula de Cowan (Chow 2000), tablas de valores comunes de  $n$  para canales de diferente tipo y fotos de canales y corrientes naturales en las cuales se conoce el valor del coeficiente.

### 1.1 Área de Estudio

El río Salado, nace en las provincias de Salta y Catamarca (Argentina) y discurre a lo largo de 1500 km hasta las cercanías de la ciudad de Santo Tomé (provincia de Santa Fe), donde junto con el río Santa Fe dan origen al río Coronda. El área en estudio (Figura 1), de aproximadamente 1320 km<sup>2</sup>, pertenece a la cuenca inferior del río Salado. El caudal medio anual del río Salado en esta área es de 144.7 m<sup>3</sup>/s (SSRH, 2004) con un ancho de 80 m para dicha condición. Las planicies de inundación están dedicadas principalmente a la ganadería, ya sea para la producción de carne como de leche. Según las estimaciones de la CEPAL (2003), acerca del impacto ambiental de las inundaciones del río Salado en la provincia de Santa Fe para la crecida de 2003, la cantidad de hectáreas afectadas en los dos departamentos en que se ubica el área de estudio, La Capital y Las Colonias, fueron de 93900 y 187640 ha respectivamente, para la producción ganadera de carne, mientras que para la producción de leche fueron de 18900 y 109360 ha respectivamente. Estas cifras representan un 6.2% y un 36.4 % del total de la superficie afectada a la producción de carne y leche en toda la provincia.

Figura 1 - Ubicación del área de estudio.



En el tramo del río Salado comprendido en el área estudiada, cuando el nivel de las aguas supera el cauce principal, el escurrimiento ocupa el valle de inundación y de acuerdo a la magnitud del caudal, alcanza entre 2 y 5 km de ancho. En esta situación las condiciones del flujo en las planicies de inundación adyacentes al cauce, se constituyen en el escenario dominante a fines de conocer la dinámica del transporte de sedimentos y contaminantes.

## **2. OBJETIVO**

En función a la gran extensión que ocupa la zona de estudio el objetivo del trabajo es aplicar, en base a imágenes satelitales, una metodología que permita cuantificar la rugosidad superficial de la planicie de inundación.

## **3. METODOLOGÍA**

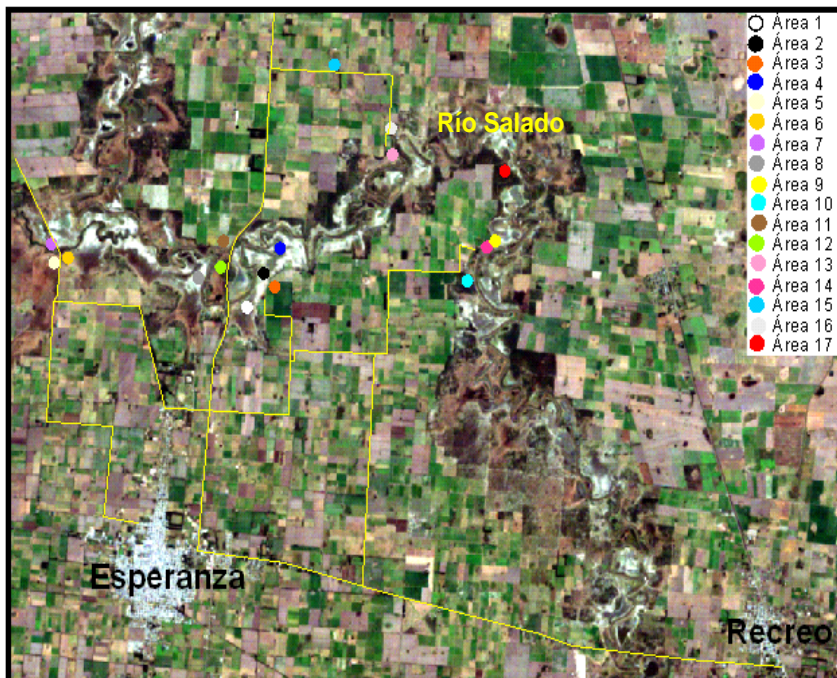
En base a imágenes satelitales Landsat 7TM (CONAE) correspondientes al 24 julio de 2001 y al 13 febrero de 2007 y a mediciones de campo se desarrolló una metodología para transformar los datos de cada píxel de las imágenes satelitales en datos de rugosidad superficial. Para lo cual fue necesario el procesamiento de las imágenes satelitales con el objetivo de obtener una clasificación de la cobertura del terreno, como así también transformar las mediciones de campo en valores de rugosidad superficial, para luego combinar ambas actividades y obtener una carta temática de rugosidad superficial del terreno.

