

## **ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA (CN) A PARTIR DE LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES EN LA CUENCA DEL A° LUDUEÑA, SANTA FE, ARGENTINA**

Carlos M. Scuderi y Hernán Stenta

Becarios Doctorales CONICET

Departamento de Hidráulica - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Argentina

Telefax: +54 +341 4808541. e-mail: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

### **RESUMEN**

El procesamiento y la interpretación de imágenes satelitales tienen una notable potencialidad de aplicación en diversos ámbitos, entre ellos los relacionados con los recursos hídricos. Las utilidades de la Teledetección conjuntamente con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten manipular gran cantidad de información con facilidad y rapidez, siendo de inestimable ayuda en tareas como proyecto, gestión e investigación de los recursos hídricos. En el presente trabajo se emplean las potencialidades de la Teledetección conjuntamente con los SIG con el objetivo de estimar mapas de CN (Método del Número de Curva del SCS) utilizando imágenes Landsat TM y ETM+ de diferentes épocas, aplicando procedimientos de clasificación supervisada y no supervisada. Junto a estas herramientas, son empleados un mapa de suelos y la condición de humedad antecedente a la fecha de las imágenes analizadas. Los resultados indican que los valores medios de CN obtenidos a partir de ambas clasificaciones no difieren significativamente, aunque sí difieren en su distribución espacial, lo que podría influenciar la modelación matemática distribuida del escurrimiento sobre la cuenca.

**Palabras Clave:** Numero de Curva, Imágenes Satelitales, Cuencas de llanura.

### **ABSTRACT**

Processing and interpretation of satellite data have a considerable potentiality of application in several scopes, among them the related ones to the water resources. Utilities of Remote Sensing together with Geographic Information Systems (GIS), allows to manipulate great amount of information easily and quickly, having important applications in the fields of project, management and research of the water resources. In the present study potentialities of Remote Sensing and GIS were employed to elaborate CN maps (Curve Number of the SCS) using Landsat TM and ETM+ imagery and applying supervised and not supervised classification. Both soil map and antecedent moisture condition of the watershed are used. Results shows that the average values of CN obtained from both classifications do not differ significantly, but these ones differ in their spatial distribution. The latter may affect the outcomes of distributed mathematical modelling of the basin runoff.

**KeyWords:** Curve Number, satellite data, flatland basins.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el tratamiento y análisis de imágenes satelitales tiene una notable potencialidad de aplicación en diversos ámbitos con fines muy variados, entre ellos los relacionados con el estudio y análisis de los recursos hídricos. A su vez, dentro de esta temática existen innumerables aplicaciones pudiendo mencionar entre algunas de ellas las relacionadas con la determinación de parámetros distribuidos espacialmente para su incorporación en modelos matemáticos hidrológicos, el seguimiento de la evolución temporal de cuerpos de agua, las modificaciones del uso de la tierra, etc.

Las utilidades de la teledetección, conjuntamente con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten operar gran cantidad de información distribuida en el espacio con facilidad y rapidez, permitiendo el intercambio continuo de la información entre dichas herramientas y otras ampliamente utilizadas como ser planillas de cálculo o programas de diseño asistido por computador (CAD). Logrando de esta manera, disminuir el costo computacional, siendo de suma utilidad a la hora de su implementación en tareas como el proyecto y/o la investigación de temas relacionados con los recursos hídricos.

Es posible mencionar algunos trabajos desarrollados en la temática; Ferrer Juliá et al (1998) han obtenido mapas de CN para seis cuencas experimentales de España con la finalidad de estudiar las diferencias que presentan dichas estimaciones del parámetro de CN a partir de diferentes fuentes de información; Pandey et al (2003) han utilizado un SIG para construir diferentes capas de información de entrada, una de grupo hidrológico del suelo, otra de vegetación y una tercera de la condición de humedad antecedente, para la aplicación del método del SCS en una cuenca rural de 2793 has ubicada en el estado de Jharkhand (India); Zimmermann et al (2004) han utilizado las potencialidades del sensoriamiento remoto y los SIG conjuntamente con la modelación matemática hidrológica distribuida para el estudio del saneamiento hídrico en áreas inundables de la localidad de Chañar Ladeado (Santa Fe, Argentina); Vouilloud y Brizuela (2005) han delimitado zonas con características erosivas homogéneas en un sector de los alrededores de la localidad de La Paz, Provincia de Entre Ríos, Argentina.

En el presente trabajo, a modo de estado de avance en la temática de la modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial y sus utilidades y

aplicaciones, es utilizada la teledetección, conjuntamente con los SIG con la finalidad de generar mapas de CN para estadios temporales diferenciados utilizando firmas espectrales y conocimiento de campo; a través de la aplicación de procedimientos de clasificación supervisada y no supervisada en la cuenca del A° Ludueña, ubicada en el sector sureste de la provincia de Santa Fe, Argentina.

