



Universidad Nacional de Córdoba  
**Facultad de Ciencias  
Agropecuarias**  
Escuela para graduados



Universidad Nacional de Río Cuarto  
**Facultad de Agronomía y  
Veterinaria**  
Escuela de Postgraduación

---

**NÚMERO DE CURVA APLICADO A UNA  
CUENCA AGRÍCOLA DE LA REGIÓN CENTRAL  
DE CÓRDOBA, ARGENTINA**

**Ricardo Luis Luque**

Tesis

Para optar por el Grado Académico de  
Magíster en Gestión Ambiental Agropecuaria

Córdoba, 2008

# NÚMERO DE CURVA APLICADO A UNA CUENCA AGRÍCOLA DE LA REGIÓN CENTRAL DE CÓRDOBA, ARGENTINA

**Ricardo Luis Luque**

## **Comisión Asesora de Tesis**

**Director:**

Dr. Juan Carlos Bertoni

Ing. en Hidrología e Hidráulica

## **Tribunal Examinador de Tesis**

Ing. Agr. (Dr.) Hernán Apezteguía .....

Ing. Agr. (MSc.) José M. Cisneros .....

Ing. Geógr. (MSc.) Hugo Marelli .....

**Presentación formal académica:**

Junio de 2008  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Universidad Nacional de Córdoba



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons  
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba y a la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, por promover y facilitar el desarrollo de postgrado de sus docentes.

A los directivos y personal de la Escuela para Graduados de la Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNC, por su atenta disposición para resolver los problemas presentados. Una mención especial para Olga del Longo y María Rosa.

A la Escuela de Postgrado de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Al CONICOR, SeCyT-UNC y CONICET, por su aval y apoyo financiero para llevar adelante el desarrollo de esta tesis.

A la Junta Académica de la Maestría en Gestión Ambiental Agropecuaria, por el compromiso demostrado en la conducción de esta maestría.

A mi director de tesis, Dr. Juan Carlos Bertoni, por su precisión y claridad de conceptos en las observaciones, así como por su calidez humana.

A los integrantes de la Comisión Revisora de tesis, Hernán Apezteguía, José Cisneros y Hugo Marelli, quienes contribuyeron con su dedicación y observaciones a elevar la calidad de este trabajo.

A mis compañeros de maestría, por los gratos momentos que compartimos.

A Julio Di Rienzo y Mónica Balzarini, por su invaluable disposición y dedicación en los análisis estadísticos.

A mis compañeros del Grupo de Gestión Ambiental de Suelo y Agua, Roberto Sereno, Gustavo Esmoriz, Hernán Apezteguía, Cecilia Vettorello, Antonio Aoki, Eduardo Ruiz Posse, Ma. Rosa Ateca, porque sus análisis, críticas y observaciones permanentes me permitieron superar gradualmente las dificultades.

A mis compañeros de cátedra, Eduardo Ruiz Posse, Alejandro Croce, David Torre y Gustavo Negro, por su apoyo y colaboración para aliviar mis tareas docentes.

Al Dr. Roberto Sereno por su ejemplo de conducta sin concesiones.

*A mis padres, para quienes no tengo palabras para agradecer...*

*A Ana, privilegio que Dios puso en mi vida...*

*A mis hijos...*

# ÍNDICE

RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
<b>SECCIÓN PRIMERA.....</b>	<b>17</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
MEDIOAMBIENTE Y SITUACIÓN PROVINCIAL .....	17
SITUACIÓN PROVINCIAL .....	18
MODELOS HIDROLÓGICOS.....	20
Necesidad de estimación de los escurrimientos y del uso de modelos.....	20
Selección de un modelo hidrológico .....	21
Clasificación de modelos.....	22
Método del Número de Curva del Soil Conservation Service.....	25
OBJETIVOS.....	25
<b>SECCIÓN SEGUNDA .....</b>	<b>26</b>
MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
LA REGIÓN .....	26
Descripción. Aspectos climáticos, fisiográficos y antrópicos regionales...26	
Condiciones agrometeorológicas.....	27
Precipitaciones .....	28
Balance hidrológico .....	30
Temperaturas .....	31
Suelos de la región y evolución de su uso .....	32
Vegetación .....	33
LA CUENCA EN ESTUDIO .....	34
Etapas o pasos requeridos.....	34
Delimitación de una cuenca experimental .....	34
Red hídrica y vial.....	34
Trabajos de sistematización .....	37
Subcuenca de 9.3 ha .....	37
<b>Equidistancia: 0.2 m .....</b>	<b>38</b>
CUENCA GRANDE .....	39
Fisiografía de la cuenca .....	39
Subcuencas y red hídrica .....	39
Parámetros característicos .....	41
Diagrama de la cuenca.....	42
Suelos de la cuenca .....	44
Evolución del uso del suelo en la cuenca .....	44
Instalación de instrumentos registradores de precipitaciones y escurrimiento superficial.....	47
Registro de precipitaciones .....	47
Frecuencia de láminas diarias .....	51
Período de Retorno .....	51
Distribución diaria de las precipitaciones .....	52
Intensidades máximas .....	54
Precipitación ponderada .....	54
Registro de escurrimientos .....	55
Características del canal en la estación de aforo.....	56
Limnógrafo de Cuenca Grande.....	57
Tiempo de Concentración de la Cuenca Grande .....	58

Sensibilidad de la estación limnigráfica .....	58
Sensibilidad de las transformaciones de tirante del canal a caudales .....	58
Coeficiente de rugosidad de Manning .....	61
Aforador de la microcuenca .....	65
Procesamiento de un evento lluvia – caudal en Cuenca Grande.....	67
Planillas de uso del suelo .....	67
NC ponderada .....	68
Escurrimiento observado .....	69
EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA DEL SOIL CONSERVATION SERVICE .....	70
Capacidad del método para representar las diferentes situaciones monitoreadas .....	72
Variabilidad experimentada por el parámetro AMC.....	73
Arhymo.....	76
Corridas de Arhymo.....	77
MÉTODOS ESTADÍSTICOS .....	77
El método Jack Knife.....	78
<b>SECCIÓN TERCERA.....</b>	<b>80</b>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
PARTE I. MICROCUENCA .....	80
La Condición de Humedad Antecedente en la microcuenca.....	80
Evaluación del NC SCS en la microcuenca (labranza convencional)...	82
El Número de Curva ajustado (NCaj).....	82
Comparación de NCaj y NC SCS .....	83
Comparación de Lám Obs y estimada por el método NC SCS.....	83
Procedimiento del SCS para la determinación del NC de condición AMC II .....	86
Ecuaciones no relacionadas con el método del NC.....	88
Ecuación de regresión para lámina de escurrimiento (Lám) .....	89
Ecuación de regresión para determinar un Índice de Precipitación (IPP) .....	89
Comparación de Lám Obs con Lám de la regresión .....	91
Prueba de IPP como única variable regresora.....	95
Ecuación de regresión para el número de curva .....	98
Determinación del modelo de regresión para la variable NCaj.....	98
Determinación con Arhymo de la lámina y caudales de escurrimiento con los NC calculados en la regresión.....	102
PARTE II. CUENCA GRANDE .....	106
Evaluación del NC SCS en la cuenca grande.....	106
Comparación de Láminas Observada y estimada por el método NC SCS.....	106
Pruebas de regresión para lámina de escurrimiento (Lám).....	107
Comparación entre NC ajustado y NC de tablas .....	107
Gráfico de precipitaciones y escurrimientos sobre los NC del SCS .....	108
Ecuaciones de regresión para determinar NC .....	110
Comportamiento del Número de Curva .....	115
Comparación entre NC ajustado y NC de la regresión .....	118
Determinación de la lámina de escurrimiento con el NC de la regresión .....	119
Caudales Máximos.....	123

Comparación de caudales pico observados y con NC de tablas (Qp SCS).....	123
Cálculo de Caudales Pico con el NC de la regresión.....	124
Uso de una ecuación de infiltración.....	127
<b>SECCIÓN CUARTA .....</b>	<b>131</b>
CONCLUSIONES .....	131
TAREAS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	133
LITERATURA CITADA.....	135
<b>SECCIÓN QUINTA .....</b>	<b>145</b>
ANEXOS.....	145
ANEXO 1 .....	145
SUELOS DE LA CUENCA .....	145
DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS .....	145
DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES DE SUELOS DE LA CUENCA MONTE GRANDE.....	147
Serie Los Cerrillos (tentativa) .....	147
Serie Rafael García (tentativa) .....	148
Serie Los Talas (tentativa).....	149
ANEXO 2 .....	152
PROCESAMIENTO DE LLUVIAS PARA CADA SUBCUENCA.....	152
ANEXO 3 .....	153
EJEMPLO DE PLANILLA DE CÁLCULO DE NC PONDERADA .....	153
ANEXO 4 .....	155
EJEMPLO DE PLANILLA DE CÁLCULO DE CAUDALES Y LÁMINA .....	155
ANEXO 5 .....	156
MÉTODO DEL NC – SCS .....	156
Humedad antecedente .....	157
ANEXO 6 .....	160
CORRIDA DE ARHYMO .....	160
ANEXO 7 .....	166
PLANILLAS DE USO DEL SUELO.....	166

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1- Erosión en la Provincia de Córdoba, año 2003, en miles de ha .....	19
Tabla II.1- Precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) de distintas localidades de la Provincia de Córdoba (Ateca, 1997) y de las registradas en la cuenca (período 1992-2001).....	28
Tabla II.2- Balance hidrológico (valores en mm) y clasificación climática seg. Thornthwaite para la microcuenca de 9.3 ha, período 1992-2000.....	31
Tabla II.3- Valores de Temperaturas medias mensuales y anuales y amplitud térmica anual, para distintas localidades de la Provincia de Córdoba y las registradas en una serie de 10 años (1992-2001) en la cuenca. (A): Aeropuerto; (O): Observatorio.....	31
Tabla II.4- Sensibilidad de los caudales pico a cambios en la geometría del cauce	41
Tabla II.5- Parámetros de las diferentes subcuencas utilizados en Arhymo. Lc: Longitud del cauce principal; Htot: Desnivel entre el punto más alto y el más bajo del cauce principal.....	41
Tabla II.6 Frecuencias de precipitación diaria.....	51
Tabla II.7- Tiempos de retorno de las precipitaciones registradas en la microcuenca .....	52
Tabla II.8- Intensidad en una hora y en el Tc; duración y relación entre duración y Tc. Siendo PP: precipitación; P1h: precipitación máx. en 1h; PTc: precipitación máx. en el Tc; D: duración de la lluvia.....	54
Tabla II.9- Sensibilidad del limnógrafo para n de Manning = 0.04. Donde H es tirante expresado en mm y Q es caudal expresado en l/s.....	59
Tabla II.10- Valores de a y b en la fórmula de Bazin.....	62
Tabla III.1 - Condición de humedad antecedente de los eventos de la microcuenca. Los eventos están ordenados según AMC crecientes. Se resaltan los de AMC II para mejor visualización. ....	81
Tabla III.2- Comparación de los escurrimientos observados (Lám Obs) y los determinados por el método del Número de Curva del SCS (Lám SCS). Se muestra también el NCaj, NC SCS y AMC de cada evento. ....	84
Tabla III.3- Determinación del NC y Lám con el índice API.....	90
Tabla III.4- Regresión lineal de Lám. La variable dependiente es Lám Obs; la columna Est. muestra los coeficientes de cada término (valor estimado); EE es el error estándar de la estimación; LI y LS son los límites del intervalo de confianza al 95% y p-valor el grado de significación. El R <sup>2</sup> es de 0.93.....	92
Tabla III.5- Determinación de Lám por el modelo de regresión. Los valores negativos fueron reemplazados con cero. En la última fila figuran los Coeficientes de Determinación para las columnas 4, 5 y 6. ....	94
Tabla III.6- Análisis de la regresión de Lám para los 7 eventos de condición AMC III. Se observa que el R <sup>2</sup> es de 0.99.....	95
Tabla III.7- Eventos ocurridos en condición AMC III y las láminas determinadas por regresión con IPP como única variable regresora.....	96
Tabla III.8- Estadística de la regresión lineal del NC.....	99
Tabla III.9- Número de Curva ajustado (Ncaj); NC de tablas (NC SCS), NC calculado con la ecuación de regresión (NCr) y por el método Jack Knife ((NCr (JK)). Los valores de PP y Lám Obs están en mm.....	101
Tabla III.10- Láminas de escurrimiento observada (Lám Obs) en col. 3, Lám determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión (Lám NCr en col. 4) y Lám determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife (Lám NCr (JK)) en col. 5. ....	103



Tabla III.11- Comparación de Láminas Observada y Lám SCS (col 2 y 6). Se muestra también la precipitación, condición de humedad antecedente y NC del método del SCS (col. 3, 4 y 5). .....	106
Tabla III.12- Comparación entre NC ajustado y NC SCS. ....	108
Tabla III.13- Análisis de una regresión lineal para la var. NCaj. Los valores de p en la penúltima columna indican que las variables PP e IPP consideradas conjuntamente no tienen significación en la predicción del NC. ....	110
Tabla III.14- Regresión múltiple con Ncaj como variable dependiente .....	111
Tabla III.15- Para eventos de lluvias similares (col. 2 y 3) registradas en ambos pluviógrafos, se muestran las láminas escurridas (col. 4 y 5), los coeficientes de escorrentía (col. 6 y 7) y la relación entre estos últimos (col. 8). ....	115
Tabla III.16- Valores de las variables consideradas, para cada uno de los eventos, Número de Curva ajustado y Número de Curva obtenido por la Ecuación III.11 ...	118
Tabla III.17- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la estimada con NCr. ....	120
Tabla III.18- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la estimada con NCr por el método Jack Knife. ....	121
Tabla III.19- PP y caudales máximos de cada evento: observados y del método NC SCS. ....	123
Tabla III.20- Caudales máximos de cada evento, observados, calculados con NCr y calculados con NCr (JK). ....	124
Tabla III.21 - Escurrimiento de diferentes precipitaciones diarias sustrayendo la lámina infiltrada. La última columna muestra los NC correspondientes.....	129
Tabla V.1- Ponderación de precipitaciones para el modelo Arhymo .....	152
Tabla V.2- NC ponderada para el evento del 12-12-97 .....	153
Tabla V.3- Planilla de cálculo de caudales y lám resultante para la cuenca grande .....	155
Tabla V.4- Clases hidrológicas de suelos y sus características .....	157
Tabla V.5- Condición de humedad antecedente según precipitaciones anteriores	158

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1- Ubicación de la zona de estudios dentro de los principales Ambientes Geomorfológicos de la región semiárida central de la Provincia de Córdoba .....	26
Figura II.2- Detalle de la ubicación de la cuenca en estudio. Imagen modificada sobre Mapsource Garmin. ....	27
Figura II.3- Curvas IDF para la localidad de Rafael García. Fuente: Caamaño Nelli y Dasso. ....	28
Figura II.4- Delimitación de la cuenca sobre un DEM .....	35
Figura II.5- Trabajos de conservación de caminos marcaron la diferencia entre la superficie de la figura anterior y la actual que aquí se muestra sombreada. ....	36
Figura II.6- Límites actuales de la cuenca experimental, sobre Carta IGM 3136-25-3 Alta Gracia. ....	36
Figura II.7- Límites de la cuenca y área sistematizada. El círculo muestra la ubicación de la microcuenca de 9 ha. ....	37
Figura II.8- Curvas de nivel con equidistancia de 0.2m de la microcuenca, sobre imagen Google. Se observa que, a diferencia de los lotes adyacentes, no presenta sistematización en terrazas. ....	38
Figura II.9- Sección de la vía de escurrimiento natural. Nótese que la escala vertical está muy exagerada. ....	40
Figura II.10- Subcuencas de la Cuenca Grande. La notación corresponde a la del programa Arhymo. ....	42
Figura II.11- Diagrama de flujo de la cuenca, con notación del modelo Arhymo .....	43
Figura II.12- Distribución de los suelos en la cuenca .....	44
Figura II.13- Perfil sobre el eje T T' del plano de la Figura II.12 visto desde el Sur .	45
Figura II.14- Evolución del uso del suelo entre 1962 y 1994. ....	46
Figura II.15- Pluviógrafo Oeste sin la cubierta protectora. ....	49
Figura II.16- Carta del IGM con la ubicación de los pluviómetros: 1: Pluviómetro Oeste; 2: Pluviómetro Este y aforador microcuenca; 3: Limnógrafo de Cuenca Grande. Las líneas muestran las áreas de influencia de cada pluviómetro: La del Oeste (punteada), antes del 28/10/99 y la del Este, después de esa fecha. ....	50
Figura II.17- Ejemplos de distribución por sextiles de tormentas de más de 70 mm por día .....	53
Figura II.18- Evento del 4 de Diciembre de 1996 en la microcuenca. ....	53
Figura II.19- Canal GE-3 de desagüe de la cuenca y ubicación de los limnógrafos (en círculos) de la microcuenca (al Oeste) y de Cuenca Grande (al Este). ....	55
Figura II.20- Vista con Google Earth de la zona de emplazamiento de los limnógrafos .....	56
Figura II.21- Perfil Transversal del canal GE-3 en la sección del limnógrafo, visto desde aguas arriba. ....	57
Figura II.22- Curva altura – caudal del canal GE-3 en la sección del limnógrafo. ....	57
Figura II.23- Limnógrafo de Cuenca Grande en el canal de desagüe de la cuenca. ....	59
Figura II.24- Gráfico de la derivada de la función $Q=f(H)$ .....	61
Figura II.25- Curvas de capacidad para diferentes n de Manning .....	64
Figura II.26- Estado de la cobertura del canal en la estación de aforo (Noviembre de 2000) .....	65
Figura II.27- Gráfico altura-caudal del aforador de la microcuenca .....	66
Figura II.28- Aforador de la microcuenca .....	67
Figura II.29- Limnógrafo y canal de desagüe de Cuenca Grande. ....	69
Figura III.1 Se observa que las lluvias ocurridas bajo Condición de Humedad Antecedente II son minoría .....	82