### **3.1 Muestreo de Campo**

Se realizaron 6 salidas a campo en invierno y verano con el fin de obtener información necesaria para poder confeccionar las cartas temáticas de cada escena, las cuales se definieron como invierno y verano. En dichas salidas también se recolectó la información necesaria para el cálculo de la resistencia superficial, esta consistió en la medición de la altura de la vegetación como así también se tomaron fotografías para ver la distribución espacial de la misma.

La selección de las áreas (Figura 2), tanto en cantidad como en calidad, estuvo directamente relacionada con la necesidad de que las mismas puedan ser utilizadas como áreas de entrenamiento y control para la clasificación de las imágenes, barriendo de esta forma con toda la gama de coberturas existente en el área de estudio.

Figura 2 - Ubicación de las 17 áreas de muestreo.



### 3.2 Procesamiento de las Imágenes Satelitales

Con el objeto de obtener un mapa temático para cada imagen se realizó el procesamiento de las mismas a través del software IDRISI.

La corrección geométrica se realizó a través del método de punto de control, tomando los puntos georreferenciados de una imagen del lugar ya rectificadas.

Las escenas fueron clasificadas con un método supervisado que usa muestras de identidad conocida (píxeles previamente asignados a clases informacionales) para clasificar píxeles de identidad desconocida (Campbell, 1996), El proceso consiste de tres pasos: identificación de los campos de entrenamiento de las clases previamente definidas, creación de las firmas espectrales a partir de los mismos y la aplicación de un procedimiento de clasificación (Eastman et al.,1995).

La exactitud de las clasificaciones se validó a través de una matriz de error, a partir de la cual se estimaron el error de comisión y omisión, la exactitud total, y el coeficiente de Kappa. La matriz de error es un arreglo que expresa el número de píxeles asignados a una clase particular en una clasificación, con relación al número de píxeles asignados a la misma clase a partir del trabajo de campo o verdad

terreno. Dentro de este arreglo, la exactitud individual de cada clase se describe por los errores de comisión y de omisión de la clasificación. El error de comisión sucede cuando una clase, en la imagen clasificada, incluye un área mayor a la que en verdad ocupa en el terreno (se produce un exceso), en tanto que el error de omisión se presenta cuando se excluye un área de una clase cuando en realidad pertenece a ella (se produce un déficit). La exactitud total es estimada dividiendo la suma de los valores de la diagonal mayor de la matriz de error, que representan las unidades de muestreo correctamente clasificadas, entre el número total de unidades muestreadas (Congalton y Green, 1999). El análisis de Kappa determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. El coeficiente de Kappa (K) es una medida de la agregación o exactitud basada en las diferencias entre los datos de la clasificación y de referencia, y la exactitud de una clasificación debida al azar (Congalton y Green, 1999).

### 3.3 Determinación del Coeficiente de Rugosidad

A partir de la ecuación de Keulegan para la distribución logarítmica de velocidades verticales en canales abiertos, se obtiene la siguiente expresión para  $n$  (Sturm, 2001):

$$n = \phi \left( \frac{R}{k} \right) k^{\frac{1}{6}} = \frac{\left( \frac{R}{k} \right)^{\frac{1}{6}}}{21.9 \log \left( 12.2 \frac{R}{k} \right)} k^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

Donde:  $n$ : coeficiente de rugosidad de Manning;  $k$ : altura relativa de rugosidad superficial;  $\phi \left( \frac{R}{k} \right)$ : Función que relaciona el radio hidráulico  $R$  con la altura relativa de rugosidad  $k$ .

$$\phi \left( \frac{R}{k} \right) = \frac{\left( \frac{R}{k} \right)^{\frac{1}{6}}}{21.9 \log \left( 12.2 \frac{R}{k} \right)} \quad (3)$$

En base a observaciones hechas en Suiza, Strickler (Chow 2000) llegó a una ecuación que al compararse con la ecuación (2) da un valor promedio de la función  $\phi \left( \frac{R}{k} \right) = 0.0342$  cuando  $R/k$  se encuentra en el intervalo  $4 < R/k < 500$ . Quedando la ecuación (2) de la siguiente forma:

$$n = 0.0342 k^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

Para cada clase, tanto para invierno como verano, se adoptó una altura de la vegetación promedio con la cual, teniendo en cuenta los efectos de la corriente, se calculó  $k$ . Los efectos de la corriente se englobaron en un coeficiente que varía entre 0 y 1, para valores cercanos a 1 los efectos de la corriente son mínimos, mientras que para valores próximos a 0 los efectos de la corriente con respecto a la altura de rugosidad  $k$  son importantes.