El SCS (Soil Conservation Service) de los EEUU desarrolló un método ampliamente difundido para calcular mediante abstracciones las pérdidas durante el transcurso de una tormenta tanto en cuencas rurales como semiurbanas y urbanas (Chow et al., 1994). El método utiliza como parámetro básico el número de curva (CN) que representa las características medias del complejo hidrológico suelo-vegetación, estando relacionado con el estado de humedad del suelo, el uso del suelo y las prácticas de manejo (Riccardi, 2004). Este parámetro es utilizado por diferentes modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos distribuidos espacialmente desarrollados en el ámbito del Departamento de Hidráulica y CURIHAM (Zimmermann, 2000; Zimmermann y Riccardi, 2000; Riccardi, 2001) perteneciente a la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

La cobertura de suelo se obtuvo a través del tratamiento y análisis de imágenes Landsat correspondientes a febrero de 1992, abril de 2000, junio de 2001 y septiembre de 2001; definiendo cuatro clases de cobertura al descartar los cursos de agua y terraplenes (viales y ferroviarios) debido a su reducido porcentaje dentro del área de estudio. A su vez fue digitalizado el mapa de suelos de la región para poder asociar el tipo de suelo con los grupos hidrológicos definidos por el SCS (hallando que los mismos se encuentran clasificados como clase C y D; este último en pequeña proporción dentro de la cuenca, del orden del 10 %). La información anterior, junto con el conocimiento de la condición de humedad antecedente del suelo referida a la fecha de registro de la imagen, permiten estimar un valor de CN cada 900 m<sup>2</sup> (siendo la unidad de análisis un píxel de 30 m x 30 m).

## DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' y 60° 39' O (Figura 1); perteneciendo a la provincia de Santa Fe, República Argentina. Su área

de aporte es de 694 Km<sup>2</sup> y la elevación varía entre 70 y 18 m sobre el nivel del mar. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos que aportan al escurrimiento, con una longitud total de aproximadamente 140 Km. El caudal base del arroyo Ludueña es de 0,50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> y en extraordinarias (R > 50 años) caudales superiores a los 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Riccardi et al., 2002). La precipita-

ción media anual es de 980 mm. El suelo predominante es de tipo arcilloso-limoso presentando condiciones de permeabilidad moderada a moderadamente lenta (Pouey, 1998), con pendiente media del orden de 1,0 m.Km<sup>-1</sup>. Además, la región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios, lo que permite observar una fuerte acción antrópica ejercida sobre la cuenca. Por su parte, la agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente la producción de soja y en menor medida el maíz y el trigo.

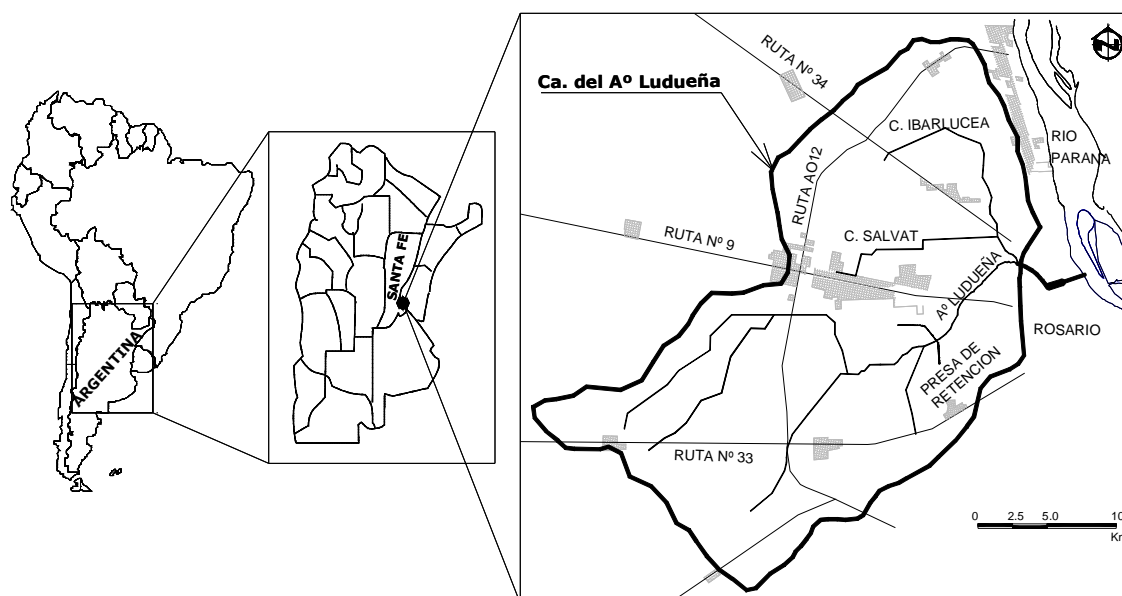


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña, ubicación geográfica y límites