Figura III.2- Comparación entre el NCaj y el NC SCS mostrando la recta de ajuste ideal. La dispersión que se observa corresponde a un R <sup>2</sup> de 0.37. ....	83
Figura III.3- Comparación de Lám Obs y Lám SCS, ambas en mm. Se grafica la línea de ajuste ideal. ....	85
Figura III.4- Gráfico original de NC del SCS. ....	87
Figura III.5- Reproducción del gráfico de NC del SCS con los datos de precipitación y caudal con período de retorno de un año en la microcuenca. ....	87
Figura III.6- Predicción de la lámina de escurrimiento, mostrando la recta de ajuste ideal. ....	93
Figura III.7- Predicción de la lámina de escurrimiento por el método Jack Knife, mostrando la recta de ajuste ideal. ....	93
Figura III.8- Predicción de Lam por IPP para los 7 eventos de condición AMC III. R <sup>2</sup> = 0.99. ....	96
Figura III.9- Predicción de Lám por IPP para los 7 eventos de condición AMC III. Método de Jack Knife. Se muestra la línea de tendencia. ....	97
Figura III.10- La predicción del escurrimiento por el IPP no resultó satisfactoria para las condiciones AMC I y AMC II. ....	97
Figura III.11- Predicción de NC calculada por regresión (NCr) mostrando la línea de ajuste ideal. ....	100
Figura III.12- Determinación de la lámina de escurrimiento calculada con NCr, mostrando la recta de ajuste ideal. ....	104
Figura III.13- Correlación entre la lámina de escurrimiento observada (Lám Obs) y la lámina determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife (Lám NCr (JK)). ....	104
Figura III.14- Hidrogramas de fecha 6 Marzo de 2000. El R <sup>2</sup> del hidrograma observado con respecto al calculado, para este caso particular, fue de 0.99. ....	105
Figura III.15- Láminas observadas y determinadas por el método del NC SCS. ...	107
Figura III.16- Gráfico comparativo de NC SCS y NC ajustado. Se ha omitido representar el evento correspondiente a la fecha 12-12-97, por la distorsión que produce. ....	108
Figura III.17- Reproducción del gráfico de NC del SCS con los datos de precipitación y escurrimiento para lluvias mayores de 48 mm. ....	109
Figura III.18 – Para los eventos ocurridos en Cuenca Grande, a un aumento de la PP le corresponde una disminución del valor del NC. ....	112
Figura III.19 - Para los eventos ocurridos en Cuenca Grande, a un aumento de la PP le corresponde también un aumento en la Lám estimada con el NC de la regresión. ....	113
Figura III.20- Precipitaciones y escurrimientos, en mm, de la microcuenca (triángulos) y de la cuenca grande (cuadrados) con sus respectivas líneas de ajuste. Después de los 50 mm de precipitación el escurrimiento aumenta en forma marcada en la microcuenca, lo que no ocurre en la cuenca grande. ....	115
Figura III.21-Ejemplos de la relación entre PP (en abcisas) y NC (en ordenadas) según Hjelmelt et al. A la izquierda comportamiento normal; a la derecha comportamiento violento. ....	117
Figura III.22- Comportamiento de la relación PP-NC en cuenca grande. ....	117
Figura III.23- Correlación entre NCaj y NCr. Se muestra la recta de ajuste ideal, en trazo fino, y la línea de tendencia, en trazo grueso. ....	119
Figura III.24- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la determinada mediante el NC de la regresión. ....	120
Figura III.25- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la determinada mediante el NC de la regresión por el método Jack Knife. ....	122
Figura III.26- Comparación de los caudales máximos de cada evento: observados y del método NC SCS, mostrando la recta de ajuste ideal. El caudal del día 12-12-97	

se ha omitido, para evitar la distorsión gráfica que produce por el cambio de escala. Se observa que el método NC SCS ha tendido a sobreestimar los caudales para este conjunto de datos.....124

Figura III.27- Gráfico de dispersión de los caudales pico determinados con NCr y los observados.....125

Figura III.28- Gráfico de dispersión de los caudales pico determinados con NCr (JK) y los observados.....126

Figura III.29- Hietograma de diseño según Caamaño Nelly-Dasso para una duración de la precipitación de 180 min. ....128

Figura III.30- Lám resultante de aplicar una curva de infiltración a diferentes PP.....130

Figura III.31- Relación entre PP y NC. Observese que la ecuación de ajuste (corresponde a la línea llena) es similar a la ecuación de ajuste de la Figura III.22.. .....130

Figura V.1- Lotes de la cuenca .....159

## LISTA DE ABREVIATURAS

Almac.	Almacenamiento
AMC	Antecedent Moist Condition
Arg.	Argentina
AT	Argiustol típico
Av	Avena ;
CG	Cuenca Grande
COB	Cobertura
Coef	Coeficiente
Cov	Covarianza
Cte.	Constante
CV	Coeficiente de Variación
DE	Desvío Estándar
Def	Déficit
DEM	Digital Elevation Model
ECMP	Error Cuadrático Medio de la Predicción
EE	Error Estándar (en análisis de regresión)
EP	Evapotranspiración potencial
ER	Evapotranspiración real
Est	Valor estimado (en análisis de regresión)
Exc	Exceso
H ó h	altura ó desnivel
HE	Haplustol éntico
HT	Haplustol típico
Htot	Altura o desnivel total
la	Pérdidas iniciales
IGM	Instituto Geográfico Militar
Imáx	Intensidad máxima
IPP	Índice de Precipitación
L	longitud
Lám NCr (JK)	Lám calculada con el NC de la regresión por el método Jack Knife
Lám NCr	Lám calculada con el NC de la regresión
Lám SCS	Lámina de escurrimiento calculada con el NC de las tablas del SCS
Lám	Lámina de escurrimiento
LC	Labranza convencional
Lc	longitud del cauce
Li	Límite inferior (del intervalo de confianza en análisis de regresión)
Ls	Límite superior (del intervalo de confianza en análisis de regresión)
Mlz	maleza
Mz	maíz ;
NC SCS	Número de curva del método del SCS (tablas del SCS)
NC	Número de Curva
NCaj	Número de Curva ajustado según PP y Lám Obs
NCr	Número de Curva determinado por regresión
NEH-4	National Engineering Handbook, Section 4
P1h	Precipitación máxima registrada en una hora
PJack Lám	Predicción por el método Jack Knife de Lám Obs
pluviógr. E (W)	pluviógrafo Este (Oeste)
PP	precipitación
PRED Lám	Predicción de lámina de escurrimiento observada
p-valor	Valor de significación (en análisis de regresión)

Q	Caudal
Qp	Caudal pico o máximo
R	Radio Hidráulico
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinación
Rj	Rastrojo
S	Área de la Sección
Sa	Pendiente del área
Sc	Pendiente del cauce
SCS	Soil Conservation Service
SD	Siembra directa
Sg	sorgo
Sj	soja
Tc	Tiempo de concentración
TR	Tiempo de retorno
Tr	trigo
Trz	Terraza(s)
Var	Varianza
Vm	Velocidad media
Vmáx	Velocidad máxima
Vs	Velocidad superficial
Vsm	Velocidad superficial media

## RESUMEN

En una cuenca agrícola representativa de un área importante de la región central de Córdoba (Argentina), se midieron precipitaciones y escurrimientos durante 8 años.

Con el objeto de estimar el escurrimiento en función de las lluvias y características de la cuenca, se seleccionó el modelo de Número de Curva del Soil Conservation Service, por su extendido uso y porque sus parámetros son accesibles para cualquier técnico dedicado a la Conservación de Suelos y Aguas.

El método se probó en dos condiciones de uso del suelo: Una Microcuenca bajo Labranza Convencional y una Cuenca Grande, que incluye a la primera, mayoritariamente con Siembra Directa. Se comprobó la falta de adecuación del método en ambas situaciones para este conjunto de eventos.

Utilizando regresión lineal, se procuró estimar por un lado a la lámina escurrida en función de las lluvias y datos de la cuenca, y por otro se predijo el Número de Curva. Estas dos regresiones se efectuaron tanto en la Microcuenca como en la Cuenca Grande. Los resultados mostraron:

En la microcuenca tanto la lámina de escurrimiento como el Número de Curva fueron bien estimados, con Coeficientes de Determinación elevados.

En la Cuenca Grande la predicción del escurrimiento en función de los datos de precipitaciones y características de la cuenca tuvo resultado poco satisfactorio. En cambio en la regresión para Número de Curva se obtuvieron buenos resultados, con Coeficientes de Determinación elevados, resultando también elevada la concordancia entre el escurrimiento observado y el determinado con estos Números de Curva.

Sin pretender fijar algoritmos definitivos, este trabajo marca un método de cálculo de escurrimiento, que podrá mejorar los intervalos de confianza disminuyendo el rango de variación de los coeficientes del método en la medida en que se aumente la base de datos. No obstante esto, se concluye que para el tamaño, condiciones de la cuenca y tormentas de proyecto, los Números de Curva de las tablas originales del SCS sobreestiman el escurrimiento.

**Palabras clave:** Número de Curva, cuencas hídricas, lámina de escurrimiento, condición de humedad antecedente.

## **ABSTRACT**

In a representative watershed of an agricultural region in the central area of Córdoba (Argentina), rainfall and runoff were measured over a period of 8 years.

With the aim of predicting runoff based on rainfall and characteristics of the watershed, the Soil Conservation Service Curve Number model was selected because of its widespread use and availability of data inputs.

This method was tried out under two conditions of soil use: a microbasin with conventional tillage and a major watershed which includes the former, mostly with no tillage. In both cases, it was demonstrated that the method produced inadequate results.

Using linear regression, there was an attempt first to estimate the runoff according to rainfall and physical parameters, and second to predict the Curve Number with the same variables. These two regressions were tried in both the microbasin and the major watershed.

Results showed:

i) In the microbasin both the runoff and the Curve Number were well determined, with high efficiency coefficients;

ii) In the major watershed, prediction of runoff was poor. On the other hand, significant results were obtained in the regression for Curve Number, with high efficiency coefficients. Runoff calculated with these Curve Numbers also adjusted well to the observed data.

This paper does not claim to have arrived at permanent algorithms, but points to a promising method for the time when a big enough bank of data becomes available. However, its conclusion is that the Curve Numbers of the original SCS tables overestimate runoff for project storms and under conditions of no tillage.

Key Words: Curve Number, watersheds, runoff, Antecedent Moist Condition.



# **NÚMERO DE CURVA APLICADO A UNA CUENCA AGRÍCOLA DE LA REGIÓN CENTRAL DE CÓRDOBA, ARGENTINA**

TESIS DE MAESTRIA

Ing. Agr. RICARDO LUIS LUQUE

SECCIÓN PRIMERA

## **INTRODUCCIÓN**

### **MEDIOAMBIENTE Y SITUACIÓN PROVINCIAL**

El medioambiente es el entorno vital; el conjunto de los elementos físicos, biológicos, económicos, sociales, culturales y estéticos que interactúan entre sí, con el individuo y con la comunidad en que vive, determinando su forma, carácter, comportamiento y supervivencia. Podría entenderse como el sistema constituido por los elementos y procesos identificados por los factores que la Unión Europea estima que deben considerarse en las evaluaciones de Impacto Ambiental (Gómez Orea, 1996):

- \* El hombre, la fauna y la flora.
- \* El suelo, el agua, el aire, el clima y el paisaje.
- \* Las interacciones entre los anteriores.
- \* Los bienes materiales y el patrimonio cultural.

Hay una estrecha relación entre medioambiente y desarrollo. En la sociedad moderna se interpreta que el concepto de desarrollo debe entenderse como aumento en la calidad de vida. Si este concepto de calidad de vida se entiende como la conjunción de: a) nivel de ingresos, b) condiciones de vida y de trabajo y c) calidad ambiental, se desprende que toda acción de desarrollo implica cuanto menos no degradar el ambiente; y que toda acción instrumentada para mejora del medioambiente es también desarrollo.

La época actual se caracteriza por la acentuada degradación que el hombre provoca sobre el Medio Ambiente. Este proceso ha tenido y tiene una intensidad alarmante sobre todo en el presente siglo acompañando al desarrollo industrial y el crecimiento poblacional.

En cuanto a los suelos, el deterioro por la actividad antrópica es un problema a escala mundial. Este proceso se desarrolla en varias etapas: pérdida de las propiedades físicas y químicas del suelo, reducción de la fertilidad, disminución de la infiltración y de la retención de agua, erosión y desertificación (Ibáñez et al., 1993).

## SITUACIÓN PROVINCIAL

En la región agrícola de nuestra provincia, de los factores constitutivos del medio ambiente, todos se han visto alterados en mayor o menor grado: La fauna autóctona ha perdido diversidad; parecido análisis puede hacerse de la flora autóctona y en consecuencia del paisaje, ya que la deforestación a gran escala de las últimas décadas ha reducido en forma significativa la superficie ocupada por monte (Zamora y Jarsún, 1985) (SAGyP y CFA, 1994) (Stamati et al., 2004).

De las múltiples actividades por las cuales se ha degradado la región agrícola, una parte importante consiste en la remoción de la cobertura vegetal del suelo y alteración de su estructura (tala indiscriminada, sobre pastoreo, quema irracional, labranza convencional, etc.), y como consecuencia su arrastre por el agua y el viento y su deposición en otro lado.

Bricchi et al. (1996), determinaron que el deterioro de la condición superficial de los suelos, reflejado en la formación de costras y sellos superficiales, es consecuencia de las tecnologías con impacto ambiental negativo que más influyen en todo el sistema de producción.

Estos procesos traen aparejada la alteración del ciclo hidrológico, con agua que en lugar de ser retenida en la cuenca por procesos de infiltración, contribuye al escurrimiento superficial con resultado de múltiples daños, tanto por falta de agua en los terrenos superiores como por exceso en los inferiores (Bertoni, citado por Sereno et al., 1997).

Entre los elementos que influyen negativamente en la actividad agropecuaria de nuestra provincia, fuera de las limitaciones de carácter macroeconómico, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP y CFA, 1994) cita como principales:

- graves procesos de erosión, tanto hídrica como eólica, como de degradación física de los suelos, acentuada por los frecuentes incendios de campos;
- el abandono de la ganadería en favor de la agricultura (cultivo continuo e incluso el doble cultivo continuo), que favorece los procesos erosivos;
- los anegamientos periódicos, principalmente en el Este y Sur de la provincia;
- el retroceso de bosques nativos. La tala ha cambiado el paisaje de gran parte del territorio provincial y continúa cambiándolo, ya sea para incorporar tierras a la agricultura como para la producción de leña y carbón;
- los sistemas ineficientes de riego, con un área bajo riego que no se ha extendido en los últimos 10 años.

En el Mapa de Erosión de la Provincia de Córdoba, realizado por los Dres. Zamora, E. y Jarsún, B., en el marco de un convenio entre el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables de la Provincia (MAGYRR) y el INTA, en 1985 había 1.660.000 ha con problemas de erosión hídrica, especialmente en el sudeste y centro. En el año 2003, esa superficie era de 1.940.000 ha, es decir que hubo entre las dos fechas un incremento de 280.000 ha, lo que corresponde a un aumento del 17 %.

La Tabla I.1 muestra una discriminación entre las superficies afectadas por erosión hídrica y eólica en el año 2003.

También en la década del 80 se dio el gran incremento de la superficie sembrada con soja, lo que agravó aún más el problema.

Tabla I.1- Erosión en la Provincia de Córdoba, año 2003, en miles de ha

Clases	Erosión Hídrica		Erosión Eólica	
	Superficie	%	Superficie	%
Sin/mínima	12349	74	13339	80
Ligera	985	6	442	3
Moderada	538	3	431	3
Grave	415	2	77	-

Fuente: Agencia Córdoba D.A.C.Y T. S.E.M. Dirección de Ambiente – INTA Manfredi

La degradación de los suelos por el agua no sólo disminuye el rendimiento de las cosechas (Apezteguía et al., 1987), si no que también provoca un sinnúmero de daños en caminos, alcantarillas, puentes, vías férreas, etc (Cisneros et al., 2004). Estos daños que ocurren en el medio rural con cada lluvia tienen un costo económico y social elevado, y frecuentemente se producen sin que ocurran eventos de crecidas importantes (Dolfo et al.; 2005). El incremento de la escorrentía y el arrastre de suelos provoca pérdida de nutrientes y deterioro de la capa arable (Marelli, 1989).

La erosión lineal del cauce de los arroyos del sur de la Provincia de Córdoba, es uno de los principales problemas ambientales, tanto por sus consecuencias hidrológicas como por los daños causados a la producción agropecuaria, a la infraestructura urbana y vial-hidráulica y las colmataciones producidas en los embalses, que reducen su capacidad y vida útil (Cholaky et al., 2005b).

En los últimos años ha habido inundaciones en la Ciudad de Córdoba, Gral. Cabrera, Gral. Deheza, Las Perdices, Hernando, Tancacha, Almafuerce, Río Tercero, Berrotarán, Elena, Lozada, Oncativo, Laguna Larga, El Fortín, Alicia, La Cautiva, etc. lo que demuestra que la erosión hídrica ya no es sólo un problema de áreas agrícolas con pendientes pronunciadas; es un problema de la zona de sierra, el piedemonte y la llanura.

Se hace evidente que los daños producidos en terrenos superiores, es decir en las zonas elevadas de una cuenca, producen daños no sólo localmente sino también aguas abajo, en zonas más bajas y a veces muy distantes. Pero los daños de erosión

ocurridos en las zonas inferiores de una cuenca, también repercuten, dañan y tienen incidencia aguas arriba, en los terrenos superiores. Un ejemplo muy directo es el crecimiento de las cárcavas, que originadas en terrenos inferiores, crecen en sentido contrario al escurrimiento, ramificándose al recibir nuevos aportes y aumentando su profundidad en la búsqueda de una nueva situación de equilibrio. Y aún otros perjuicios de efecto no tan directo como el deterioro de la red vial ya citado o la emergencia económica en que cae la población de campos inundados, termina incidiendo negativamente en la parte alta de una cuenca.

Esta problemática se enmarca dentro de una realidad nacional de deficiente conocimiento del grado y distribución de la degradación física, química o biológica de los suelos (Cisneros et al., 1997), sumado a una escasa percepción de la gravedad del problema por parte de nuestros productores y de la sociedad en su conjunto (Mendoza Reinoso y Porcel de Peralta, 1997).

Se realza entonces la necesidad de considerar a la cuenca como unidad de planificación y al agua como elemento vinculante (Palacios, 1990).

## **MODELOS HIDROLÓGICOS**

### **Necesidad de estimación de los escurrimientos y del uso de modelos**

La estimación del escurrimiento directo, pico de descarga o hidrogramas es a menudo necesario en cuencas no aforadas de tamaño pequeño a mediano (Silveira et al., 2000).

Se torna así necesario encarar estudios que permitan estimar el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos bajo escenarios reales e hipotéticos de uso y manejo del suelo. Una de las herramientas más importantes para el estudio de los problemas hidrológicos es la modelación matemática de los fenómenos asociados. La misma no solo ayuda a cuantificar la importancia relativa de los diversos procesos modelados sino que permite de manera simple, rápida y económica la simulación de los diversos escenarios derivados de diferentes hipótesis, por ejemplo de expansión urbana y rural (Bertoni, 1994).

Los modelos matemáticos de simulación constituyen una herramienta útil y económica para tal fin. Un modelo es una representación cualitativa o cuantitativa de un proceso o situación que muestra los efectos de aquellos factores que resultan significativos a los propósitos que se están considerando (Chesnut, 1965 citado por Viglizzo, 1998).

Estos modelos no solo constituyen herramientas útiles para diseño de proyectos sino que además algunos de ellos brindan una "nueva y mejor tecnología de predicción para la conservación de suelo y agua como así también para la evaluación y planificación ambiental" (Foster y Lane, 1987; Izaurre et al., 2006).

Su aplicación es de principal importancia en la planificación y evaluación de estrategias para el control de fuentes distribuidas de contaminantes de agua en áreas intensamente cultivadas. Para esas situaciones, la respuesta hidrológica de la cuenca a una tormenta es el mecanismo de control para el transporte de contaminantes a la red de drenaje (Beasley y Huggins, 1991).

Por otra parte son cada vez más acentuadas las exigencias encaminadas a que la agricultura tenga en cuenta un código de buenas prácticas, compatibles con la conservación del medio ambiente (Valcárgel et al, 1999). Dado que la escorrentía es una fuente importante de contaminación difusa, en los últimos años se ha asistido a un incremento notable de estudios encaminados a determinar cómo reducir el riesgo de la misma. En los países industrializados estos estudios están motivados no tanto por la importancia de las pérdidas de suelo, sino sobre todo por la protección de los recursos hídricos, la polución por nitratos, etc. En definitiva se ponen de relieve los daños que los fenómenos erosivos causan fuera de la cuenca agrícola (Govers, 1991; Ludwig, 1992; Vansteelant et al., 1997; Martín et al, 1998; citados por Valcárgel et al, 1999).

Se desprende de ello que al ser el agua el vector de estos efectos contaminantes, un mejor ajuste en los modelos hidrológicos permitiría la mejor valoración de esos efectos no deseados (Michelena, 1986).

La escasa información regional sobre el avance real del problema de la erosión hídrica hace necesario medir y estimar los parámetros, como así también, probar el comportamiento de modelos matemáticos de estimación de caudales y de producción de sedimentos en la región (Serenio et al., 1997).

Dada la amplia variabilidad de características de lluvias, suelo, cultivos, manejo, etc., la utilización de modelos puede ser una herramienta muy útil que complemente la experimentación mediante costosas instalaciones para medida del caudal y carga sólida (Paz González, 1999).