Para el cálculo del  $n$  de Manning se aplicó la ecuación (4) cuando la relación  $R/k$  se ubicaba dentro del rango de aplicación considerando Radio Hidráulico  $R = Im$  y para el caso contrario con la expresión de  $\phi\left(\frac{R}{k}\right)$ , ecuación (3).

Los coeficientes  $n$  obtenidos fueron contrastados con los obtenidos por la fórmula de Cowan, ecuación (5) y con tablas clásicas de la hidráulica (Chow, 2000).

Fórmula de Cowan:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

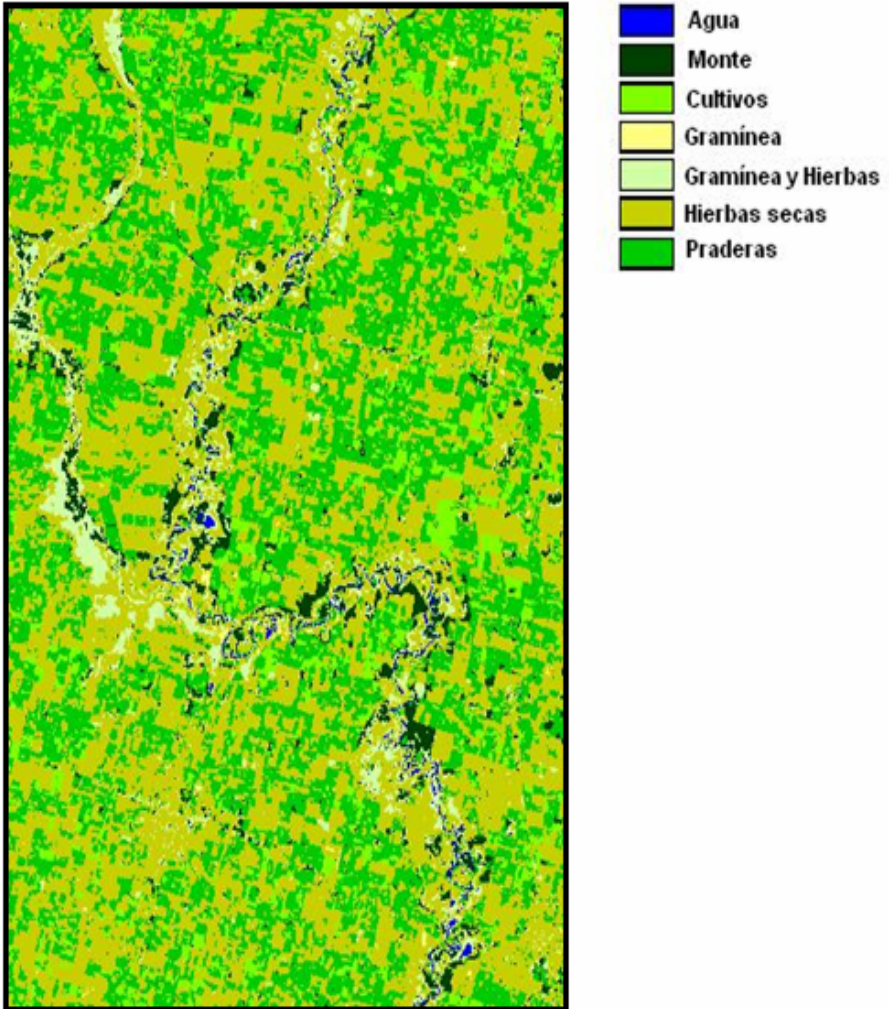
Donde:  $n_0$ :  $n$  de Manning correspondiente al tipo de material del lecho;  $n_1$ : factor debido a irregularidades;  $n_2$ : factor que contempla variaciones en la sección transversal;  $n_3$ : factor que tiene en cuenta las obstrucciones;  $n_4$ : este factor contempla la vegetación existente;  $m_5$  efectos de meandros.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Clasificación de las Imágenes Ópticas