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del presente trabajo se dispone de cuatro imágenes de la misión Landsat (path 227, row 083) correspondientes a las fechas 04/02/1992, 22/04/2000, 20/06/2001 y 08/09/2001 de 30 m x 30 m de resolución por píxel. A partir de cada una de ellas, se elabora un mapa de coberturas de suelo, siendo éste la base para la confección del mapa de número de curva. Para ello, las imágenes deben pasar por una serie de procesos que pueden ser agrupados en tres etapas: (a) corrección radiométrica, (b) corrección geométrica y (c) clasificación de coberturas. Estos trabajos se realizaron con el software de procesamiento de imágenes ENVI v3.5 (2001).

### Corrección radiométrica

Esta corrección permite realizar la comparación entre imágenes tomadas por diferentes sensores y en

diferentes épocas, con lo que se consigue realizar estudios multitemporales; o sea que esta tarea permite llevar las imágenes a un mismo "sistema de referencia radiométrico" (Chander y Markham, 2003). El resultado de este procedimiento es lograr niveles de reflectividad para cada píxel, existiendo un paso intermedio que consiste en la transformación del número de cuenta digital (CD) que está en la imagen original a radiancia.

Los valores de radiancia para cada píxel, fueron calculados según la ecuación 1, para las imágenes de los años 1992 y 2001 (Landsat 5, sensor TM). Mientras que para la imagen del año 2000 (Landsat 7, sensor ETM+) fue utilizada una pequeña modificación de la misma, referida aquí como ecuación 2 (Chander y Markham, 2003). La particularidad de utilizar dos ecuaciones se debe meramente a la información contenida en los archivos header (\*.hdr) de cada imagen.

$$L = G.CD + B \quad (1)$$

$$L = \left( \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Qcal_{\max} - Qcal_{\min}} \right).CD + L_{\min} \quad (2)$$

donde: **L** es la radiancia espectral en el sensor [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ]; **G** es el Gain [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}.CD^{-1}$ ]; **B** es el Bias [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ]; **CD** es el valor de la cuenta digital dado por cada píxel en la imagen original; **L<sub>max</sub>** es la radiancia espectral escalada al valor **Qcal<sub>max</sub>** [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ]; **L<sub>min</sub>** es la radiancia espectral escalada al valor **Qcal<sub>min</sub>** [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ]; **Qcal<sub>max</sub>** y **Qcal<sub>min</sub>** son los valores máximo y mínimo de píxel calibrado, respectivamente. Los valores de Gain (**G**) y Bias (**B**) son factores de escala propios de cada banda y son suministrados en el archivo header adjunto a las bandas que constituyen la imagen. Los valores de **L<sub>min</sub>** y **L<sub>max</sub>** igualmente son dependientes de cada banda y son dados por el archivo header de la imagen.

Una vez obtenidos los valores de radiancia para cada píxel en cada banda, se procede a calcular los valores de reflectividad al tope de la atmósfera, esta operación permite disminuir la variabilidad entre escenas mediante una normalización de la irradiancia solar. La radiancia es calculada mediante la ecuación 3 (Chander y Markham, 2003):

$$R(\%) = \frac{\pi.L.d^2}{E_{SUN} .sen(\theta)} \quad (3)$$

donde: **R** es la reflectividad al tope de la atmósfera [%];  $\pi$  es la constante 3.1415; **L** es la radiancia espectral [ $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ] calculada con la ec. 1 o la ec. 2 (según corresponda); **d** es la distancia Sol-Tierra en unidades astronómicas; **E<sub>SUN</sub>** es la irradiancia exoatmosférica solar media [ $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ ]; y  $\theta$  es el ángulo de elevación solar [rad]. La magnitud **d** varía en función de la época del año, mientras que los valores de **E<sub>SUN</sub>** son función del tipo de sensor y de la banda a analizar. Ambas variables se encuentran tabuladas en la publicación de Chander y Markham (2003).

### Corrección Geométrica

En esta etapa se realizó la unificación de los sistemas de proyección debido a que la mayoría de datos a utilizar (límite de cuenca, rutas, cursos de agua, ferrocarriles y mapa de suelos) se encontraban en el sistema de referencia Gauss Krugger. Se optó por

convertir las imágenes, suministradas en el sistema UTM (zona 20 S) a Gauss Krugger (Faja 5 - Datum Campo Inchauspe), para lo cual fueron verificados en la imagen puntos de coordenadas conocidas, tales como cruces de rutas, cruces de cursos de agua con caminos; lográndose adecuados niveles de precisión. Luego de esta operación, se procedió a definir el área de trabajo sobre la imagen con ayuda de una máscara de límites de la cuenca (Figura 2).