Sin embargo, actualmente existe consenso entre los especialistas en que no existe un conjunto único de parámetros capaz de representar los modelos hidrológicos (Alonso, F. J. y Bertoni, J. C., 2005) debido entre otros factores a:

- Las incertezas inherentes de los datos.
- Las simplificaciones en los modelos.
- La representatividad de los parámetros.

Con frecuencia, distintos objetivos requieren la construcción o el uso de diferentes modelos para simular el mismo proceso. La utilización de modelos hace posible la gestión del territorio sobre la base de criterios medioambientales a escala de pequeña cuenca agrícola. Valcárcel et al. (1999, citado en Paz González et al 1999).

Nuestra capacidad de análisis avanza más rápido que nuestra capacidad para coleccionar datos con los cuales probar nuestras hipótesis y ajustar nuestro conocimiento de los recursos naturales (Goodrich y Simanton, 1995)

Sin embargo, el aporte real que la modelación matemática puede brindar en las tareas de análisis y extrapolación de comportamientos depende inexorablemente de la disponibilidad de datos (Esmoriz et al., 2002a)

### **Selección de un modelo hidrológico**

La necesidad de cuantificar los procesos hidrológicos e hidrosedimentológicos ha dado lugar a la creación de numerosos métodos, desde los más simples como el de Bordás Sánchez (Almorox, 1994), cuyo resultado depende de unos pocos parámetros, hasta los de desarrollo más detallado, solo factibles merced al avance de la tecnología computacional, que permite el manejo de grandes cantidades de información y algoritmos de cálculo complejos; tal es el caso de los modelos de base física.

### **Clasificación de modelos**

Según Ibáñez et al (1995) citado por Paz González y Taboada Castro (1998).

#### ***Según la base del modelo:***

- Empíricos (modelos de función respuesta; ecuaciones de regresión lineal).
- De base física. Ecuaciones complejas derivadas de leyes físicas.

En los modelos empíricos las funciones utilizadas no tienen en cuenta los procesos físicos internos del sistema. Estos modelos establecen una relación matemática con base estadística entre las variables de entrada y las de salida. Los modelos conceptuales en cambio, procuran representar los mecanismos internos del sistema, aunque para ello utilicen funciones empíricas.

Con los modelos físicos aparecen una serie de parámetros (rugosidad, conductividad, resistencia al corte, etc.) que aunque conocidos, requieren datos muchas veces no disponibles, dado que ofrecen una base de datos experimentales muy escasa. De allí surge la necesidad perentoria de aportar un conocimiento suficientemente amplio de estos parámetros para las condiciones en que se produce la erosión del suelo, sobre todo si se pretende que estos modelos sean de uso común para los gestores, como ocurre con la USLE, ampliamente superada conceptualmente, pero todavía abrumadoramente aplicada en los estudios de rutina (Paz González y Taboada Castro, 1998).

#### ***Con relación a su aleatoriedad:***

- Determinísticos: Una misma entrada se traduce siempre en la misma salida.
- Estocásticos: Resultados al menos parcialmente aleatorios. Incluyen variables aleatorias que generan resultados con un cierto rango de probabilidad.

#### ***Según la distribución de variables en el espacio:***

- Concentrados: las variables son promediadas o los cálculos se efectúan para un único punto.
- Distribuidos: Se conoce la distribución espacial y temporal de las variables de entrada, y las variables de salida se calculan en función del espacio y del tiempo.

Los modelos de parámetros distribuidos incorporan la influencia de variables espaciales, parámetros de control (p.ej. topografía, suelos, uso del suelo, etc.) de alguna manera incluidos en sus algoritmos. En contraste el tratamiento de los modelos agregados o globales usa alguna forma de promedios para generar coeficientes efectivos para caracterizar la influencia de cada parámetro de distribución no uniforme. La influencia de esta distribución es así representada por coeficientes globales y el modelo resultante se trata como una transformación matemática de datos de entrada en datos de salida (Beasley y Huggins, 1991). Un modelo es concentrado cuando sus parámetros y variables varían solamente en función del tiempo. Cuando la variación ocurre además en función del espacio, el modelo es distribuido.

***Según su duración en el tiempo:***

- Continuos: Períodos largos.
- De eventos: Es necesario conocer con precisión las condiciones iniciales y el análisis de la distribución de variables en el espacio.

Un modelo se dice continuo cuando simula en forma ininterrumpida una serie hidrológica, a pesar de que los intervalos de tiempo pueden ser discretos; en contraposición los modelos de evento, simulan solamente un evento discreto, particular.

***Según el uso a que esté destinado:***

- De simulación
- De proyecto
- De gestión

El modelo de simulación tiene un enfoque determinístico; procura reproducir un fenómeno o prever el comportamiento de un sistema. El modelo de proyecto tiene un enfoque probabilístico, por ejemplo en la determinación de caudales de proyecto con una cierta probabilidad de excedencia. El modelo de gestión (de optimización o de planificación) es un modelo de proyecto que incluye un criterio de selección.

En el ámbito local, considerando que no hay suficientes registros de escurrimiento y erosión en cuencas agrícolas y que los métodos de cálculo y modelos matemáticos necesitan un análisis que permita su ajuste para que predigan adecuadamente o para que puedan ser usados en simulación, se postula que contar con métodos y modelos ajustados otorgaría credibilidad a: 1) Proyectos de obras de sistematización agrícola como canales vegetados, microembalses, defensa de cabeceras de cárcavas, etc., así como obras de arte en redes viales y ferroviarias. 2) Estudios de impacto ambiental.

Muchos modelos hidrológicos han sido desarrollados y usados; sin embargo, la mayoría de los modelos están limitados por sus intensivos requerimientos de datos de entrada. Típicamente se requiere una cantidad de tiempo significativa por parte del

usuario para preparar los datos para el modelo. La calibración y validación requiere aún mayores esfuerzos para su aplicación segura. En consecuencia, hay una necesidad de modelos hidrológicos de fácil uso y razonable precisión (Lim et al, 2006).

Considerando lo antedicho, para la representación del escurrimiento en el área de estudio, el criterio de selección del modelo a usar, fue el de un modelo de amplia difusión y cuyos parámetros se determinen en función de datos fácilmente accesibles para cualquier técnico dedicado a la conservación de suelos y aguas.

El modelo seleccionado fue el Número de Curva (NC) del United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service (SCS) (USDA-SCS, 1972), ahora National Resources Conservation Service (NRCS). La selección del mismo se justificó en: (i) el empleo generalizado del método empírico-conceptual del NC en la región, (ii) la falta de un proceso cuantitativo que valide las relaciones de este método (deducidas originalmente para los EEUU) a las características de la región.

En la práctica, los ingenieros usan frecuentemente el procedimiento del NC SCS, para calcular el escurrimiento directo en cuencas pequeñas y medianas no aforadas, probablemente debido a su aparente simplicidad (Silveira et al., 2000). La aplicación práctica de este procedimiento debería ser simple y directa. Se basa en la determinación de los Números de Curva (NC), que están ampliamente documentados en la literatura para variados usos y tipos de suelos (National Engineering Handbook, Section 4, (NEH-4), 1981; Chow et al., 1994).

El cálculo del volumen de escurrimiento de una tormenta usando Números de Curva es una técnica internacional (Hawkins, 1978). Sin embargo, a pesar de su aparente simplicidad, la aplicación del procedimiento del NC conduce a una diversidad de interpretaciones y confusión debido a la ignorancia acerca de sus limitaciones, porque la documentación existente de cómo fue desarrollado está severamente limitada (Hawkins, 1979; Hjelmfelt, 1991; Pilgrim and Cordery, 1993 en Silveira, 2000).

Las dificultades en su aplicación están principalmente relacionadas con la clasificación de los suelos fuera de los EEUU en las 4 clases hidrológicas, y en la condición de humedad antecedente. (Silveira, 2000).

La aplicación del método del NC SCS se hará a través del modelo Arhymo (Maza et al., 2000) debido a que es uno de los modelos más difundidos entre los que utilizan el NC. Se menciona como el más usado en la llanura pampeana junto con otras variantes y adaptaciones del modelo de onda cinemática (Riccardi et al., 2002).

Además este modelo reúne la posibilidad de tránsito tanto por cauces como por embalses o lagunas utilizando la ecuación de continuidad (conservación de volúmenes), circunstancia esta que se presenta en una de las microcuencas en estudio. Por otra parte, el uso de este modelo facilitará en la cuenca grande (870 ha), además del tránsito de caudales, el procesamiento simultáneo de las diferentes subcuencas y la suma de hidrogramas.



### **Método del Número de Curva del Soil Conservation Service**

El método del Número de Curva del Soil Conservation Service (USDA, 1972) (National Engineering Handbook, 1981) es un modelo empírico, determinístico, concentrado y de eventos, que está orientado principalmente a su utilización en el área de proyectos. No obstante es empleado por diversos modelos hidrológicos orientados tanto a tareas de simulación como de diseño hidrológico. Ejemplo de ello lo constituyen los modelos HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineers, 2006), Arhymo (Maza et al, 2000), AGNPS (Young et al, 1994), CREAMS (Knisel, 1980), GLEAMS (Leonard et al, 1986), EPIC (Sharpley and Williams, 1990), PRZM (Carsel et al, 1984) y otros. Es un método adecuado para estimar la lámina de escurrimiento en cuencas reducidas de hasta aproximadamente 800 ha.

### **OBJETIVOS**

Ajustar un método de cálculo para la estimación de los escurrimientos.

Ajustar el modelo hidrológico del Número de Curva del SCS a las condiciones de la región agrícola central de Córdoba.

## SECCIÓN SEGUNDA

# MATERIALES Y MÉTODOS

## LA REGIÓN

### Descripción. Aspectos climáticos, fisiográficos y antrópicos regionales

Geomorfológicamente el área de estudio pertenece a la Pampa Loésica Alta, ubicada entre la Depresión Periférica por el Oeste y la Pampa Loésica Plana por el Este (Moscateli et al., 1990) (Figura II.1). La pendiente regional es hacia el este, con gradientes relativamente uniforme que oscilan entre el 0,5 y el 2%. Los suelos pertenecen al orden de los Molisoles, principalmente Haplustoles típicos y énticos.

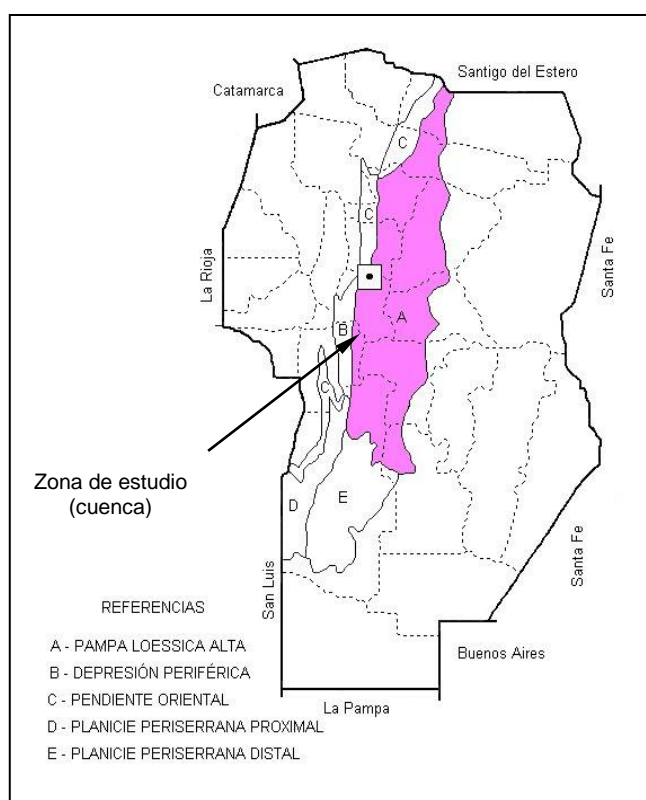


Figura II.1- Ubicación de la zona de estudios dentro de los principales Ambientes Geomorfológicos de la región semiárida central de la Provincia de Córdoba

La Figura II.2 muestra el detalle de la ubicación de la cuenca en estudio.

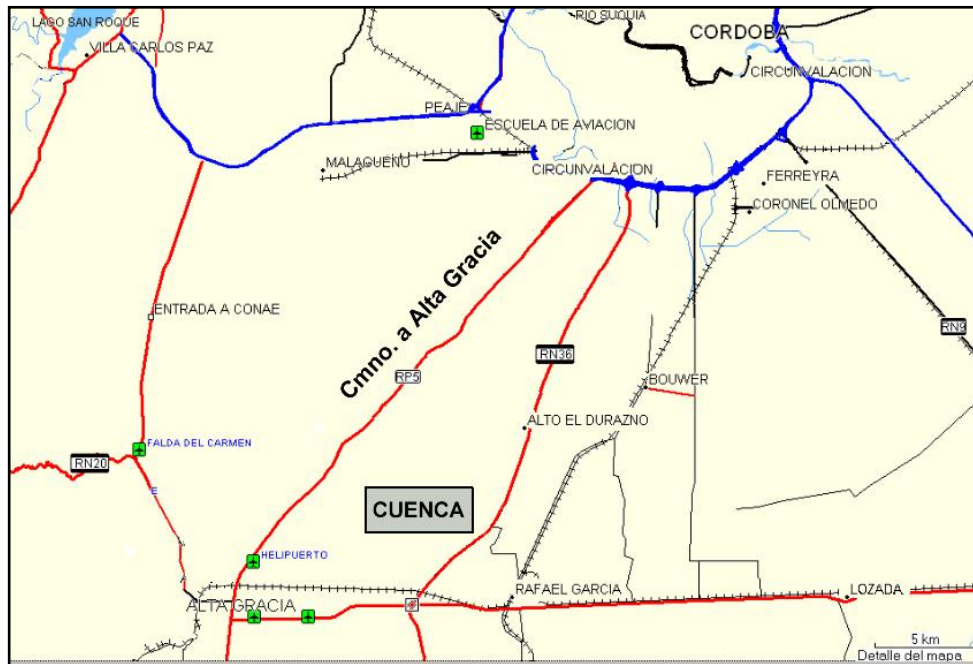


Figura II.2 - Detalle de la ubicación de la cuenca en estudio. Imagen modificada sobre Mapsource Garmin.

### Condiciones agrometeorológicas

El clima de la región corresponde al tipo seco subhúmedo, mesotermal, con distribución monzónica de lluvias; la precipitación media anual es de 750 mm, con una gran concentración en el semestre octubre - marzo (82,3%). Observando las series de las estaciones de medición tomadas como referencia, en todos los casos se observa que los meses más lluviosos son diciembre y enero, siendo los más secos junio, julio y agosto.

El promedio mensual de precipitaciones en áreas subhúmedas a semiáridas como la que nos ocupa, debe considerarse como simple valor orientativo. Esto se debe a la gran variabilidad de los registros de lluvia mensuales a lo largo de las series.

Según datos del Observatorio Meteorológico Nacional, ubicado a una distancia de 20 Km. de la cuenca en estudio, la temperatura media anual es de 17.7° C, siendo la temperatura media del mes más frío (junio): 11,5° C y la del mes más cálido (diciembre): 23.9° C (serie 1961/1970).

## Precipitaciones

El régimen pluviométrico de la región es monzónico, o sea que las precipitaciones están concentradas entre los meses de Octubre a Marzo. La Tabla II.1 muestra los valores de precipitaciones medias mensuales y anuales de algunas localidades cercanas a la zona de estudio y las registradas en una serie de 10 años (1992-2001) en la cuenca en estudio.

Tabla II.1- Precipitaciones medias mensuales y anuales (mm) de distintas localidades de la Provincia de Córdoba (Ateca, 1997) y de las registradas en la cuenca (período 1992-2001).

Localidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Lozada	101	75	79	47	24	10	13	11	33	68	91	107	641
Corralito	114	119	76	69	12	11	6	8	50	52	96	132	745
Monte Ralo	106	122	84	60	14	17	8	7	53	50	102	137	718
Río III	119	89	84	50	26	15	17	11	48	62	102	132	739
Cuenca	137	103	100	49	18	10	5	16	43	67	148	190	886

Dada la importancia que tiene la intensidad de la precipitación y su relación con el tamaño de la cuenca y el período de tiempo considerado, los estudios sobre estas relaciones tienen especial significación. En la Figura II.3 se presenta un gráfico con las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la zona, generadas por transposición en base a los datos de la Ciudad de Córdoba para duraciones (D) entre 5 y 1440 minutos (un día) y frecuencias (F) de 2 a 200 años (Caamaño Nelli y Dasso, 2005).

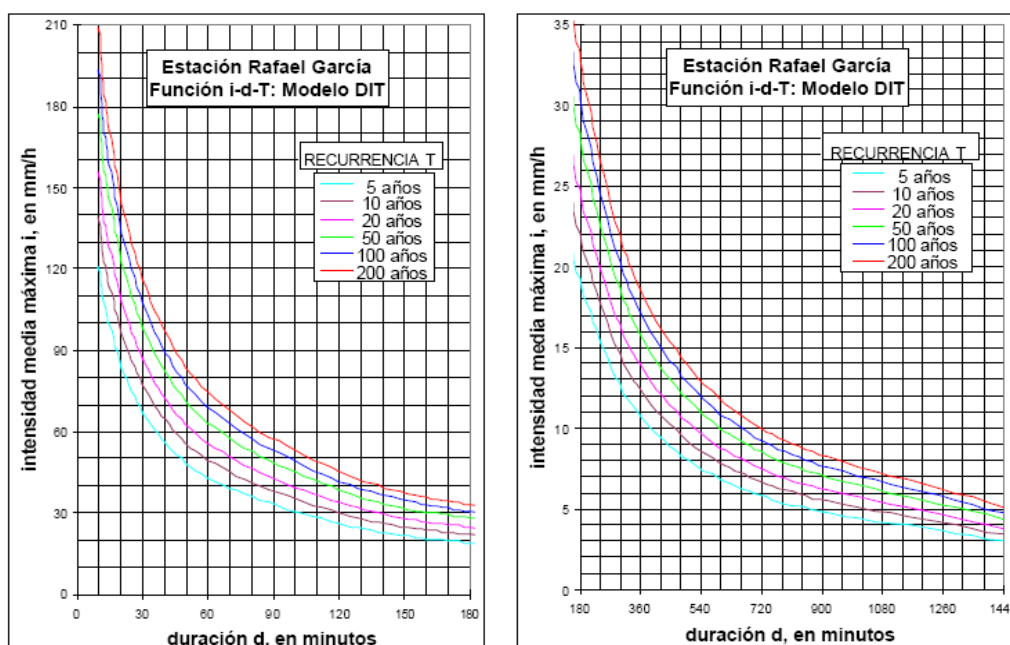


Figura II.3 - Curvas IDF para la localidad de Rafael García. Fuente: Caamaño Nelli y Dasso.



## Balance hidrológico

La información pluviométrica sola no es suficiente para conocer el régimen hídrico de un determinado lugar, es decir, para conocer si las cantidades de agua que aportan las lluvias satisfacen las demandas de determinados cultivos en un ambiente dado. Para ello, es necesario conocer la evapotranspiración, es decir, la suma del agua perdida por el suelo a través de la evaporación y de la transpiración de las plantas. La evapotranspiración depende de la demanda atmosférica regida por la radiación, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad del aire y la presión atmosférica, además del contenido hídrico del suelo y de las condiciones del cultivo.

El balance hídrico entre los valores de precipitación y evapotranspiración, es a menudo el factor principal de la producción agrícola, sobre todo en regiones semiáridas. La mayoría de los índices agroclimáticos se basan en la relación precipitación-evapotranspiración.

El balance hidrológico climático es utilizado para clasificar climáticamente las regiones, porque permite estimar deficiencias y excesos de agua del suelo y la época de ocurrencia de los mismos, a partir de valores climáticos. Es el modelo de balance utilizado en todas las cartas de suelo del país.