Las clases de interés para las imagen correspondiente a invierno fueron las siguientes: agua, monte, cultivos, gramíneas, gramíneas y hierbas, hierbas secas y praderas, mientras que para la imagen correspondiente a verano las clases son: agua, monte, cultivo, gramínea, pasturas, suelo desnudo y praderas. Las áreas de entrenamiento fueron delineadas mediante la digitalización de polígonos representativos de cada una sobre imágenes compuestas RGB 543. Posteriormente, las clases fueron caracterizadas en cada una de las bandas espectrales para crear una firma o patrón de respuesta espectral. La selección de las áreas estuvo sujeta a las muestras de campo. La clasificación se realizó con el algoritmo de mínima distancia. El algoritmo calcula para cada píxel de la imagen las distancias a los centroides de las distintas clases y lo asigna a la más cercana. Las imágenes clasificadas resultantes fueron sometido a un proceso de filtrado usando un filtro de mediana con una ventana de 3 x 3 píxeles. En la Figura 3 se muestra la clasificación para la condición de invierno.

Figura 3 - Clasificación de la imagen correspondiente a invierno.



#### 4.2 Cálculo de los coeficientes $n$ de Manning

En la Tabla 1 se presenta el cálculo de los  $n$  de Manning para las coberturas clasificadas, los cuales fueron contrastados con los obtenidos a través de la fórmula de Cowan (ecuación 5) y con tablas clásicas de la hidráulica (Chow, 2000).



Tabla 1 - Cálculo del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning.

<b><math>n</math> INVIERNO</b>				
Clasificación		Forma analítica	Fórmula de Cowan	Tablas
Clases	Descripción	Ecuación (1)	Ecuación (5)	(Chow 1973)
1	Agua	0.024	0.025	0.025
2	Monte	0.076	0.075	0.070
3	Cultivos	0.031	0.030	0.030
4	Gramínea	0.021	0.020	0.020
5	Gramínea y Hierbas	0.030	0.029	0.030
6	Hierbas secas	0.025	0.025	0.025
7	Praderas	0.028	0.030	0.028
<b><math>n</math> VERANO</b>				
Clasificación		Forma analítica	Fórmula de Cowan	Tablas
Clases	Descripción	Ecuación (1)	Ecuación (5)	(Chow 1973)
1	Agua	0.024	0.025	0.025
2	Monte	0.100	0.100	0.100
3	Cultivos	0.041	0.040	0.040
4	Gramínea	0.030	0.030	0.030
5	Pasturas	0.032	0.035	0.030
6	Suelo desnudo	0.022	0.020	0.020
7	Praderas	0.032	0.033	0.030

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación entre los valores de las series de datos con los cuales se realizaron las cartas temáticas.

Tabla 2 - Cálculo de correlación para las serie de datos con los cuales se construyeron las cartas temáticas.

<b>INVIERNO</b>		
<b><math>n</math> Promedio</b>		
Ecuación (1)	Ecuación (5)	Tablas (Chow, 1973)
<b>0.030</b>	<b>0.031</b>	<b>0.030</b>
<b>Correlación</b>		
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Ecuación (5)]		<b><math>r = 0.997</math></b>
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Tablas (Chow, 1973)]		<b><math>r = 0.998</math></b>
<b>Coef. de Determinación</b>		
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Ecuación (5)]		<b><math>r^2 = 0.993</math></b>
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Tablas (Chow, 1973)]		<b><math>r^2 = 0.997</math></b>
<b>VERANO</b>		
<b><math>n</math> Promedio</b>		
Ecuación (1)	Ecuación (5)	Tablas (Chow, 1973)
<b>0.044</b>	<b>0.045</b>	<b>0.043</b>
<b>Correlación</b>		
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Ecuación (5)]		<b><math>r = 0.981</math></b>
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Tablas (Chow, 1973)]		<b><math>r = 0.991</math></b>
<b>Coef. de Determinación</b>		
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Ecuación (5)]		<b><math>r^2 = 0.963</math></b>
$n$ [Ecuación (1)] vs. $n$ [Tablas (Chow, 1973)]		<b><math>r^2 = 0.982</math></b>

En las Figuras 4 y 5 se observan los resultados para dos áreas relevadas. En estos casos se comparan los  $n$  calculados con la ecuación (1) para una misma área en condiciones de verano e invierno.

Figura 4 - Coeficientes  $n$  de Manning en el área 1 para invierno y verano.