Figura 2. Imagen satelital y límite de cuenca (Banda 1, febrero de 1992)

### Clasificación de coberturas

En función del uso del suelo predominante, de la topografía de la cuenca y teniendo en cuenta el objetivo final, que es la estimación del valor de curva número (CN) para cada píxel de la imagen; fueron determinadas cuatro clases de cobertura de suelo:

- CLASE 1:** Suelo húmedo no cultivable (zonas de napas altas, bajos, márgenes de cursos de agua).
- CLASE 2:** Suelo cultivable con vegetación nula o escasamente desarrollada.
- CLASE 3:** Vegetación desarrollada (principalmente cultivos de soja).
- CLASE 4:** Ciudades.

A causa de la alta dispersión hallada en los valores de reflectividades de las zonas pobladas se decidió descartarlas del proceso de clasificación mediante el uso de una máscara aplicada sobre los centros poblados. Para obtener un mapa temático del uso del suelo, don-

de los valores de píxel son transformados de radiancia a clases, fueron aplicados dos métodos de clasificación, uno no supervisado y el otro supervisado:

**(a) Clasificación no supervisada**

Para realizar la misma, donde la intervención del operador es mínima, se aplicó el método ISODATA en todas las bandas (excepto la banda 6 correspondiente al infrarrojo térmico), definiendo 3 clases, aplicando 20 iteraciones y utilizando una máscara de delimitación de cuenca y otra de ciudades. En función de los resultados obtenidos en la clasificación, fue asignada a cada clase el uso de suelo referido anteriormente.

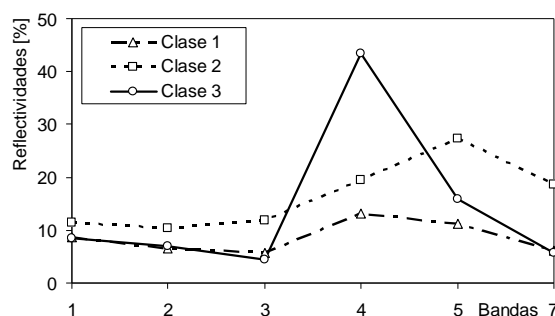
**(b) Clasificación supervisada**

La metodología seguida fue delimitar zonas o regiones de entrenamiento con similar respuesta espectral, lo cual se realizó utilizando la imagen generada de la composición 432 (para las cuatro fechas) como referencia para la selección. La mecánica fue proponer zonas de reflectividad homogénea en cada banda y determinar los valores medios y desvíos estándar de la “firma espectral”, pudiendo corroborar de esta manera la uniformidad de las muestras. De esta manera fueron propuestas, descartadas y elegidas varias zonas de interés por cada clase, con una cantidad de pixels (promedio de las cuatro escenas) de 3139 para la clase 1, 2658 para la clase 2 y 2736 para la clase 3. Los valores medios de reflectividad

para cada banda de las cuatro imágenes son reproducidos en la Tabla 1 y en la Figura 3.

**Tabla 1. Valores medios de reflectividades R(%)**

Banda	Clase 1	Clase 2	Clase 3
1	8.7	11.5	8.6
2	6.6	10.4	7.1
3	5.7	11.9	4.5
4	13.2	19.4	43.5
5	11.2	27.4	16.0
7	6.1	18.7	5.6



**Figura 3. Curvas espectrales promedio**

En la Tabla 2 son presentados los resultados (expresados en valores porcentuales del área total de la cuenca) de ambas clasificaciones para todas las imágenes. Una particularidad de la clasificación, es que la clase 4 (ciudades) tiene valores constantes para ambas clasificaciones debido a la aplicación de una máscara, que las descarta del proceso de clasificación.

**Tabla 2. Distribución porcentual del uso del suelo en el área de la cuenca (694 Km<sup>2</sup>)**

Clase	Febrero 1992		Abril 2000		Junio 2001		Septiembre 2001	
	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS
1	49.8	34.2	51.7	38.5	56.8	27.9	60.2	45.1
2	6.2	29.1	15.5	29.0	19.5	42.5	8.5	18.0
3	39.5	32.2	28.2	27.9	19.1	25.1	26.7	32.4
4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

(\*) S: clasificación supervisada, NS: clasificación no supervisada

**Asignación de valores de CN**

Según la clasificación dada por el SCS para los grupos hidrológicos de suelo, los tipos encontrados en la zona de estudio corresponden a los grupos C y D; mostrándose en la Figura 4 la distribución de los mismos en la cuenca. Las características y particularidades de los grupos analizados dadas por (Chow et. al., 1994) son:

*Grupo C:* margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.