En la serie 1961-1970 el déficit hídrico está presente a lo largo de todo el año. El agua total presenta valores alejados de la capacidad máxima planteada. El índice hídrico es de -4,9 lo que define climáticamente a la región como **subhúmedo seco**. Por el contrario, la serie 71- 80, debido al aumento de las precipitaciones a partir de esta década, presenta variaciones en el balance, ocurriendo recarga del perfil de noviembre a abril, llegando el suelo a su máxima capacidad de almacenaje durante los meses de febrero a abril. En este caso, el índice hídrico es de 5,9 definiéndose climáticamente como **subhúmedo húmedo**. Para la serie 1992 – 2000, y con datos de la cuenca de 9.3 ha, el índice hídrico es de 4.0, con lo que el clima se define como **subhúmedo húmedo** (Ateca, 2004). La Tabla II.2 presenta el balance hidrológico para la cuenca de 9.3 ha

Tabla II.2- Balance hidrológico (valores en mm) y clasificación climática seg. Thornthwaite para la microcuenca de 9.3 ha, período 1992-2000.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
EP	132	92	90	55	42	28	19	39	52	80	98	134	859
PP	137	103	100	49	18	10	5	16	43	67	148	190	886
PP-EP	5	11	10	-6	-24	-18	-15	-22	-9	-12	50	56	
Σ(PP-EP)				-6	-30	-40	-54	-77	-86	-99			
Almac.	300	300	300	294	271	263	251	232	225	216	266	300	
Δ Almac.	0	0	0	-6	-23	-8	-12	-19	-7	-9	50	34	
ER	132	92	90	55	41	18	17	35	50	76	98	134	838
EXC	5	11	10	0	0	0	0	0	0	0	0	22	48
DEF	0	0	0	0	1	10	2	4	2	4	0	0	23
Índice hídrico = 4.0													
C2 Subhúmedo húmedo													

### Temperaturas

Por ser un elemento que influye notablemente en el crecimiento y desarrollo vegetal, sus variaciones diarias y estacionales deben ser consideradas en una caracterización agroclimática (Ateca, 1997).

En cuanto a las amplitudes térmicas, estas no son muy marcadas; son consideradas moderadas por De Fina (1992), al compararlas con las que se registran en el hemisferio Norte. Esta amplitud implica que existe una suavidad en las estaciones del año; es decir una evolución lenta y poco definida del verano en invierno y del invierno en verano (De Fina, 1992).

Como se observa en la Tabla II.3 (Ateca, 1997), la temperatura media mensual del mes mas frío, la temperatura media mensual del mes más cálido y la temperatura media anual no difieren significativamente entre la ciudad de Córdoba y la zona bajo estudio.

Tabla II.3- Valores de Temperaturas medias mensuales y anuales y amplitud térmica anual, para distintas localidades de la Provincia de Córdoba y las registradas en una serie de 10 años (1992-2001) en la cuenca. (A): Aeropuerto; (O): Observatorio.

Localidad	Temperaturas medias en °C			Amplitud anual
	Diciembre	Julio	Anual	
Córdoba (A)	23.6	10.5	17.5	13.1
Córdoba (O)	24.2	11.4	17.9	12.8
Pilar	23.2	10.4	17.1	12.8
Cuenca	23.5	9.5	17.5	14

## Suelos de la región y evolución de su uso

Los suelos dominantes están representados por Haplustoles énticos, típicos y Argiustoles. Se encuentran principalmente en forma de complejos, con un patrón de distribución muy intrincado, pero no difieren en mayor medida en cuanto a su capacidad de uso (Agencia Córdoba Ambiente– INTA, 2006).

Los Haplustoles (H: énticos y típicos) que son los suelos dominantes en la región, son suelos profundos, fértiles y bien drenados. La buena estructura favorecida por alto contenido de materia orgánica, complejo de intercambio dominado por el calcio y la vegetación del Espinal original, se ve comprometida por el alto contenido de limo, que le confiere cierta fragilidad e inestabilidad estructural. Esto provoca una tendencia al encostramiento y al “planchado”, lo que favorece los escurrimientos y procesos de erosión hídrica (Agencia Córdoba D.A.C.y T., 2003).

Los altos contenidos de limo y el moderado a bajo contenido de materia orgánica en el horizonte superficial, producen una débil agregación y por lo tanto alta susceptibilidad a la degradación física y química y a la erosión (Núñez Vázquez et al., 1996).

Cabe destacar, por el crecimiento de su utilización en nuestra zona y los evidentes beneficios en el control de los procesos de erosión hídrica, el uso extendido del sistema de la siembra directa (Marelli, 1997). Si bien este sistema, ajustado a las condiciones locales y con un manejo agronómico correcto, posee una serie de ventajas -incrementa la infiltración por disminución del sellado superficial debido a la reducción del impacto de las gotas de lluvias por el rastrojo, demora el escurrimiento y frena la capacidad de arrastre, incrementa el drenaje interno por el desarrollo de biocanales, mayor conservación del agua almacenada por retardar pérdidas por evaporación, producciones iguales o superiores a las logradas por sistemas convencionales, mayor seguridad y estabilidad de la producción-, Marelli (1997) sostiene que en áreas afectadas por erosión severa a grave, donde el uso del suelo se basa en la rotación agrícola, la siembra directa debe ser el complemento de las prácticas conservacionistas ingenieriles.

Si bien el incremento de las labranzas conservacionistas, especialmente de la siembra directa, ha incidido positivamente en la conservación del suelo, el 28% del área presenta una tasa de erosión potencial que oscila alrededor de 60 tn/ha/año. La región en estudio pertenece a la Provincia de Córdoba. De las 16.532.100 ha totales de la provincia, 13.724.885 ha (Censo Nacional Agropecuario '88) corresponden a algún tipo de actividad agropecuaria desarrollada bajo condiciones edafoclimáticas muy variables.

El efecto Niño ha provocado en los últimos años mayores precipitaciones especialmente en primavera-verano acelerando la susceptibilidad a la erosión hídrica. Los progresos tecnológicos alcanzados en el desarrollo de agroquímicos, equipos mecánicos y cultivos transgénicos, han incrementado la producción agrícola, principalmente en el cultivo de soja, no solamente en áreas aptas sino también en zonas marginales.

Esto produjo una aceleración en los procesos de degradación física-química y de erosión de los suelos. En la provincia de Córdoba existen sectores donde se presenta con verdadero dramatismo la erosión provocada por el escurrimiento del



agua (Río Tercero, Río Cuarto), además en las zonas con menor pendiente pero con una historia de uso agrícola más antigua el problema de la erosión laminar y en surcos adquiere también proporciones importantes.

También tenemos que tener en cuenta las áreas que aumentan su susceptibilidad al proceso erosivo debido al cambio del uso del suelo hacia una agricultura intensiva de la mano del cultivo de soja. Dentro de esta categoría "mínima erosión hídrica" tenemos un total del 74% de la superficie agrícola de la provincia. Con erosión ligera, tenemos el 6%, con erosión moderada el 3% y con erosión grave el 2% (Marelli, 2004).

Destacan Cholaky en al. (2005 a) que el modelo productivo actual basado en el aumento del uso agrícola sobre el ganadero y en la predominancia del cultivo de soja sobre el de maíz y cuyos soportes tecnológicos son, entre otros, los cultivos transgénicos y la siembra directa, no ha logrado revertir la tendencia a la compactación superficial y subsuperficial en los suelos agrícolas de la región centro-sur de Córdoba.

## **Vegetación**

De acuerdo a la clasificación fitogeográfica de la Provincia de Córdoba (Luti et al, 1977), la unidad de vegetación en la cual se incluye la cuenca en estudio corresponde al Espinal, en la cual las especies arbóreas prístinas predominantes son: algarrobo blanco, algarrobo negro (*Prosopis* sp.), quebracho blanco (*Schinopsis* sp.), tala (*Celtis tala*), chañar (*Geoffrea decorticans*) y espinillo (*Acacia* sp.), entre otros. Entre las especies herbáceas predominan *Chloris*, *Paspalum*, *Setaria*, *Trichloris*, *Stipa*, *Poa*, etc.

En la actualidad, esta cubierta natural tan importante se encuentra fuertemente alterada o en la mayoría de los casos eliminada por completo. La tala indiscriminada para uso de leña, construcciones edilicias y principalmente prácticas agropecuarias son algunos de los factores que incidieron en la degradación mencionada. Prueba de ello son los relictos de la antigua formación natural que se encuentran dentro de la cuenca en estudio. Esto permite inferir la fisonomía y la alta densidad de cobertura vegetal que presentaba la unidad de vegetación en el estado anterior a su alteración o eliminación (Aoki, 2002).

## **LA CUENCA EN ESTUDIO**

### **Etapas o pasos requeridos**

Los siguientes pasos fueron establecidos para cumplimentar los objetivos propuestos:

Delimitación de una cuenca experimental.  
Red hídrica y vial. Estudios topográficos para precisar el límite de la cuenca.  
Estudio de suelos, evolución del uso de los suelos.  
Instalación de aparatos registradores de lluvia y de escurrimiento superficial.  
Selección de un modelo hidrológico.  
Análisis matemático-conceptual de los componentes del modelo seleccionado.  
Aplicación y ajuste del modelo a los datos disponibles.  
Evaluación estadística del comportamiento del modelo.

### **Delimitación de una cuenca experimental**

El área de estudio es una cuenca de 870 ha ubicada en el Departamento Santa María, Provincia de Córdoba, República Argentina, entre los 31º 33' - 31º 37' latitud sur y 64º 14' - 64º 19' longitud oeste, al este de las sierras de Córdoba. Se ubica en la Pampa Loésica Alta o Plataforma Basculada, representada en la unidad cartográfica A (ver Figura II.1) del Mapa de Erosión de la Provincia de Córdoba (Zamora y Jarsún, 1985).

Esta representatividad fue determinante para la elección de la cuenca para estudios hidrosedimentológicos, pudiendo citarse además otras circunstancias ventajosas entre las que pueden mencionarse la existencia de estudios previos por la constitución del Consorcio de Conservación de Suelos Monte Grande (Luque et al., 1987) y la sistematización en canales y terrazas de desagüe (Weir et al., 1983; Luque, 1997), que proveían la infraestructura para la instalación de instrumentos de medición.

Las tareas y estudios que aquí se mencionan son llevadas adelante por el Grupo de Gestión Ambiental de Suelo y Agua de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, siendo material para diversas tesis tanto de maestría como de doctorado, así como generadores de líneas y trabajos de investigación.

### **Red hídrica y vial.**

Ya dentro del marco de los presentes estudios, la consideración del emplazamiento de los aforadores puso de relieve la alteración de algunos límites en forma permanente o transitoria, por forestación, deforestación, labranzas, obras viales, tareas de mantenimiento de caminos, etc. que cambiaron el curso de las aguas superficiales. Es por ello que se definió una cuenca cuyos límites tuvieran poca probabilidad de ser alterados y se trasladó el punto elegido para la estación de aforo aguas arriba hasta el punto de emplazamiento actual. La cuenca de este nuevo punto de desagüe coincide con una subcuenca de todos los estudios efectuados (Figura II.4).

En la Figura II.4 puede apreciarse la red hídrica y la delimitación efectuada por Ruiz Posse (1996) mediante un programa de delimitación automática de cuencas aplicado sobre un modelo digital de elevación (DEM) confeccionado sobre fotografías aéreas a escala 1:20000.

Una posterior modificación de los límites se debió a alteraciones del escurrimiento causadas por los trabajos de conservación de un camino de tierra que divide a la cuenca bordeando por el norte a la estancia Los Talas. Estos trabajos provocaron un desvío, con lo cual la superficie de la cuenca disminuyó a 870 ha. La Figura II.5 y la Figura II.6 muestran estos límites.

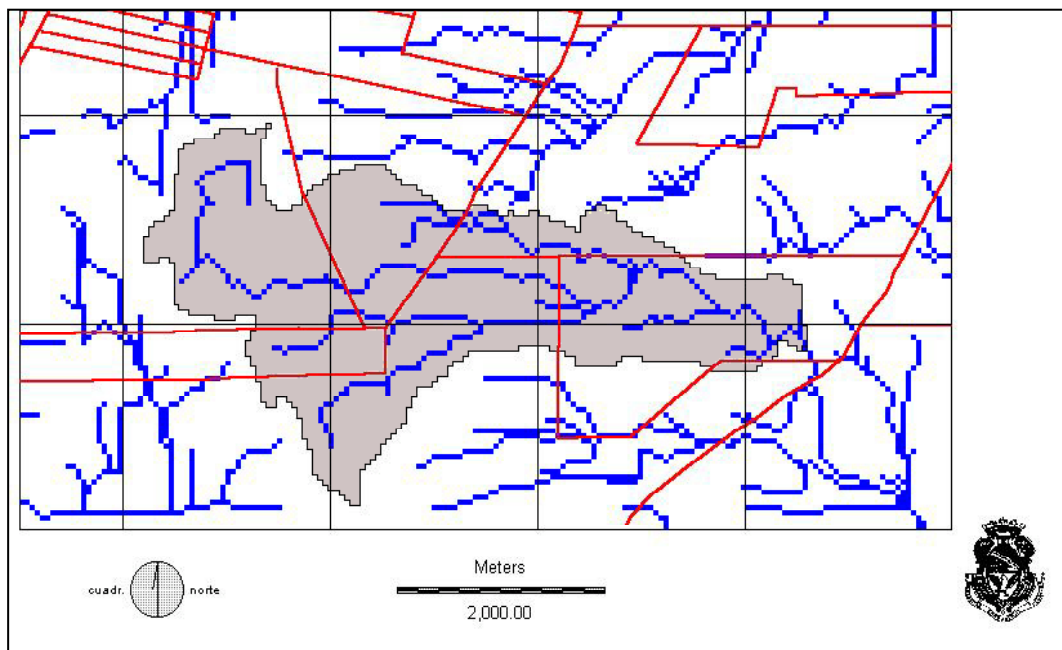


Figura II.4- Delimitación de la cuenca sobre un DEM

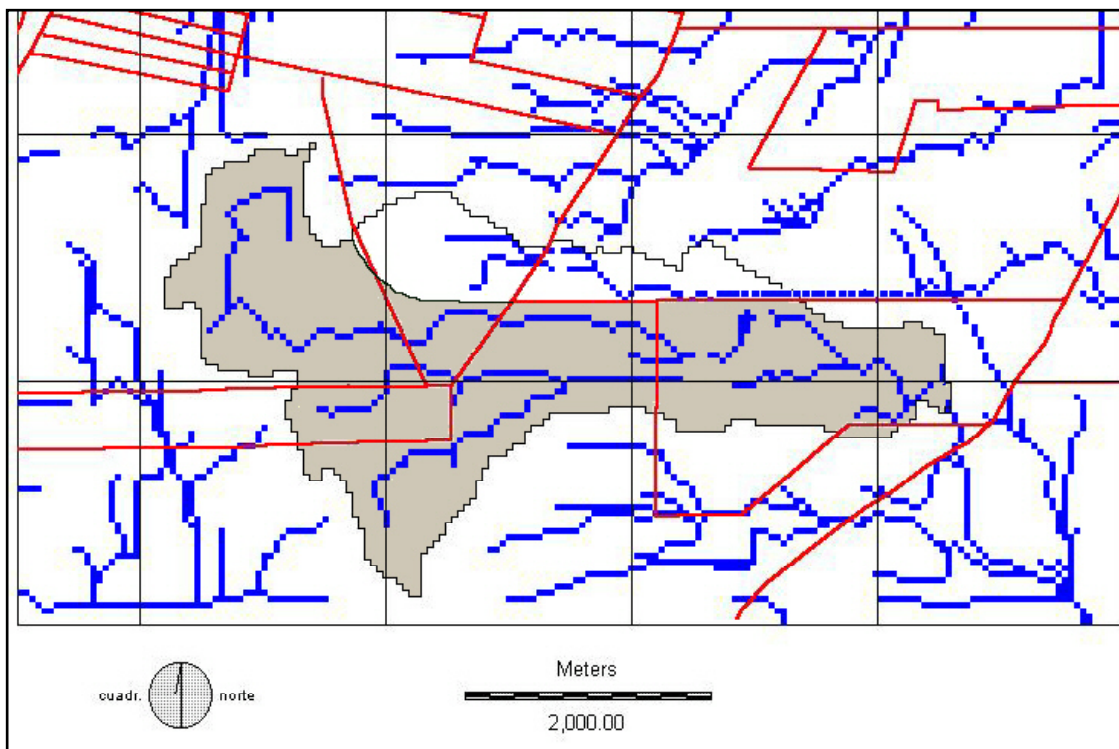


Figura II.5 - Trabajos de conservación de caminos marcaron la diferencia entre la superficie de la figura anterior y la actual que aquí se muestra sombreada.

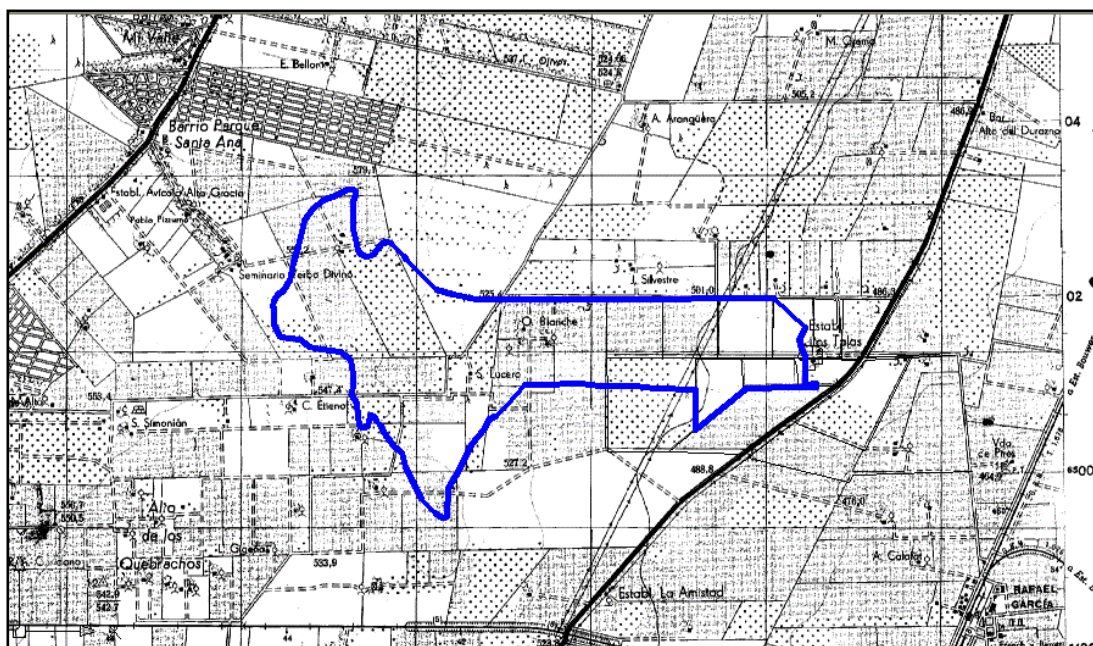


Figura II.6- Límites actuales de la cuenca experimental, sobre Carta IGM 3136-25-3 Alta Gracia.

## Trabajos de sistematización

En la zona inferior de la cuenca se efectuaron trabajos de sistematización en terrazas de desagüe paralelas con canales vegetados. De un total de 340 ha sistematizadas, el tercio inferior de la cuenca comprende 203 ha, lo que constituye el 23 % de su superficie (Figura II.7).