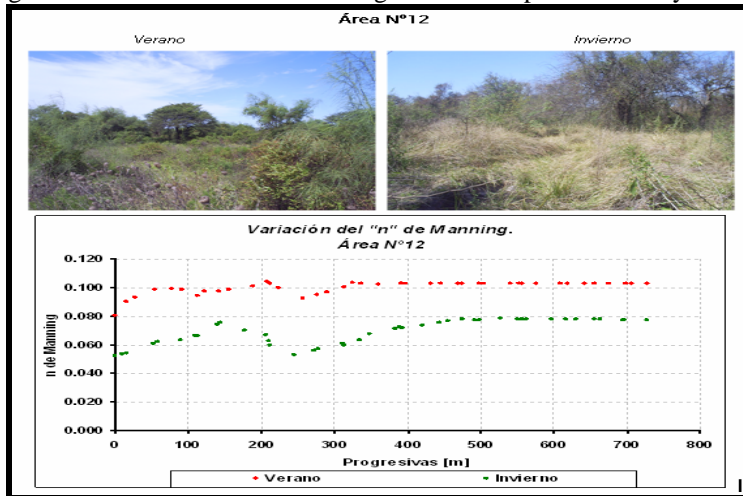
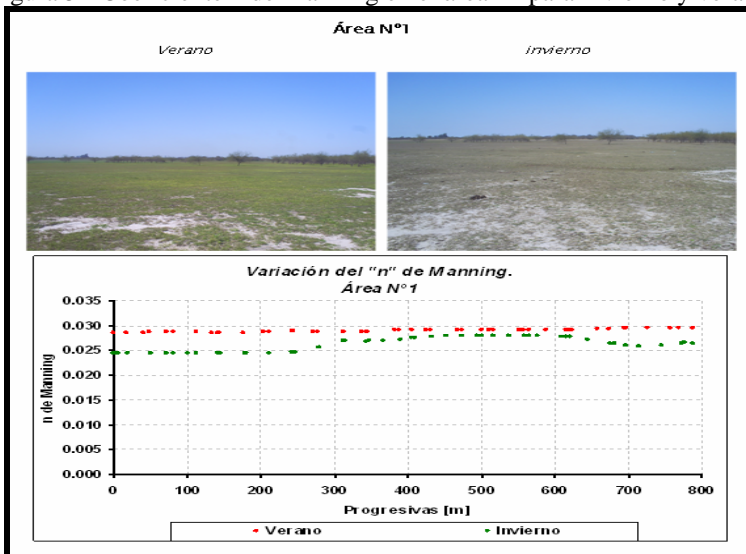


Figura 5 - Coeficiente  $n$  de Manning en el área 12 para invierno y verano.