*Grupo D:* suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Para poder establecer la condición de humedad en que se hallaba la cuenca en las fechas de las imágenes, fueron consultados los registros de precipitación ocurrida con 5 días de anterioridad a las fechas analizadas. El detalle de los mismos junto al tipo de estación (activa o inactiva), el cual define los límites para calcular la condición de humedad antecedente, son mostrados en la Tabla 3. Resultando que la

cuenca se hallaba en condición de humedad antecedente I durante la ocurrencia de los cuatro eventos.

$$CN(I) = \frac{4,2.CN(II)}{10 - 0,058.CN(II)} \quad (4)$$

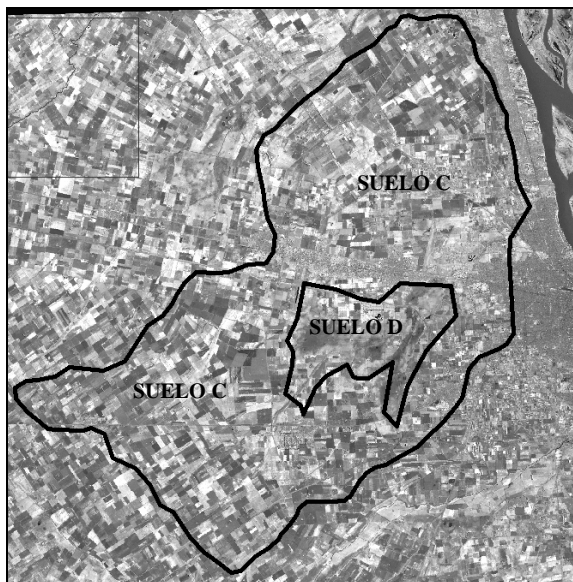


Figura 4. Grupos de suelo (clasificación del SCS)

Tabla 3. Precipitación antecedente registrada

Fecha	Lluvia [mm]	Estación
04/02/1992	32,7	Activa
22/04/2000	17,7	Activa
20/06/2001	0,0	Inactiva
08/09/2001	1,7	Activa

El método del SCS está planteado para condición II de humedad antecedente, por lo cual una vez definidos los valores de CN elegidos según el uso del suelo y el grupo al cual pertenecen, fueron calculados los correspondientes valores de CN para la condición I de humedad antecedente a través de la siguiente ecuación (Chow et. al., 1994):

Los valores de CN fueron elegidos tomando como referencia la normativa TR-55 (1986), y son representados para ambas condiciones en la Tabla 4:

Tabla 4. Asignación de valores de CN

Clase	Grupo C		Grupo D	
	CN (I)	CN (II)	CN (I)	CN (II)
1	81	91	87	94
2	74	87	79	90
3	66	82	70	85
4	87	94	87	94

#### Distribución espacial de CN mediante cruzamiento utilizando técnicas de SIG

La técnica utilizada para asignar el valor de CN a cada píxel, fue el cruzamiento de la información suministrada por los mapas de clases derivados de las clasificaciones (en formato raster) con el mapa de grupos de suelo. Esta operación fue realizada con el programa Ilwis 3.3 (2005), para lo cual el mapa de grupos de suelo fue importado como polígono y posteriormente convertido a imagen raster. El cruzamiento genera como resultado un mapa temático con ocho combinaciones (4 coberturas de suelo por 2 tipos de suelo) y una tabla asociada al mismo con la cantidad de píxeles por clase y el área correspondiente respecto de la cuenca. La etapa siguiente es asociar a cada combinación el valor de CN respectivo (dado en la Tabla 4), con lo cual se obtiene un nuevo mapa temático con los valores de CN de cada píxel para cada imagen. En la Tabla 5 se muestran los porcentajes respecto del área total de la cuenca y los valores medios de CN para las cuatro imágenes estudiadas, tanto para la clasificación supervisada como para la no supervisada.

Tabla 5. Distribución porcentual y Valores Medios del CN en el área de la cuenca (694 Km<sup>2</sup>)

Valores de CN	Febrero 1992		Abril 2000		Junio 2001		Septiembre 2001	
	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS
66	38.2	31.2	26.1	25.7	17.9	23.2	25.7	30.8
70	1.26	0.94	2.11	2.22	1.18	1.90	1.01	1.53
74	5.08	27.1	15.0	28.1	19.1	40.4	8.47	17.5
79	1.09	1.98	0.49	0.94	0.39	2.06	0.04	0.44
81	42.1	27.0	44.3	31.6	48.3	21.8	51.2	37.0
87	12.3	11.7	12.1	11.5	13.1	10.7	13.6	12.7
<b>CN medios</b>	<b>75.5</b>	<b>75.0</b>	<b>76.5</b>	<b>75.6</b>	<b>77.6</b>	<b>75.1</b>	<b>77.3</b>	<b>75.7</b>

(\*) S: clasificación supervisada, NS: clasificación no supervisada

En forma de resumen, se esquematiza el procedimiento seguido para obtener el mapa de CN a partir de la información dada por el mapa de clases de uso del suelo, el mapa de suelos y la condición de humedad antecedente:

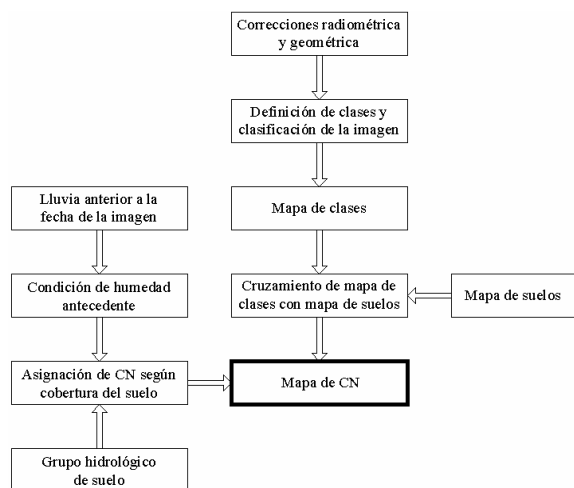


Figura 5. Esquema del procedimiento efectuado

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Un primer análisis que se realizó fue la comparación entre valores medios de CN para ambas clasificaciones (Tabla 5). De dicha comparación puede observarse que los valores medios para las cuatro imágenes no difieren significativamente; encontrándose un valor mínimo de 75.5 para la imagen de Febrero de 1992 y un valor máximo de 77.6 para la imagen de Junio de 2001 para la clasificación supervisada y valores mínimos y máximos de 75.0 (Febrero de 1992) y 75.7 (Septiembre de 2001) respectivamente, para la clasificación no supervisada.

Tanto los valores medios de CN, como el rango de variación son mayores para la técnica de clasificación supervisada. Esto puede ser explicado por el hecho de que la mayor diferencia se encuentra en la determinación de las clases 1 (suelo húmedo no cultivable) y 2 (suelo húmedo con vegetación de pequeño porte) según lo representado en la Tabla 2. Se tiene que, en media, la clasificación supervisada arroja valores de 54.6 % para la clase 1 y 12.4 % para la clase 2, en cuanto que la clasificación no supervisada arroja valores de 36.4 % y 29.7 % respectivamente. En contraposición para la clase 3 (vegetación desarrollada) ambas clasificaciones producen resultados similares; 28.4 % para la clasificación supervisada y de 29.4 % para la no supervi-

sada. Debido a que el parámetro CN depende fundamentalmente del uso y tipo de suelo, estas diferencias se traducen en un mayor valor de CN para la clasificación supervisada, donde el porcentaje en función del área total de la cuenca para la clase 1 es mayor. Por otra parte, los porcentajes entre las diferentes clases, para la clasificación no supervisada (Tabla 2), no difieren significativamente por lo que se obtiene una distribución más uniforme de las diferentes clases respecto de la clasificación supervisada.

Los valores de CN fueron agregados en unidades o celdas de 500 m x 500 m, arrojando un total de 2800 valores para la cuenca en estudio. Respecto de la variabilidad espacial del CN, se realizó la comparación entre imágenes (para ambas clasificaciones) proponiendo como referencia la imagen de febrero de 1992. El procedimiento seguido fue calcular la diferencia (celda a celda) entre el valor de CN de la imagen a comparar y el valor de CN de la imagen de 1992:

$$CN_{DIF} = CN_i - CN_{1992} \quad (5)$$

donde: *i* hace referencia a las imágenes de abril de 2000, junio de 2001 y septiembre de 2001. El rango de variación obtenido para la diferencia de CN ( $CN_{DIF}$ ) fue de -15 a +15 para todas las imágenes; no obstante el 90 % de los valores se encuentran dentro del entorno -10 a +10. Un valor negativo indica la disminución en el valor de CN en la imagen contrastada (o sea respecto de la imagen de febrero de 1992), por lo que un valor positivo indica un aumento del mismo.

A modo de ejemplo se muestran los tres mapas obtenidos para la clasificación supervisada (Figuras 6, 7 y 8) donde puede apreciarse en diferentes tonos de grises la distribución espacial de las diferencias, correspondiendo negro a -15 y blanco a +15. Del análisis de las tres imágenes se desprende que: las regiones sur (principalmente) y noroeste de la cuenca, ambas de tonos claros, presentan valores mayores de CN (respecto de la imagen de febrero de 1992); mientras que la zona central no presenta mayores cambios. Por su parte, los tonos más oscuros se encuentran principalmente en la zona norte y dispersos a lo largo de toda la cuenca. Este análisis justifica el aumento (aunque en pequeña proporción) de los valores medios del CN de las imágenes de abril de 2000, junio de 2001 y septiembre de 2001 con respecto a la de febrero de 1992; al verificarse un pequeño predominio de los tonos más claros. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, no se han

encontrado diferencias significativas entre los valores de CN en la zona central de la cuenca ( $CN_{DIF}=0$ ); en correspondencia con los suelos bajos y húmedos (tipo D); mientras que las mayores variaciones de CN se dan en zonas preponderantemente destinadas a cultivos. Es importante notar que las comparaciones entre imágenes corresponden a diferentes años y a diferentes épocas; por lo que se debe tener en cuenta