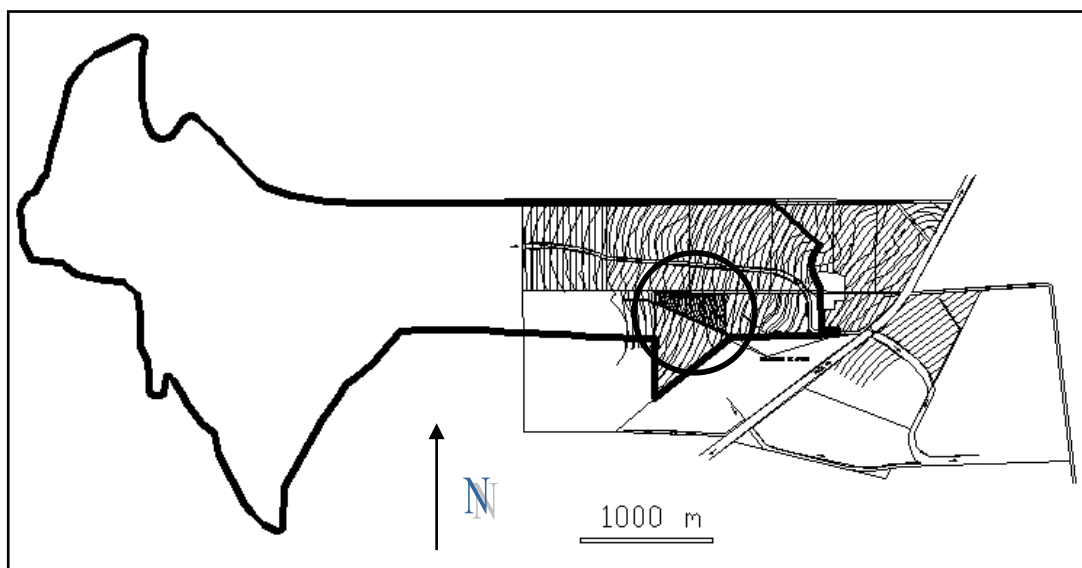


Figura II.7- Límites de la cuenca y área sistematizada. El círculo muestra la ubicación de la microcuenca de 9 ha.

### Subcuenca de 9.3 ha

Esta microcuenca posee una superficie de 9,3 ha y forma parte de la cuenca grande, de 870 ha. La pendiente oscila entre 0,95 y 1,40 % y baja desde el Oeste hacia el Este (Figura II.8). El suelo es haplustol típico de textura franco limosa.

La labranza convencional, que prevaleció en toda la región hasta 1997 y aún se aplica en numerosas explotaciones, se mantiene en esta microcuenca para los fines del estudio. Se trabaja con monocultivo de soja, sembrada perpendicular a la pendiente general del terreno (Romero et al., 1995). Esto ha redundado en una degradación del suelo, reflejada en algunos parámetros físicos y químicos (Luque et al., 2006; Vettorello et al., 2006).

La microcuenca presenta una pequeña depresión final de almacenamiento (microembalse) contra un bordo existente en el límite Este, el que será considerado a fin de compatibilizar la representación con las características reales de la microcuenca. Para su definición se emplearon curvas de nivel con equidistancia 0,1 m y la ley de descarga teórica del aforador, aunque en la Figura II.8 las curvas presentan una equidistancia de 0.2 m.

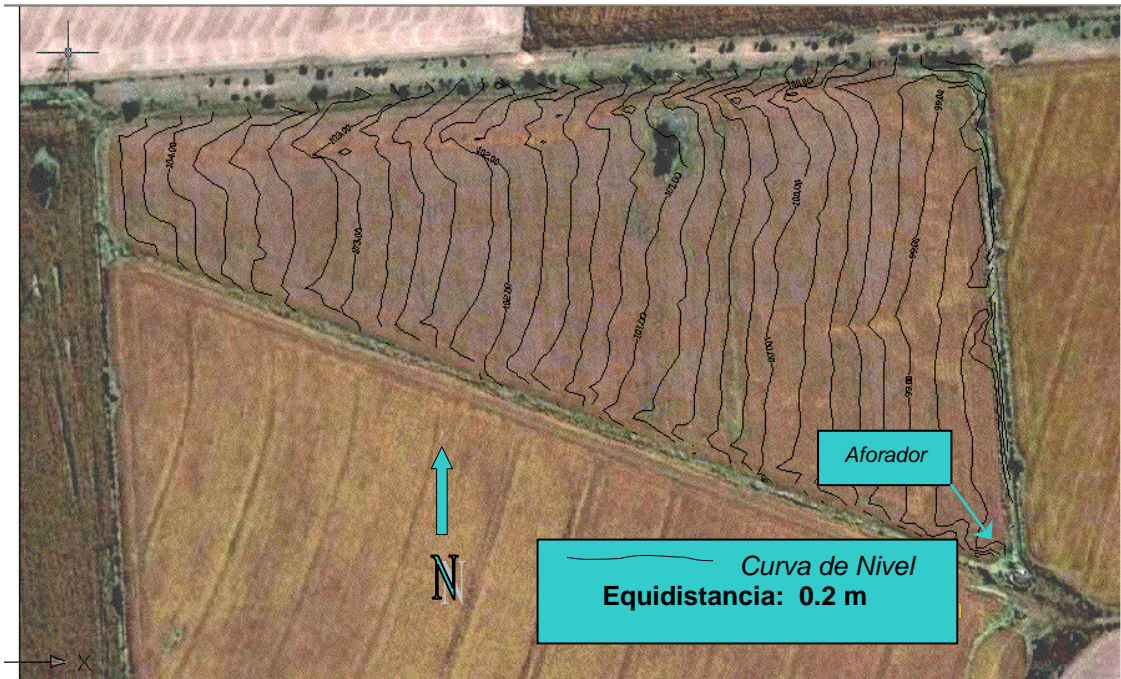


Figura II.8- Curvas de nivel con equidistancia de 0.2m de la microcuenca, sobre imagen Google. Se observa que, a diferencia de los lotes adyacentes, no presenta sistematización en terrazas.

## **CUENCA GRANDE**

Siguiendo el lineamiento expresado arriba y a los efectos de evaluar el grado de ajuste del Número de Curva determinado por el método NC SCS se procuró en primer lugar representar la cuenca con el mayor detalle posible acorde a los estudios efectuados hasta el presente. Para ello se representó a la cuenca de 870 ha dividida en subcuencas, con sus diferentes vías de escurrimiento, efectuándose un registro del uso de los diferentes lotes, a lo largo del tiempo.

Esto constituye también un primer paso hacia la futura distribución de las condiciones de la cuenca y constitución de un SIG.

De este modo las tareas efectuadas fueron:

Fisiografía de la cuenca.

Parámetros característicos requeridos por Arhymo.

Procesamiento de eventos lluvia - caudal.

Evaluación del ajuste del NC.

Método alternativo de cálculo del NC para la zona de estudio.

### **Fisiografía de la cuenca**

#### **Subcuencas y red hídrica**

Para la modelación de la cuenca grande se estableció su configuración según el grado de detalle de los estudios disponibles. Con las fotointerpretaciones efectuadas, el plano de curvas de nivel y red de drenaje (Ruiz Posse, 1996) más los reconocimientos sobre el terreno, levantamientos topográficos y vuelos de reconocimiento se subdividió la cuenca en subcuencas para una mejor representación.

El plano de la cuenca con las subcuencas se muestra en la Figura II.10, y un esquema de esa subdivisión se presenta en la Figura II.11, adaptado a la nomenclatura del programa Arhymo. Las subcuencas 1, 2, 3, etc serán referidas como 301, 302, 303, etc respectivamente, para mantener la nomenclatura del modelo Arhymo.

Las vías de escurrimiento que constituyen la red hídrica de la cuenca, son de dos tipos: naturales y artificiales. Las vías naturales son desde las nacientes hasta el ingreso al área sistematizada. A partir de este punto, es decir en el tercio inferior (Este) de la cuenca, los canales han sido diseñados y ejecutados dentro de un plan de ordenamiento que incluye terrazas paralelas de desagüe, rotaciones y labranza conservacionista.

En la aplicación del modelo Arhymo que se verá más adelante, el tránsito de caudales por un cauce requiere, además de la pendiente longitudinal, de los datos del perfil transversal de ese cauce. En el caso de los canales artificiales, esto está medido. Pero no es este el caso de las vías naturales. En la cuenca, estas vías del agua se han ido formando por erosión, y difieren en tamaño según causas diversas tales como el área de aporte, etc. Las observaciones en el terreno mostraron una forma en V progresivamente más abierta desde la vaguada hacia el nivel del terreno circundante. Ha contribuido a esto la práctica común durante la época de

labranza convencional, de borrar los surcos de erosión cada año. El agua, a medida que aumenta su caudal, desborda estas vías y ocupa tanto terreno como sea necesario, aumentando el ancho de la avenida.

La única vía de escurrimiento natural considerada es la que colecta el agua de las subcuencas 2 y 3 y transcurre por la subcuenca 4 (en la notación de Arhymo, subcuencas 302, 303 y 304 respectivamente).

El perfil que se adoptó para esta vía de escurrimiento natural, es un perfil tipo aproximado (Figura II.9), según lo observado en el campo. Una solución semejante es utilizada por González, J. G. (1999) trabajando en la cuenca alta del Río Cuarto.

Este perfil se considera adecuado debido a que se probó la sensibilidad del programa Arhymo ante cambios en la sección de las vías de escurrimiento, con resultados satisfactorios, según se describe a continuación:

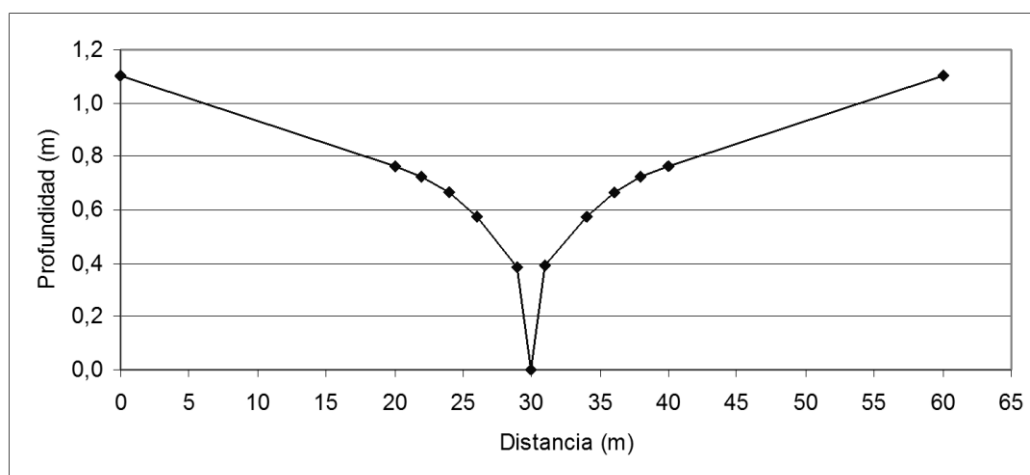


Figura II.9- Sección de la vía de escurrimiento natural. Nótese que la escala vertical está muy exagerada.

Se efectuaron corridas de Arhymo de diversos eventos lluvia caudal considerando el tránsito – para cada evento - de dos formas alternativas:

1. Por un canal artificial tipo, de sección suficiente (canal de bordos).
2. Transitando por las vías que corresponden, es decir las reales existentes en el terreno. Esto es: una vía de escurrimiento natural y diversos canales de bordos, según correspondiera.

Los resultados mostraron:

No hubo ningún cambio en la lámina escurrida. Esto era de esperar, ya que ésta no depende de la geometría del cauce.

Hubo una diferencia en los caudales máximos del orden del 10% según puede apreciarse en la Tabla II.4.



Tabla II.4- Sensibilidad de los caudales pico a cambios en la geometría del cauce

Evento	PP total	con un canal	con dif vías	Dif Qp
Fecha	(mm)	Qp (m <sup>3</sup> /s)	Qp (m <sup>3</sup> /s)	%
06-01-97	71	4.218	4.454	5
26-01-97	53	0.181	0.201	10
18-12-99	37	0.062	0.058	-7
06-03-00	63	2.114	2.451	14

Siendo que estas diferencias corresponden a corridas de simulación con vías de escurrimiento de dimensiones ex profeso inexactas, se espera entonces que los errores que pudieran cometerse por considerar un perfil aproximado para la vía de escurrimiento natural y los canales artificiales existentes para el resto, resultarán en errores sensiblemente menores al 10%.

### Parámetros característicos

El programa Arhymo requiere para la ejecución de una cuenca cualquiera, de los siguientes parámetros: Área, Longitud del cauce principal (Lc) y Desnivel entre el punto más alto y el más bajo del cauce principal (Htot). Estos parámetros son precisados en la Tabla II.5 para cada una de las diferentes subcuencas de la Cuenca Grande.

Tabla II.5- Parámetros de las diferentes subcuencas utilizados en Arhymo. Lc: Longitud del cauce principal; Htot: Desnivel entre el punto más alto y el más bajo del cauce principal

Subcuenca	Área	Lc	Htot
	(Km <sup>2</sup> )	(Km)	(m)
301	3.22	5.70	50.0
302	1.11	2.59	33.0
303	1.53	2.62	35.0
304	0.81	2.21	22.5
305	1.48	2.10	23.0
306	0.32	0.68	9.0
307	0.09	0.59	5.8
309	0.18	0.61	6.3

## Diagrama de la cuenca

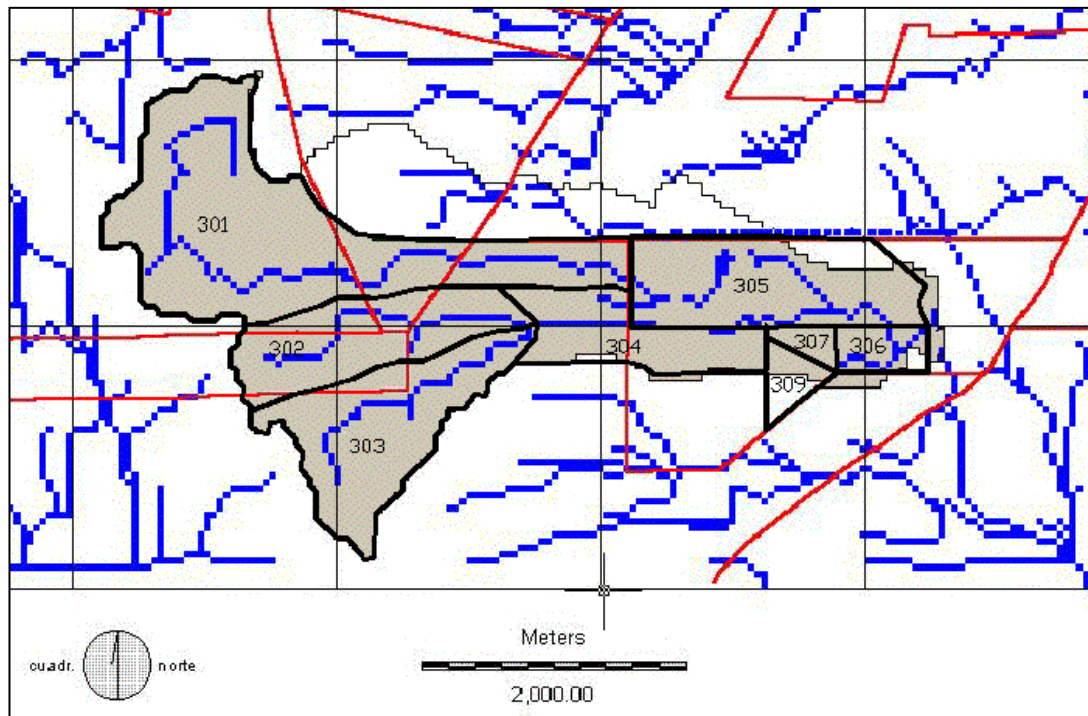


Figura II.10- Subcuencas de la Cuenca Grande. La notación corresponde a la del programa Arhymo.

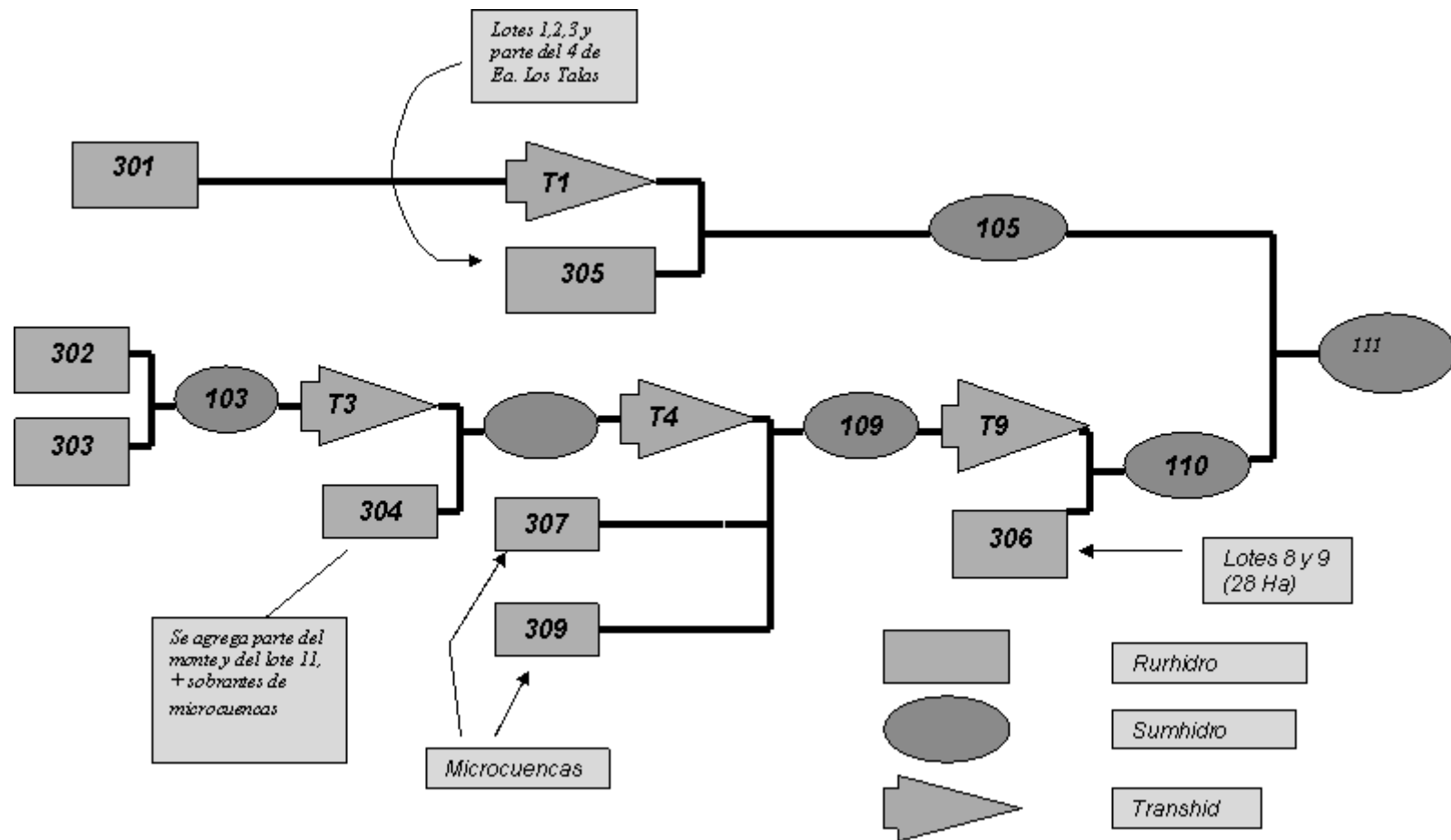


Figura II.11- Diagrama de flujo de la cuenca, con notación del modelo Arhymo

## Suelos de la cuenca

Dentro de la unidad geomorfológica de la Pampa Loésica Alta, la cuenca es representativa, en cuanto a sus características de suelo y relieve, de la unidad cartográfica A 4 (Figura II.1) del Mapa de Erosión de la Provincia de Córdoba (Zamora y Jarsún, 1985).