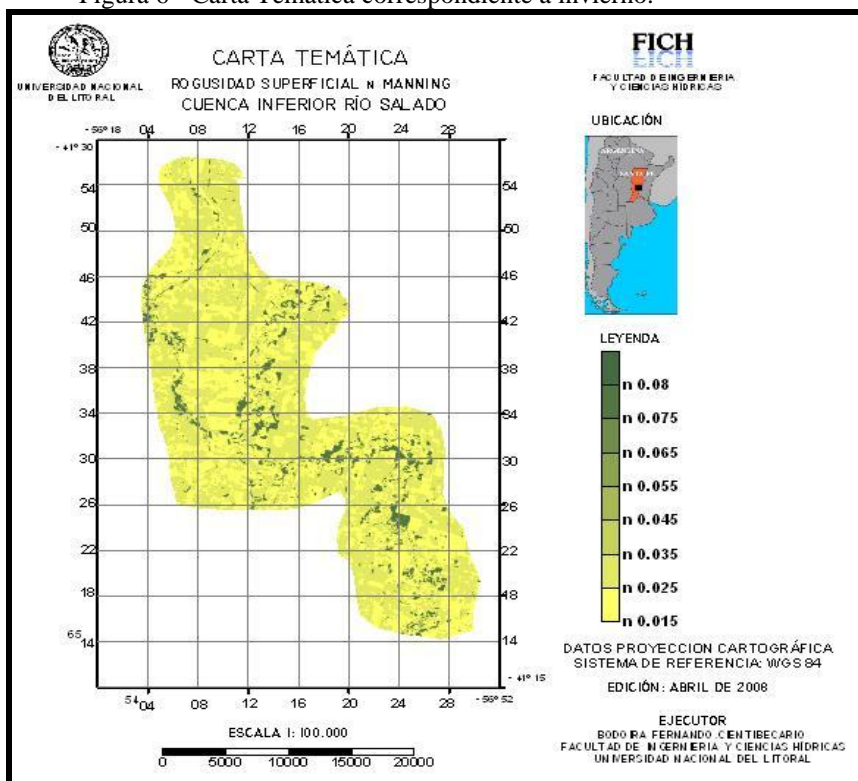


### 4.3 Elaboración del Cartas Temáticas

Para transformar los números identificadores de cada clase en  $n$  de Manning primero se convirtieron las respectivas clasificaciones en archivos vectoriales  $x$ ,  $y$ ,  $n^\circ$  de clases (siendo  $x$ ,  $y$  coordenadas espaciales Gauss Kruger); utilizando para ello el algoritmo de conversión Raster/Vector. De esta forma se obtuvo un archivo  $x$ ,  $y$ ,  $n^\circ$  de clase para cada clasificación los cuales fueron importados como archivo de Surfer 8.0 (Golden Software, Inc.). La superficie asignada a cada punto de coordenadas  $x$ ,  $y$  es de  $900 \text{ m}^2$ , abarcando así toda el área de estudio.

Mediante un algoritmo se transformaron los archivos de clases en archivos de  $n$  de Manning que permitieron su posterior procesamiento con Surfer 8.0 (Golden Software, Inc.) lo cual da como resultado cartas temáticas de rugosidad superficial. La carta correspondiente a invierno se muestra en la Figura 6.

Figura 6 - Carta Temática correspondiente a invierno.



## 5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta representa bien lo observado en campo, existe una buena correlación entre los  $n$  de Manning calculados y los obtenidos a través de métodos empíricos con coeficientes superiores a 0.98. En relación al contraste entre áreas en invierno y verano, se comprueba lo muestreado en campo y se aprecia una variación del 45% en el valor del coeficiente de rugosidad entre invierno y verano, dicha variación se explica debido a que la vegetación alcanza su mayor vigor principalmente en verano.

Se debe destacar que es la primera vez que se realizan cartas temáticas de rugosidad superficial en la cuenca inferior del Río Salado y los resultados alcanzados captan las variaciones de la vegetación que se presentan de estación en estación.

Las cartas temáticas resultantes de este trabajo serán empleadas como información en modelos hidrodinámicos con el objeto de evaluar el transporte de sedimentos y metales tóxicos en el área estudiada.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco de los Proyectos de Investigación CAI+D 2006: "Transporte de Sedimentos Finos y Metales Tóxicos en Cursos Fluviales" - PI 24-136, CAI+D 2006 "Determinación del contenido de humedad del suelo desde imágenes RADAR" - PI 24-135, ambos subsidiados por la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe) y los proyectos de investigación subsidiados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina: PICTO 36138 "Estudio Hidrodinámico Ambiental en las Planicies de Inundación del Río Salado (Santa Fe)" y PICTO 35966 "Extracción del contenido de humedad del suelo desde imágenes SAR".

## BIBLIOGRAFÍA

- E.M. ASSELMAN N. AND M. VAN WIJNGAARDEN. Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 268:127–142, 2002.
- J.B. CAMPBELL. *Introduction of remote sensing*, 2º Ed. Taylor & Francis, Great Britain, U.K. 621 p, 1996.
- CEPAL, Las inundaciones de 2003 en Santa Fe, Argentina. Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental. Disponible en Internet: <http://www.eclac.cl/argentina/noticias/noticias/0/12620/presentacion.pdf>, 2003.
- V.T. CHOW. Hidráulica de Canales Abiertos. *Editorial Nomos S.A.* Santa Fe de Bogotá, Colombia. 2000.
- CONAE. Centro Nacional de Actividades Espaciales. *Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto.* Republica Argentina.

- R.G. CONGALTON AND K. GREEN. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida. 137 p. 1999.
- J.R. EASTMAN, J.E. MCKENDRY AND M.A FULK. *Change and time series analysis*. United Nations Institute for Training Research/GRID, Génova, Suiza. 119 p.1995.
- SSRH, *Subsecretaria de Recursos Hídricos, Estadística Hidrológica de la República Argentina*. Presidencia de la Nación, Rep. Argentina, 2004.
- SURFER VERSION 8.02. *Surface Mapping System*. Copyright<sup>c</sup> 1993-2002, Goleen Software, Inc. 2002.
- T.R. STURM. *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill. New York, 2001.
- C.H. TSAI, S. IACOBELLIS AND W. LICK. Flocculation of Fine-Grained Lake Sediments Due to a Uniform Shear Stress, *Journal Great Lakes Research*, 13:2:135-146, 1987.

(Invited paper -agosto de 2009.)