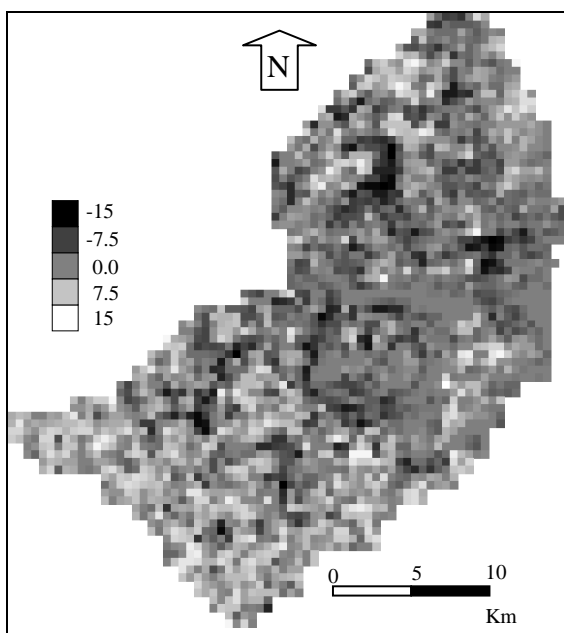


Figura 6. Diferencia de CN entre Abril de 2000 y Febrero 1992. Clasificación Supervisada.

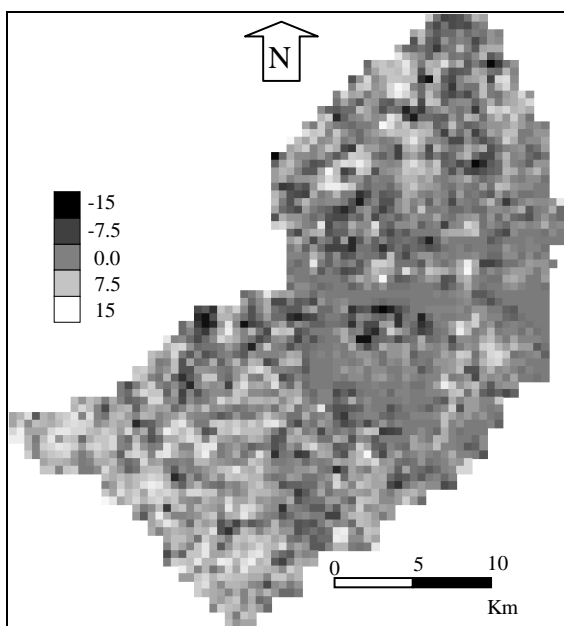


Figura 7. Diferencia de CN entre Junio de 2001 y Febrero 1992. Clasificación Supervisada.

que la cobertura del suelo y por ende los valores de CN varían también para las diferentes épocas dentro de un mismo año, fundamentalmente debido a la evolución del estado de crecimiento de los cultivos.

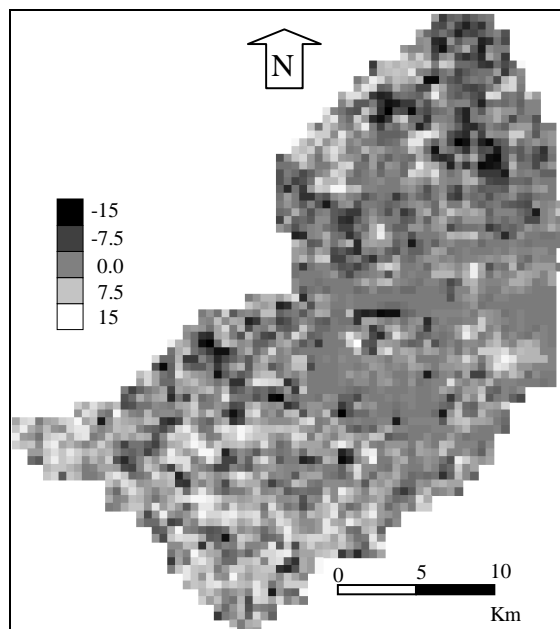


Figura 8. Diferencia de CN entre Septiembre de 2001 y Febrero 1992. Clasificación Supervisada.