En la Figura II.12 se muestra un plano de la cuenca objeto de este estudio. Se aprecia la distribución de los suelos a nivel de subgrupos. Estos estudios fueron realizados por el Dr. Eduardo Zamora, integrante del Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Córdoba (Luque et al., 1987).

Los trabajos de campo consistieron en chequeos en la parte alta de la cuenca para completar la información en este sentido. Además del mapa se presenta un perfil idealizado de Oeste a Este, correspondiente a la transecta T-T' del plano de la Figura II.12, mostrando la ubicación de los suelos en relación con el paisaje, atravesando las unidades A, B, C, D y E (Figura II.13). Detalle de los suelos de cada unidad cartográfica pueden consultarse en el ANEXO 1

## **Evolución del uso del suelo en la cuenca**

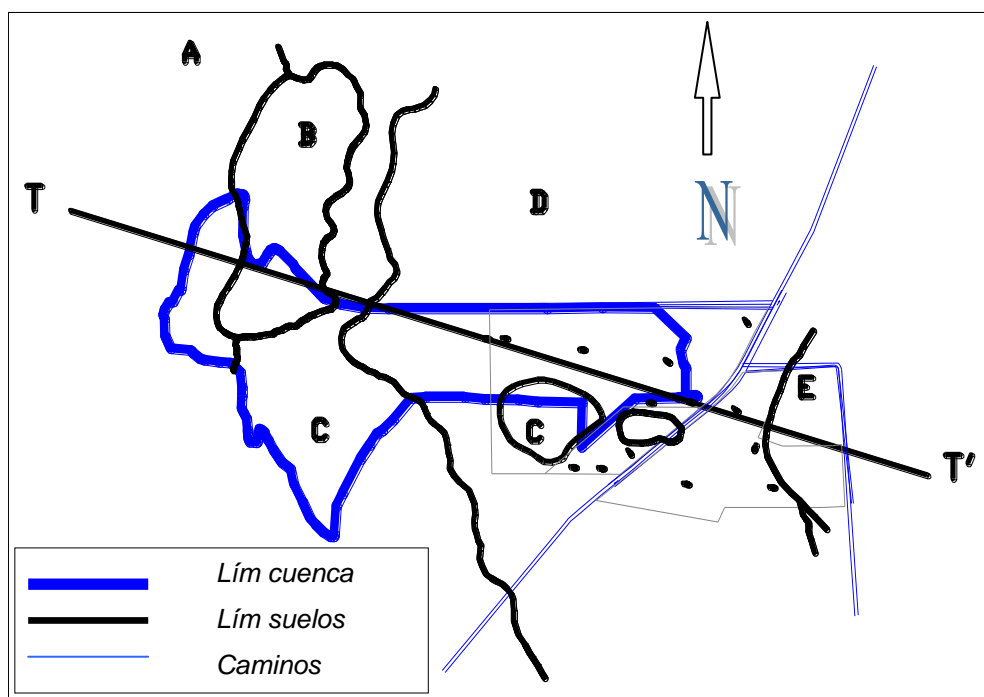


Figura II.12- Distribución de los suelos en la cuenca

En la actualidad la actividad agropecuaria principal la constituye la agricultura con especies de ciclo primavero-estival de grano grueso, predominando el cultivo de soja, todo esto en detrimento de la vegetación natural.

Según la Carta IGM Alta Gracia 3163-25-5, en el año 1971 la superficie de la cuenca ocupada por monte era de 210 ha.

A fin de determinar la evolución temporal de la superficie destinada a cosecha, se utilizaron técnicas de teledetección con fotogramas aéreos de tres fechas: 1962, 1970 y 1987 e imágenes orbitales del satélite Landsat TM5 (1994) (Ruiz Posse et al., 1997).

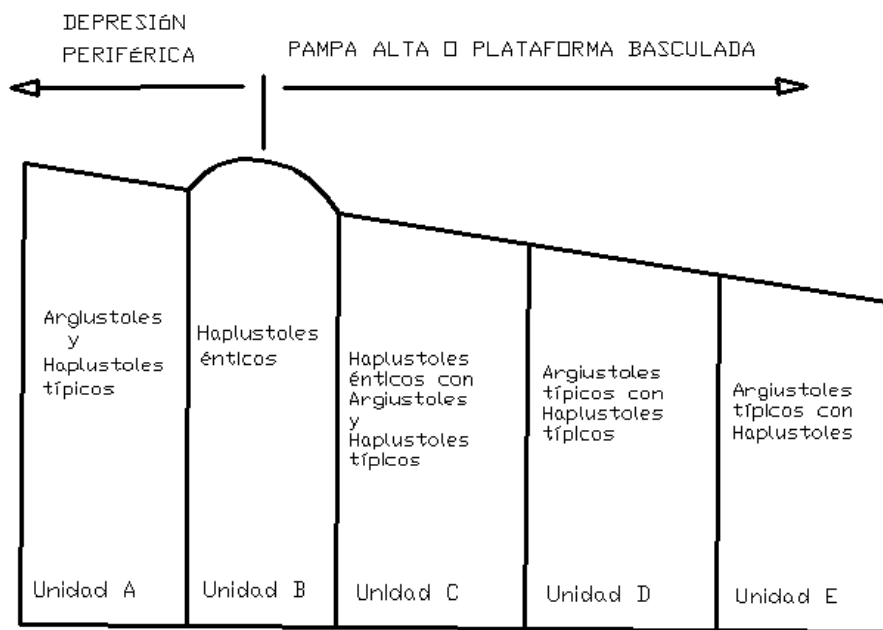


Figura II.13- Perfil sobre el eje T T' del plano de la Figura II.12 visto desde el Sur.

Mediante fotointerpretación de las fotografías aéreas se delimitaron las áreas que permanecían cubiertas todo el año, integrándose los montes y pasturas en una clase llamada cobertura permanente y a las áreas destinadas a cultivos se las denominó agricultura. Se clasificó la imagen Landsat TM5 de enero de 1994 (bandas espectrales 3, 4 y 5), utilizando técnicas de análisis digital (Richards, 1986) y muestreos de campo, en cinco clases de uso del suelo, las que fueron reagrupadas en las dos clases temáticas, cobertura permanente y agricultura, antes descriptas.

Es muy notorio el avance de la agricultura en los 32 años, en la Figura II.14 se observa que el área ocupada con protección permanente del suelo era del 48 % en 1962, 32 % en 1970, 27 % en 1987 y 13 % en 1994, con un consecuente aumento del área dedicada a laboreos anuales del 52 % en 1962, 68 % en 1970, 73 % en 1987 y 87 % en 1994 (Ruiz Posse et al., 1997).

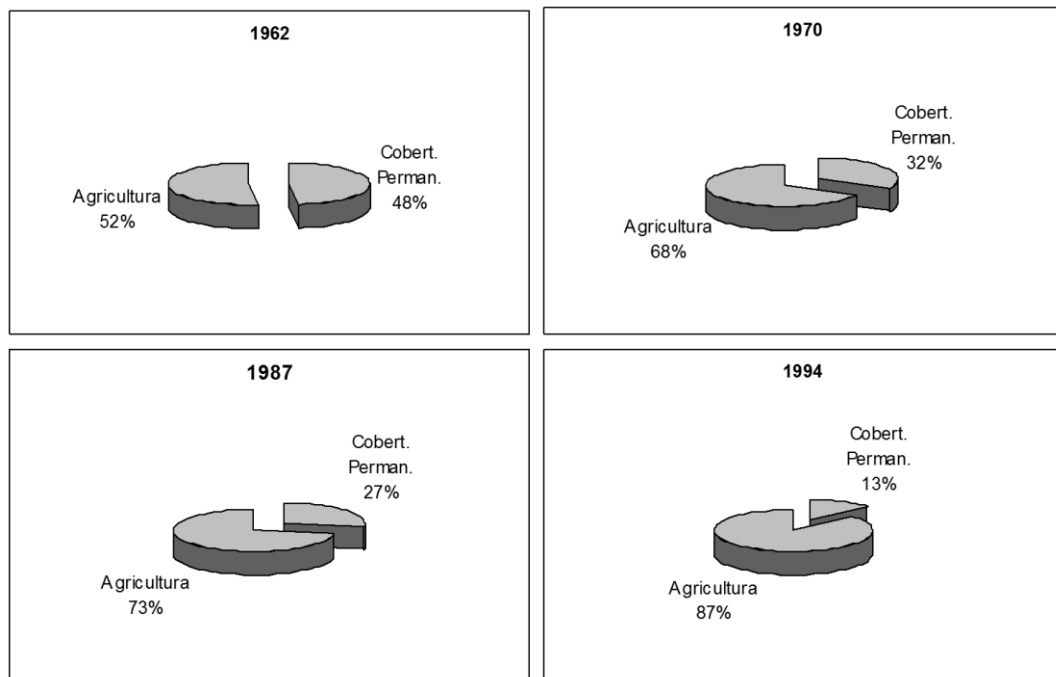


Figura II.14- Evolución del uso del suelo entre 1962 y 1994.

Parte de ese 10% de monte natural que aún queda en la cuenca, se mantiene intacto como situación testigo para el monitoreo de procesos de evolución o degradación en suelos de la zona (Michelena, 1998), investigaciones de infiltración y escurrimiento, etc. Esta condición es tanto más relevante en cuanto son escasas las publicaciones que contemplan situaciones de áreas con vegetación en su condición clímax (Cisneros et al., 1997).

Los usos y manejos históricos del suelo se determinaron mediante una encuesta realizada a los productores integrantes de la cuenca. Por otra parte, se efectuaron relevamientos periódicos del área en forma visual. Con el procesamiento de estos datos se elaboraron mapas de distribución espacial de los diferentes usos del suelo. La cuenca de 870 ha (CG) tiene un 10% de monte natural en su parte media, la superficie restante son tierras de uso agrícola. Del área cultivada, el 95% se maneja en siembra directa, y un 20% con terrazas de desagüe paralelas y canales vegetados correspondiendo a la parte inferior de la cuenca.

La influencia en los cambios de uso del suelo sobre un aspecto principal de la hidrología de la cuenca como es la infiltración, queda reflejada con algunos valores de infiltración determinados por Aoki et al. (1996) y Aoki y Sereno (1999). Estos trabajos presentan una infiltración básica de  $15 \pm 4$  mm/h en condiciones de suelo seco y  $12 \pm 3$  mm h<sup>-1</sup> en condiciones de mayor humedad. En monte natural este mismo autor determinó valores de infiltración básica de 31 mm/h. Esmoriz et al. (2002b) midieron láminas de escurrimiento del orden de 10 veces menores en terrenos con siembra directa y sistematización en terrazas, en comparación con la labranza convencional.

Sin embargo, Castiglioni et al. (2006), trabajando sobre Argiudoles vérticos en la Provincia de Buenos Aires, analizaron los hidrogramas de una serie de 28 eventos ocurridos entre 1994 y 2002, 15 bajo labranza convencional y 13 bajo siembra directa, no encontrando diferencias significativas entre los coeficientes de escorrentía de ambas situaciones, aunque los hidrogramas sí presentaron algunas diferencias, como la disminución del caudal máximo y de los caudales medios en siembra directa. El sistema de labranza siembra directa originó valores de números de curva mayores que el sistema de labranza convencional.

Bricchi et al. (1999) trabajando sobre haplustoles típicos de textura franca y relieve normal muy suavemente ondulado, concluyeron que el coeficiente de escorrentía tuvo variación, dependiendo del sistema de labranza y la cobertura superficial.

En la cuenca grande del presente estudio, la presencia de terrazas produjo una disminución de la velocidad de escurrimiento y por ende, una mayor oportunidad de infiltración (Beasley, et al., 1984; Esmoriz et al., 2000).

Las diferencias entre los distintos trabajos aludidos posiblemente se deban a la diferencia existente entre los suelos y su permeabilidad de las diferentes cuencas.

### **Instalación de instrumentos registradores de precipitaciones y escurrimiento superficial**

Los instrumentos instalados en la cuenca se emplazaron respetando por un lado las condiciones especificadas por el fabricante y por otro las normas establecidas al respecto, tales como distancias mínimas a edificaciones, cortinas forestales, etc. para el caso de pluviógrafos.

Asimismo, para los instrumentos que se instalaron en lugares alejados o en cercanías a la Ruta 36, se previó el resguardo contra vandalismo.

### **Registro de precipitaciones**

#### **Pluviógrafo Oeste**

Procurando delatar las variaciones areales de las precipitaciones de tipo frontal, en el extremo oeste de la cuenca se instaló un pluviógrafo digital Tecmes TS 1300 (Pluviógrafo Oeste) constituido por: sensor a cangilón, registrador digital con memoria de estado sólido; Cartucho de memoria y lector de memoria. Se lo instaló sobre un bastidor de hierro, con protección de chapa tubular removible alrededor del registrador y cerco de alambre tejido (Figura II.15); el mismo entró en servicio en Mayo de 1995.

Inicialmente se instaló en predios de la Estancia Los Cerrillos (Monumento a Myriam Stefford) a unos 1500 m de la Ruta 5 y en Octubre de 1999 se trasladó a su emplazamiento actual, cuyas coordenadas geográficas son:

Pluviógrafo Oeste S 31° 37' 31"  
W 64° 20' 08"





Figura II.15- Pluviógrafo Oeste sin la cubierta protectora

Este cambio (ver Figura II.16) fue considerado para la distribución areal de las lluvias que, siguiendo el criterio de Thiessen (Remenieras, 1974; Chow et al, 1994), es:

Eventos anteriores al 28/10/99:

Pluviógrafo Este (**microcuencas**): 610 Ha.

Pluviógrafo Oeste : 260 Ha.

Eventos posteriores al 28/10/99:

Pluviógrafo Este (microcuencas): 320 Ha.

Pluviógrafo Oeste : 550 Ha.

### **Pluviógrafo Este**

En el punto de desagüe de la microcuenca de 9.3 ha se instaló una estación meteorológica Davis que incluye pluviógrafo (Pluviógrafo Este), termómetro, barómetro y anemómetro (ver Figura II.16).

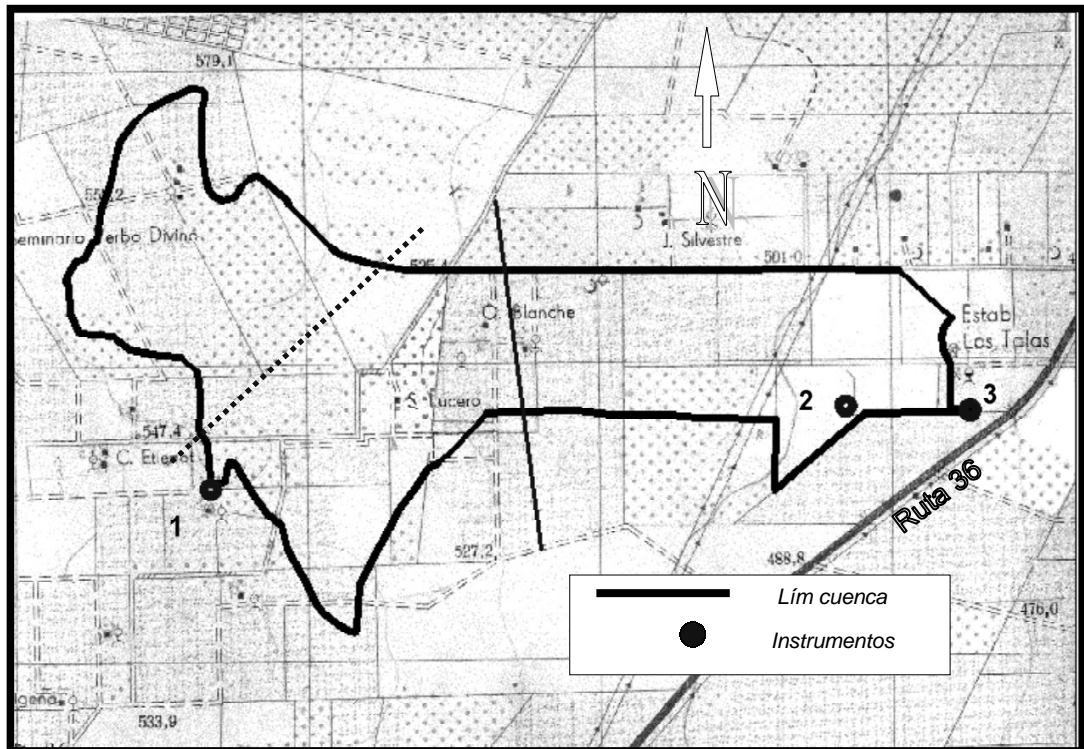


Figura II.16- Carta del IGM con la ubicación de los pluviógrafos: 1: Pluviógrafo Oeste; 2: Pluviógrafo Este y aforador microcuenca; 3: Limnógrafo de Cuenca Grande. Las líneas muestran las áreas de influencia de cada pluviógrafo: La del Oeste (punteada), antes del 28/10/99 y la del Este, después de esa fecha.

El pluviógrafo Este entró en servicio en Junio de 1996.

Sus coordenadas son:

S 31° 37' 16"

.....

W 64° 17' 22"

Entre los pluviógrafos Este y Oeste hay una distancia de 4.41 Km.

Según el National Engineering Handbook del SCS, en su Capítulo 4 – Hydrology – la estimación del error en el promedio de precipitaciones en una cuenca en función del número de pluviógrafos, es menor del 2% para registros del orden de 120 mm, y del 10% para precipitaciones entre 10 y 15 mm para 870 ha y dos pluviógrafos.

Asimismo se cuenta con un pluviómetro instalado a 350 m del Limnógrafo de Cuenca Grande en dirección Norte, que entró en servicio en 1993.

## Frecuencia de láminas diarias

Un análisis de las precipitaciones diarias ocurridas durante seis años (1996-2001), muestra que casi un 90% de las lluvias tienen una intensidad diaria inferior a 25 mm, mientras que menos del 4% (11 lluvias) supera los 50 mm. La Tabla II.6 expone estos resultados, habiéndose separado las lluvias en clases (primera columna) con intervalos de 25 en 25 mm.

Tabla II.6- Frecuencias de precipitación diaria.

Clase	Intervalo (mm)	Casos	Frecuencia (%)
1	0-25	296	88.5
2	25-50	27	8.0
3	50-75	8	2.5
4	75-100	2	0.7
5	100-125	1	0.5

## Período de Retorno

A modo solamente indicativo, ya que la extensión del período de registros es extremadamente corta, se aplicó la expresión de Weibull (1939) para probabilidad de ocurrencia de las mayores lluvias diarias de cada año:

$$P = \frac{m}{n+1} \quad \text{Ec 0.1}$$

Siendo P: probabilidad; m: la posición de un valor en una lista ordenada de mayor a menor y n: total de valores.

Y siendo

$$TR = \frac{1}{P} = \frac{n+1}{m} \quad \text{Ec 0.2}$$

Se tendría que una precipitación diaria de 100 mm ocurriría probablemente una vez cada seis años (Tabla II.7) y que todos los años podría esperarse que ocurra una lluvia aproximada a los 50 mm. Más objetivamente puede observarse que en la mitad de los años se han superado los 80 mm de precipitación diaria.

Tabla II.7- Tiempos de retorno de las precipitaciones registradas en la microcuenca

Nº orden	Año	Fecha	PP (mm)	TR (años)
1	1997	12-12-97	127.0	13.0
2	1996	04-04-96	101.0	6.5
3	1994	11-12-94	87.5	4.3
4	1993	10-11-93	86.0	3.3
5	1999	06-02-99	85.0	2.6
6	2001	04-03-01	83.0	2.2
7	2000	06-03-00	72.0	1.9
8	2004	31-03-04	65.0	1.6
9	1995	03-10-95	50.0	1.4
10	1998	28-05-98	50.0	1.3
11	2003	27-12-03	50.0	1.2
12	2002	01-12-02	48.5	1.1

### Distribución diaria de las precipitaciones

La observación de los hietogramas de cada lluvia denota una distribución irregular. No obstante y debido a que aparentemente al aumentar la lámina de precipitación diaria esa irregularidad disminuye, se efectuaron pruebas de bondad de ajuste para diferentes distribuciones. Por otra parte los eventos de mayor lámina diaria de precipitación adquieren mayor interés, por ser ellos los que conforman la base para seleccionar las tormentas de proyecto.

Trabajando sobre 28 eventos se seleccionaron sólo aquellas precipitaciones iguales o mayores a 50 mm, que pueden aproximadamente ser igualadas o superadas todos los años, y siguiendo un criterio similar al de Caamaño Nelli (2003) se tomaron las que presentaban un hietograma unimodal. Sólo dos eventos de los 28 se ajustaron a estas condiciones, y ambos ajustaron a una distribución Log Normal, como así también a una distribución Gumbel.

Para caracterizar la forma del hietograma se procuró analizar la ubicación del pico de los mismos. Dividiendo la duración de las tormentas en sextiles, se atribuyó el pico de la tormenta a aquel sextil que presentaba el mayor porcentaje de precipitación. En general, para los hietogramas unimodales el pico ocurre en el segundo sextil, coincidiendo con la distribución presentada por Caamaño Nelli y Dasso (2005) para la Ciudad de Córdoba, como en los ejemplos de la Figura II.17 y Figura II.18.

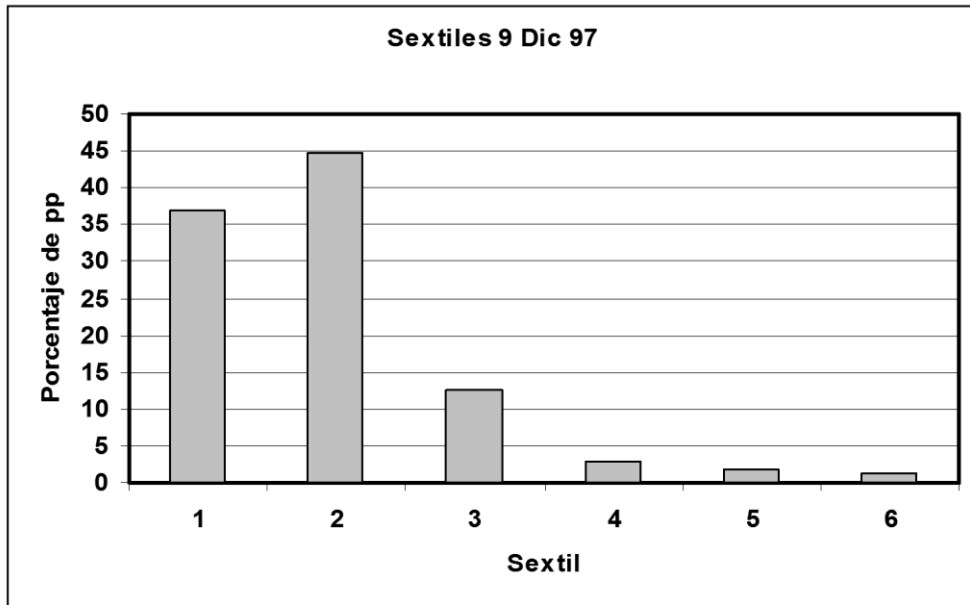


Figura II.17- Ejemplos de distribución por sextiles de tormentas de más de 70 mm por día

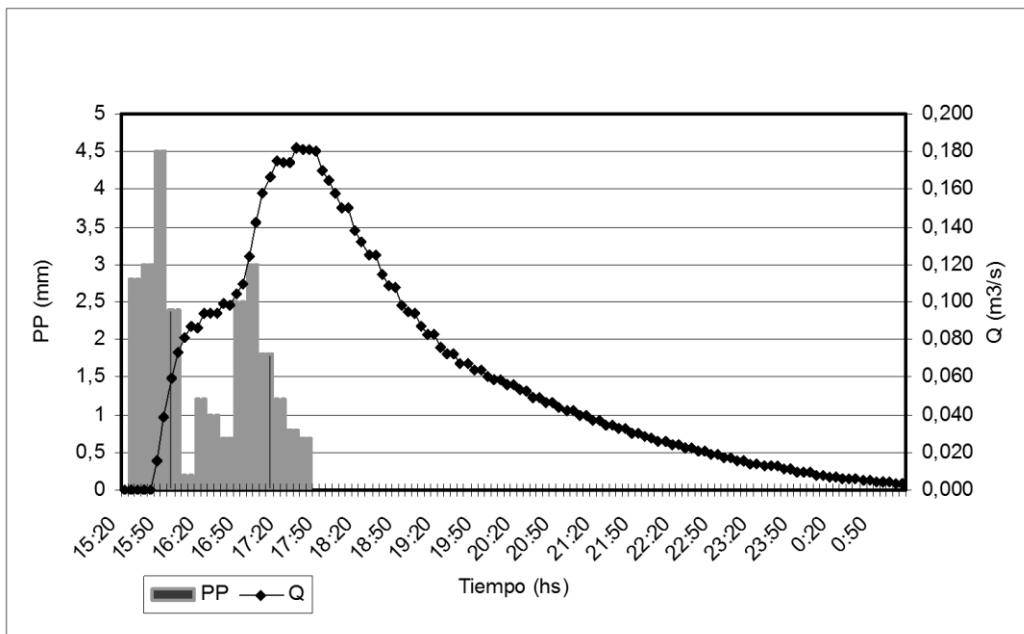


Figura II.18- Evento del 4 de Diciembre de 1996 en la microcuenca

## Intensidades máximas

La Tabla II.8 muestra la intensidad y duración de las lluvias registradas que produjeron escurrimiento en Cuenca Grande.

Tabla II.8 - Intensidad en una hora y en el Tc; duración y relación entre duración y Tc. Siendo PP: precipitación; P1h: precipitación máx. en 1h; PTc: precipitación máx. en el Tc; D: duración de la lluvia.

Evento	Int Máx				
Fecha	PP	P1h	PTc	D	D/Tc
	mm	mm	mm	hs	
6-1-97	71	35	69	5.5	1.3
26-1-97	53	34	45	7.2	1.7
10-11-97	51	32	51	3.6	0.9
9-12-97	33	29	33	2.9	0.7
30-12-97	35	26	33	4.9	1.2
1-12-99	59	11	25	20.7	5.0
1-12-99(2)	46	10	25	8.3	2.0
18-12-99	37	19	35	4.5	1.1
11-1-00	64	33	45	9.3	2.3
6-3-00	63	61	63	1.6	0.4
13-12-00	43	41	43	1.2	0.3

Con los registros pluviográficos se determinó la lámina máxima precipitada para cada evento y para distintos períodos de tiempo: 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, una hora, dos horas y Tiempo de Concentración (Tc) de la cuenca (4.1 hs), a los efectos de estudiar cómo influye la intensidad en el escurrimiento. La forma de determinación del Tc se comenta en el punto correspondiente en pág 58.

## Precipitación ponderada

Las precipitaciones consideradas para su procesamiento en Arhymo, fueron procesadas para cada subcuenca, considerando la influencia de cada uno de los dos pluviógrafos según el método de Thiessen. Esta influencia o peso varía según la proporción de cada subcuenca influenciada por uno u otro pluviógrafo. Por otra parte la fecha del evento determina la posición de los pluviógrafos, ya que el Pluviógrafo Oeste fue reubicado el 28/10/99 como se explicara en la Sección 3.

Un ejemplo del tratamiento de las precipitaciones puede verse en el ANEXO 2, Tabla V.1.

## Registro de escurrimientos

### Cuenca Grande

Los caudales escurridos se registraron con un limnógrafo instalado a la salida de la cuenca sobre un canal artificial vegetado, no revestido, construido al efecto. En la Figura II.19, su ubicación está indicada bajo el rótulo “estaciones de aforo”, por la flecha que señala al Este. En la Figura II.20 se presenta una vista aérea de la misma área.

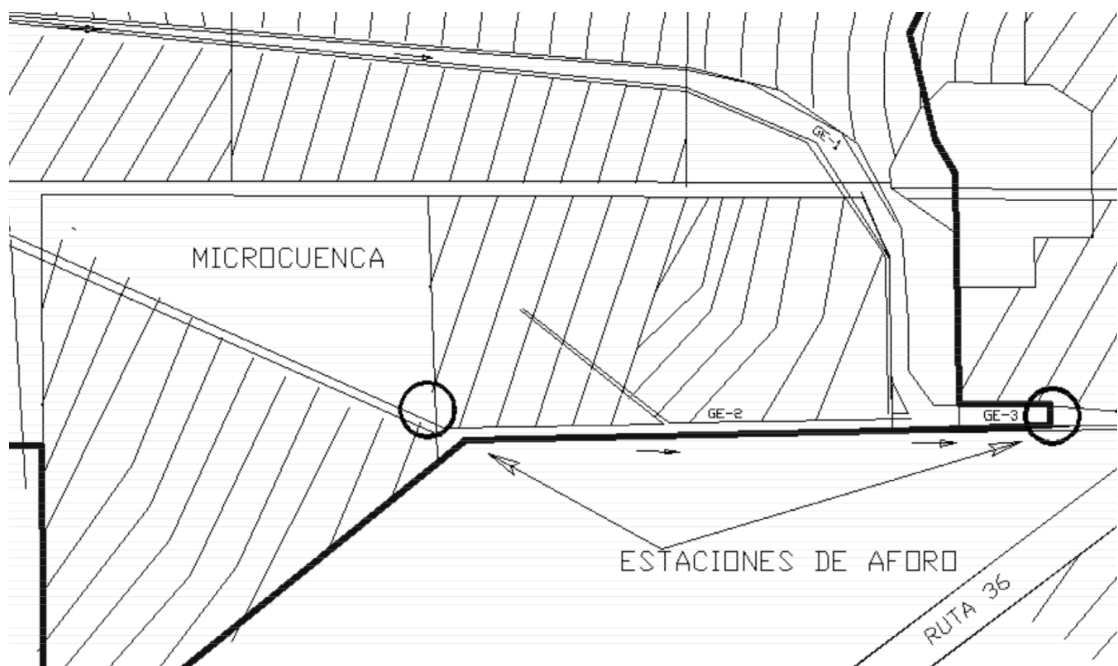


Figura II.19- Canal GE-3 de desagüe de la cuenca y ubicación de los limnógrafos (en círculos) de la microcuenca (al Oeste) y de Cuenca Grande (al Este). Las líneas paralelas son terrazas.

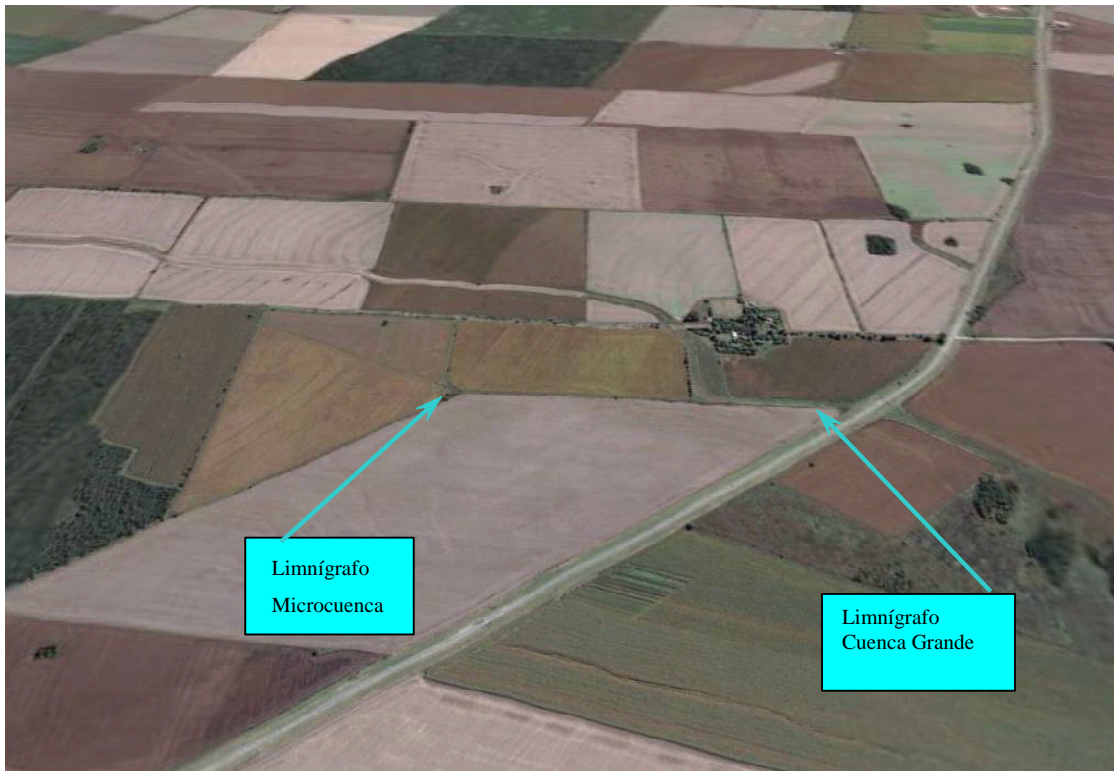


Figura II.20- Vista con Google Earth de la zona de emplazamiento de los limnógrafos

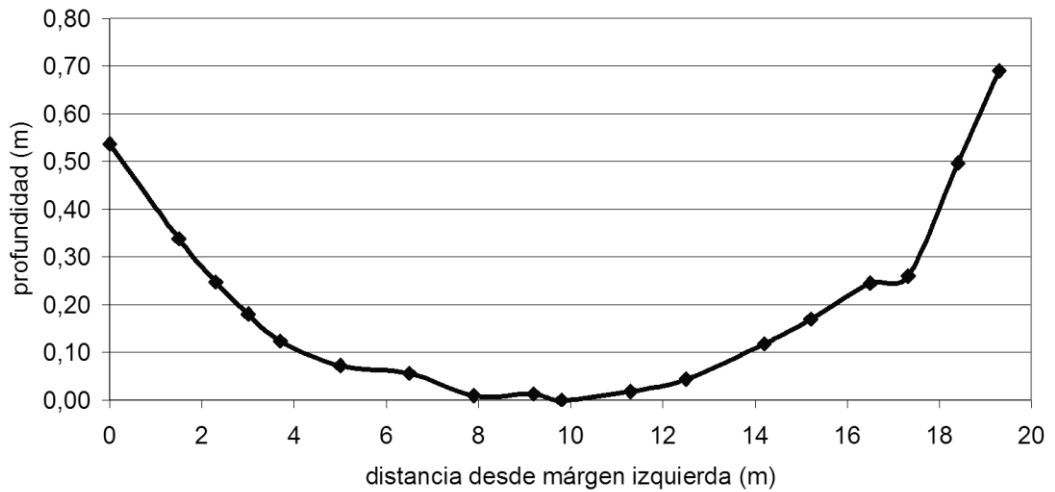
### **Características del canal en la estación de aforo**

El canal en el que se encuentra emplazado el limnógrafo (GE-3), es el que figura más hacia el Este en la Figura II.19. Se extiende desde la confluencia de los canales GE-1 y GE-2 que desagotan la parte norte y sur de la cuenca respectivamente, hasta la Ruta 36.

Debido a que en este canal se instalaría el limnógrafo, se realizó un levantamiento topográfico detallado consistente en un perfil longitudinal y tres perfiles transversales. Estos se ubicaron: uno en la sección del limnógrafo (Figura II.21), otro 20 m aguas arriba y el último 10 m aguas abajo. Para transformar las alturas registradas en el limnógrafo a caudales, se utilizó la ecuación de Manning (Schwab et al., 1966) para la velocidad del flujo y las diferentes áreas de la sección con incremento milimétrico de la profundidad o tirante. El gráfico de la Figura II.22 es resultado de este cálculo.



Figura II.21- Perfil Transversal del canal GE-3 en la sección del limnógrafo, visto desde



aguas arriba.

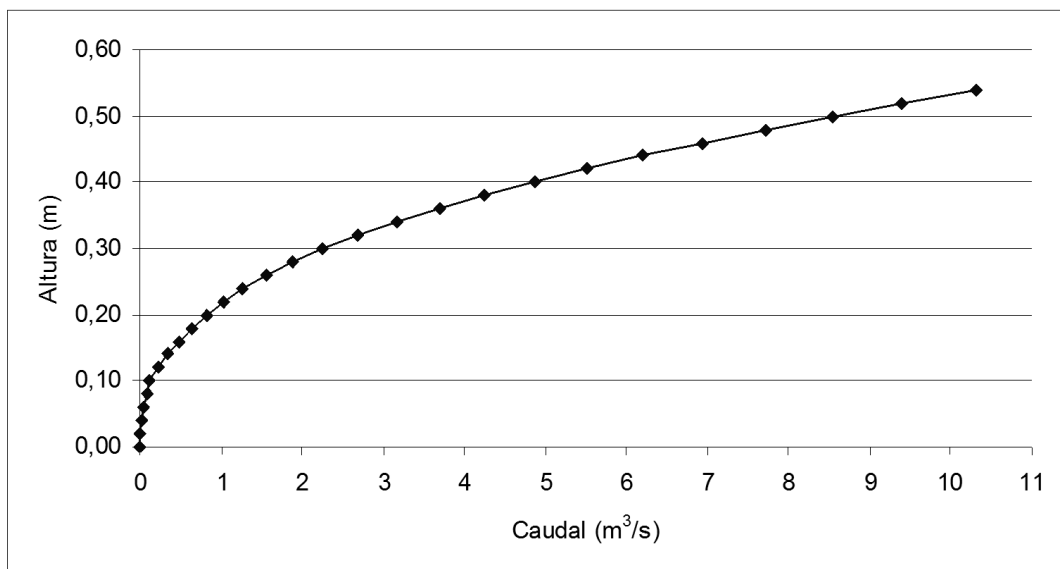


Figura II.22- Curva altura – caudal del canal GE-3 en la sección del limnógrafo

### Limnógrafo de Cuenca Grande

En el desagüe de la Cuenca Grande se instaló un limnógrafo digital Tecmes TS 1310 (Limnógrafo CG) constituido por: sensor de nivel; registrador digital con cartuchos de memoria y lector de memoria (el mismo que para el pluviógrafo Oeste). Por encontrarse próximo a la ruta 36, se construyó para su protección un bastidor de chapa, agujereada en la base para el paso del agua y reforzada arriba, a la altura del registrador.

Esta estación (Figura II.23) entró en servicio en Diciembre de 1996 siendo sus coordenadas:

limnógrafo Este      S 31° 37' 15"  
W 64° 16' 51"

En el ANEXO 4 se presenta una planilla de cálculo para llevar los registros limnográficos a caudales y lámina de escurrimiento.

### **Tiempo de Concentración de la Cuenca Grande**

Para su determinación se adoptó el criterio de que el tiempo de concentración ( $T_c$ ) es equivalente al período comprendido entre fin de la lluvia neta y fin del escurrimiento directo o superficial (Tucci, 1993). En el análisis, se ponderaron los registros de ambos pluviógrafos por su área de influencia, según el método de Thiessen. El criterio de lluvia neta se tomó acorde al criterio de Remenieras (1974), como aquella parte de la precipitación que no infiltra y se transforma en escurrimiento superficial. Por otra parte, el final del escurrimiento directo coincide con el punto de inflexión de la recesión de la curva del hidrograma.