## CONCLUSIONES

A pesar de obtener valores medios de CN similares a partir de ambas clasificaciones, una diferencia notoria es que la clasificación no supervisada es más uniforme produciendo porcentajes casi similares para las diferentes clases (36,4% para la clase 1, 29,7 % para la clase 2 y 29,4 % para la clase 3). Mientras que en la clasificación supervisada existe una marcada diferencia, principalmente entre las clases 1 y 2 (54,6 % para la clase 1, 12,4 % para la clase 2 y 28,4 % para la clase 3). Esto justifica el hecho de que los valores medios de CN obtenidos con la clasificación supervisada sean mayores a los obtenidos con la clasificación no supervisada. La variabilidad del CN, para esta cuenca, está dada principalmente por las características del uso del suelo, ya que mayoritariamente el suelo pertenece al grupo hidrológico C (del orden del 90 %).

Se destacan la importancia y potencialidad de esta metodología a la hora de mejorar la representación espacial de parámetros en la cuenca para su incorporación en modelos matemáticos hidrológicos distribuidos. En el ámbito del Departamento de Hidráulica y CURIHAM pertenecientes a la Facul-



tad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (Universidad Nacional de Rosario) se cuenta con diferentes modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos distribuidos espacialmente desarrollados por Riccardi (2001), Zimmermann (2000) y Zimmermann y Riccardi (2000) y una plataforma computacional para manejo de información y procesamiento de resultados de los modelos matemáticos mencionados (Stenta et al, 2005).

Pese a que los valores medios cotejados a partir de las imágenes satelitales resultan similares; se observa la existencia de variabilidad espacial de este parámetro. Lo anterior podría influenciar la respuesta hidrológica de la cuenca, por lo que sería deseable incluir la variabilidad del CN en la modelación matemática hidrológica distribuida y analizar los efectos de dicha variabilidad espacial.

La detección de áreas con mayor variabilidad del parámetro CN, permite conocer las zonas donde es probable que los cambios en el uso del suelo y por ende en los valores de CN, puedan influenciar sobre el escurrimiento superficial. Por lo que puede proponerse el seguimiento y análisis de dichas áreas en forma más detallada.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chander, G. y Markham, B. 2003. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, N. 11, pp 2674-2677.
- Chow Ven Te; Maidment, D.; Mays, L. 1994 Hidrología Aplicada. McGraw Hill Interamericana S.A. SantaFe de Bogotá, 584 p.
- ENVI 3.5. 2001. The Environment for Visualizing Images. Research Systems, Inc.
- Ferrer Juliá, M.; Ruiz Verdú, A; Dimas Suárez, M.; Estrela Monreal, T. 1998. Aportación de la Teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva. Ingeniería del Agua, Vol. 5, Num. 1, pp 35-46.
- ILWIS 3.3 Academic. 2005. ITC, RSG/GSD. [www.itc.nl/ilwis/](http://www.itc.nl/ilwis/)
- Pandey, A; Chowdary, V. M; Mal, B. C; Dabral, P. P. 2003. Estimation of runoff for agricultural watershed using SCS Curve Number and Geographic Information System. Map India Conference 2003. 8 p. <http://www.gisdevelopment.net/application/agriculture/soil/mi0348.htm>
- Pouey, N. 1998. Erosión Hídrica en cursos de Llanura sobre lechos cohesivos. UNR Editora. 164 p.
- Riccardi, G. A. 2001. Un sistema de modelación Hidrologica-Hidraulica cuasi-bisimensional para ambientes rurales y urbanos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, 279 p.
- Riccardi, G.; Scuderi, C. y Stenta, H. 2002. Modelo de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en La cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina. XIX Congreso Nacional del Agua, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. 2004. Hidrología en Medios Antropizados. Libro electrónico, cap 4. Universidad Nacional de Rosario. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar/>
- Stenta, H.; Rentería, J. P.; Riccardi, G. 2005. Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial. XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 74. pp 1-13.
- Technical Release 55. 1986. Urban Hydrology for small watershed. Second Edition.
- Vouilloud, F. A y Brizuela, A. B. 2005. Identificación de áreas con características erosivas semejantes utilizando teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 11 (1). ISSN 1514-2906. pp 1-8.
- Zimmermann E, Riccardi G. 2000. Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Areas de Llanura. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR. Vol II. 169-178. Córdoba. Argentina. ISBN 950-33-0267-6.
- Zimmermann E. 2000. Aplicación y Calibración del Modelo SHALL3 en el Sistema Hidrológico del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR. Vol II. 713-722. Córdoba. Argentina. ISBN 950-33-0267-6.
- Zimmermann, E; Rentería, J. P.; Stenta, H; Riccardi, G. 2004. Uso de sistemas de Información geográfica e Imágenes Satelitales y su Aplicación en Hidrología. Caso de Estudio: Sector Norte de Chañar Ladeado (Santa Fe, Argentina). Cuadernos del CURIHAM, Vol 10. ISSN 1514-2906. pp 85-95.

*Artículo recibido el 10/2006 y aprobado para su publicación el 01/2007.*