Para la separación de la lluvia neta, se adoptó una curva de valores experimentales de velocidad de infiltración para suelos secos, con baja humedad antecedente y con intensidad de precipitación de 35 mm/h (Aoki et al, 1996), obtenida de un punto de la cuenca en estudio.

Con estos criterios aplicados a diferentes eventos de lluvias que produjeron escurrimiento, se determinó el tiempo de concentración, que arrojó un valor de 4.1 h (Luque et al., 1999).

A modo de ejemplo y a fin de explicitar la metodología utilizada, se detalla el evento correspondiente al día 9-12-97: La precipitación sumó un total de 33.5 mm; siguiendo el método, el final de la precipitación neta ocurre a las 2h 45' (punto donde la curva de infiltración corta a la curva de recesión del pluviograma) y el fin del escurrimiento directo ocurre a las 6h 45'. Por consiguiente, el tiempo de concentración es de 4h 00'.

### **Sensibilidad de la estación limnográfica**

Dos son los aspectos que aquí se analizan:

#### **Sensibilidad de las transformaciones de tirante del canal a caudales**

El conjunto sensor – registrador instalados toman las lecturas con precisión de milímetro. Por otra parte, en los registros no se aprecian fluctuaciones atribuibles a oleaje, debido a que la boya del sistema trabaja en una cámara de quietamiento. La diferencia de caudales para una variación en el tirante de un mm, se muestra para las diferentes profundidades (Tabla II.9). La última columna muestra el error relativo.



Figura II.23- Limnógrafo de Cuenca Grande en el canal de desagüe de la cuenca.

Tabla II.9 - Sensibilidad del limnógrafo para  $n$  de Manning = 0.04. Donde  $H$  es tirante expresado en mm y  $Q$  es caudal expresado en l/s.

Rango de H	Q del umbral inferior	dQ	dQ/Q (%)
de 50 a 51	30	1	3
de 100 a 101	125	5	4
de 200 a 201	825	10	1
de 300 a 301	2247	22	1
de 400 a 401	4864	32	1

En la Figura II.24 se presenta la sensibilidad como la derivada de la función  $Q=f(H)$ , siendo  $Q$ : caudal y  $H$ : tirante del canal.

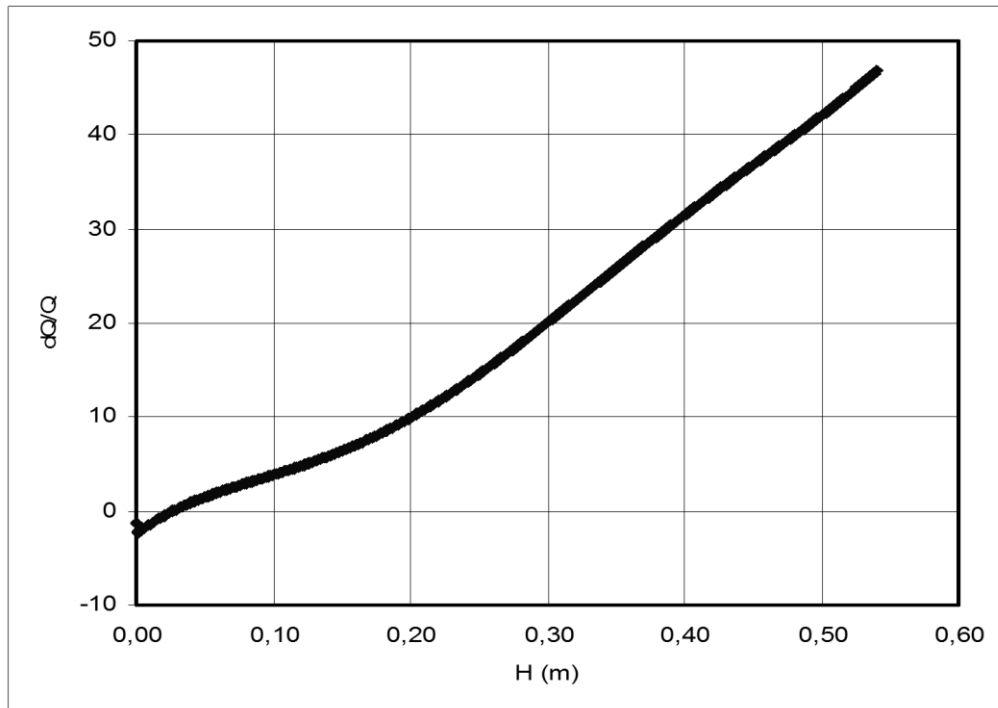


Figura II.24- Gráfico de la derivada de la función Q=f(H)

El error relativo se acentúa en los caudales pequeños, por la marcha parabólica de las curvas de gasto (Remenieras, 1974). En todos los casos los errores debidos a la sensibilidad de las lecturas en la estación, son inferiores al 5%.

### **Coefficiente de rugosidad de Manning**

Los escurrimientos observados fueron transformados a caudales y láminas en función de la curva H-Q del canal. En estos cálculos de escurrimiento a partir de datos del limnógrafo, los cálculos requieren necesariamente de un valor de rugosidad para inferir los valores de velocidad del agua.

En un canal ya ejecutado, si se dispone de valores medidos de velocidad y su tirante correspondiente para un evento determinado, es factible calcular el coeficiente de rugosidad.

Los valores de Horton para el coeficiente n, para ser utilizado en la fórmula de Manning (King, 1962; Israelsen y Hansen, 1965) para "canales con lechos bastos y pedregosos, y con maleza en sus orillas de tierra" fondo de tierra, irregulares y con hierbas en las paredes", son 0.03 para una condición buena, 0.035 para condición regular y 0.040 para condición mala.

Otra aproximación a las condiciones del canal GE 3 puede ser:

Canales de corrientes naturales, de riberas rectas, a plena altura, sin hendiduras ni rebalsas profundas, pero con algo de malezas y piedras, que cita valores de n 0.033, 0.035 y 0.040 para las condiciones buena, regular y mala. Hudson (1982) cita, para canales con cobertura vegetal de hierba corta (8 a 15 cm) valores de n entre 0.030 y 0.060.

De todos los factores en este cálculo, es la rugosidad la que se asocia a un mayor grado de indeterminación. Para el cálculo se midieron el tirante y la velocidad del escurrimiento en el momento de mayor caudal. Para la velocidad se utilizaron flotadores de superficie, en la línea central del cauce.

Sobre la línea central se efectuaron varias mediciones, resultando una velocidad superficial promedio ( $V_s$ ) de 0,80 m/s y con un desvío estándar de 0,02 m/s. Se utilizó la expresión de Bazin (De Paco y López Sánchez, 1993), que determina la velocidad media de la sección ( $V$ ) en función de la velocidad superficial media de la línea central del canal ( $V_s$ ) y considera el radio hidráulico y la naturaleza del cauce. Su forma es:

$$\frac{V}{V_s} = \frac{1}{(1 + 14 * A^{1/2})} \quad \text{Ec 0.3}$$

Siendo  $A = a + b / R$ ;  
 $R$  = radio hidráulico y "a" y "b" coeficientes que dependen de la naturaleza del cauce (Tabla II.10).

Tabla II.10 - Valores de a y b en la fórmula de Bazin.

Naturaleza del cauce	a	b
1.- Paredes lisas (hormigón)	0.00019	0.000013
2.- Paredes poco lisas (mampostería)	0.00024	0.00006
3.- Paredes en tierra	0.00028	0.00035

Siendo:

$H = 0.06$  m (tirante medido);  $S = 0.1453$  m<sup>2</sup> (superficie de la sección);  $P = 3.93$  m (perímetro mojado);  $R = 0.04$  m (radio hidráulico);

Para las condiciones del canal en estudio:  $a = 0.00028$ ;  $b = 0.00035$ ; en consecuencia  $A = 0.00903$ .

Aplicando esta ecuación a las mediciones de velocidad efectuadas, resulta:  
 $V = 0.34$  m/s.

Para esa velocidad y con la pendiente del canal ( $i$ ) de 1,15 %, se calculó el  $n$  de Manning

$$V = \frac{R^{2/3} * i^{1/2}}{n} \quad \text{Ec 0.4}$$

en consecuencia:

$$n = \frac{R^{2/3} * i^{1/2}}{V} \quad \text{Ec 0.5}$$

Resulta:

$$n = 0.035$$

Para probar la sensibilidad de esta ecuación a la variación en los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$ , se calculó " $n$ " aumentando la magnitud de  $a$  y de  $b$  en un incremento igual a la diferencia entre los valores de paredes de mampostería y de tierra, con lo cual  $a=0.00032$  y  $b=0.00064$ . Y como resultado,  $n=0.041$ .

El valor obtenido para  $n$  de 0.035 es citado por King (1962) como de uso corriente en proyectos para estas condiciones. Chow et al (1994) citan el valor  $n=0.035$  como adecuado para pastos en planicies de inundación. El hecho de que la cobertura vegetal no es estática sino que cambia por diversos factores (crecimiento, pastoreo, herbicidas, etc.) y dado que gran parte de las determinaciones fueron hechas anteriormente a esta determinación con un valor de  $n=0.04$ , hizo que se adoptara este valor, el que será usado tanto en la transformación de los datos limnigráficos a caudales cuanto en las simulaciones de Arhymo.

En el gráfico de la Figura 11.25 pueden observarse las diferencias de caudal que resultan de considerar los distintos  $n$  de Manning. Para un mismo tirante la diferencia entre el  $n$  utilizado comúnmente para proyectos en la región ( $n=0.04$ ) y el determinado en la medición expuesta arriba ( $n=0.035$ ) resulta en diferencias de caudales del orden del 12%.

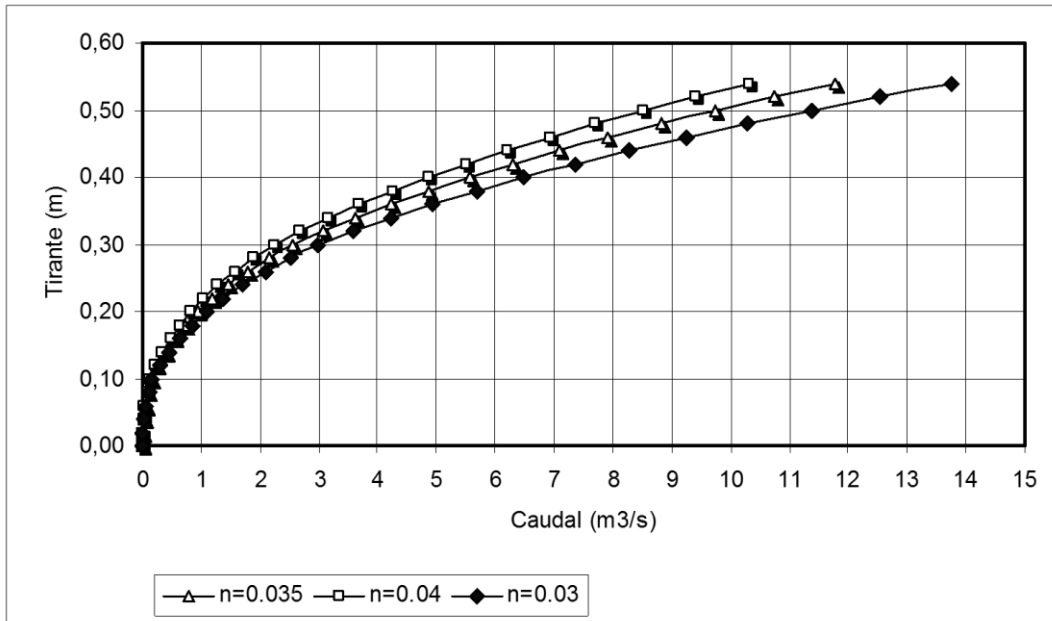


Figura II.25- Curvas de capacidad para diferentes n de Manning

Para flujo laminar (overland flow), los valores de n de Manning utilizados por algunas expresiones para el cálculo del tiempo de concentración, se fijaron en base a los citados por Engman et al. (1986), considerando cultivos en surco.

Una imagen del estado de la cubierta vegetal en Noviembre de 2000 puede observarse en la Figura II.26.



Figura II.26- Estado de la cobertura del canal en la estación de aforo (Noviembre de



2000)

### Aforador de la microcuenca

Ubicado el desagüe de la micro cuenca de 9.3 ha. Es un aforador tipo canaleta sin cuello (“cutthroat flume”) con limnígrafo con sensor de presión que opera a intervalo variable, en función del gradiente del flujo siendo el intervalo mínimo de 5 minutos (Luque et al., 1996) y cuya ecuación teórica (King et al., 1962; Linsley et al., 1982), es empleada para transformar los niveles en caudales. La Figura II.27 muestra la curva altura-caudal del aforador.

$$Q = C * H^{1.65} \quad \text{Ec 0.6}$$

Siendo:

Q: caudal

C: Coeficiente que depende del ancho de la garganta.

H: Tirante o profundidad.

La canaleta menor tiene 0.20 m de ancho (W en la Figura II.27); una segunda canaleta ubicada en paralelo de 0.60 m de ancho comienza a trabajar cuando el nivel del agua en la canaleta anterior alcanza los 0.30 m de tirante. Por último, un vertedero cuya cresta es de 4.00 m comienza a trabajar cuando el tirante es de 0.60 m.

Este aforador cuenta con un registrador con cartucho de memoria y entró en servicio en Junio de 1996. En la Figura II.28 puede verse una imagen del aforador en funcionamiento.

Los registros son permanentes. Estos registros se analizan para que puedan ser manejados y presentados en una planilla de cálculo, confeccionándose un gráfico de hietograma e hidrograma para cada evento. En la etapa de procesamiento se analiza la consistencia de los registros, atendiendo asimismo a posibles errores instrumentales tales como falla o alteración de lecturas.

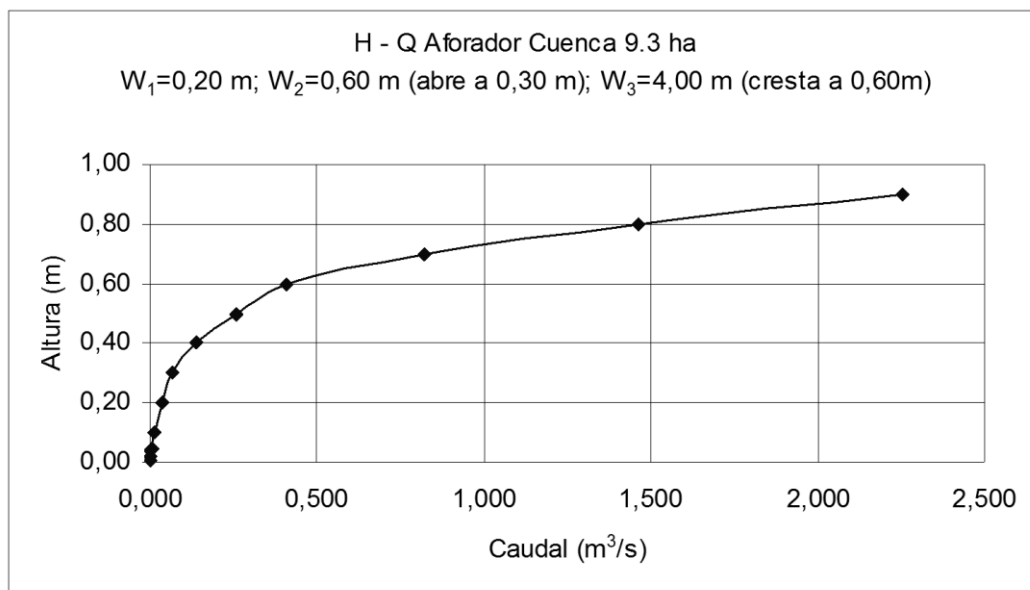


Figura II.27- Gráfico altura-caudal del aforador de la microcuenca



Figura II.28- Aforador de la microcuenca

### **Procesamiento de un evento lluvia – caudal en Cuenca Grande**

#### **Planillas de uso del suelo**

En base a fotografías aéreas y relevamientos, se confeccionó un plano de la cuenca con la división en lotes, los cuales se numeraron para documentar el uso de cada lote a través del tiempo (ver Figura V.1 en Anexo 7). Estos datos se asentaron en planillas, de las cuales pueden observarse algunos ejemplos para diferentes recorridos de la cuenca, en el Anexo 7.

Se utilizó una planilla para cada fecha de recorrido. Cada una de estas planillas registra la superficie del lote, estado actual (cultivo, rastrojo, pastura, etc), cultivo anterior, tipo de labranza, altura del cultivo, cobertura estimada. Hasta la campaña 1998 – 1999 se trabajaban 130 ha del total de la cuenca, con labranza convencional. En la campaña 1999 – 2000, pasaron a siembra directa otras 80 ha y en la campaña 2000 – 2001 sólo quedaron con labranza convencional las 9.3 ha de la micro cuenca experimental.

El número de cada lote es una codificación que identifica también al propietario. Es de hacer notar que algunos lotes fueron unificados por el dueño y trabajados como una sola unidad, con posterioridad al mapeo efectuado al principio de estos estudios.

Las estimaciones de cobertura se hicieron ajustando un criterio en base a las observaciones independientes de varios investigadores y los guarismos expuestos

por Esmoriz en Sereno et al (1997). En un principio las recorridas comprendían cobertura total, y luego se llegó a establecer el criterio de cobertura de canopia, cobertura de rastrojo y total.

Cabe mencionar que este grado de detalle excede los requerimientos del método NC SCS.

### **NC ponderada**

El programa Arhymo requiere un NC para cada subcuenca que se ingrese. Este NC se calculó en forma ponderada, para cada subcuenca, en base a las planillas de uso del suelo (ver en ANEXO 3), teniendo en cuenta la condición actual de los lotes, la superficie de cada lote que corresponde a esa subcuenca y el NC en condición AMC II. Luego se transformó el NC según el AMC que le correspondiera, lo que surgió de los registros de cada pluviógrafo y su área de influencia según Thiessen (Figura II.16).

En el ANEXO 3, Tabla V.2 se presenta un ejemplo del cálculo de NC para cada subcuenca.

## Escorrimento observado

Los registros limnográficos obtenidos en la estación de aforo (Figura II.29), fueron transformados a caudales mediante la curva Altura-Caudal correspondiente al canal de salida de la cuenca (Ver Características del canal en la estación de aforo en pág 56). Estos caudales, a su vez, se integraron en el tiempo de escurrimiento de hidrograma para determinar volumen total, el cual se transformó a lámina escurrida en función del área de la cuenca.



Figura II.29- Limnógrafo y canal de desagüe de Cuenca Grande

Como ya se expresara, la tabla correspondiente a la curva altura – caudal se confeccionó con incremento milimétrico. En el ANEXO 4, Tabla V.3 puede verse un ejemplo de cálculo de los caudales, volúmenes y lámina de escurrimiento para un evento.

## EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA DEL SOIL CONSERVATION SERVICE

El método resume las condiciones de la cuenca para la producción de escurrimiento en un Número de Curva (NC) que se determina en función de los siguientes parámetros:

- ❖ Uso del suelo.
- ❖ Discrimina entre diferentes formas de aprovechamiento: monte, pastizal, distintos tipos de cultivos, etc.
- ❖ Tratamiento o prácticas de manejo.
- ❖ Prácticas conservacionistas.
- ❖ Condición hidrológica (inclusión de rotaciones favorables)
- ❖ Características del suelo referidas a su capacidad de infiltración y producción de escurrimiento (textura; capas de diferente permeabilidad, etc.)
- ❖ Humedad antecedente (Antecedent Moist Condition; normal: AMC II. seca: AMC I ó húmeda: AMC III, cuyos límites dependen de la lámina de lluvia acumulada durante los 5 días anteriores al evento considerado). Actualmente el NRCS (antes SCS) ha quitado esta clasificación, según se detalla más adelante.

La expresión del escurrimiento es:

$$Lám = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Ec 0.7}$$

Siendo

Lám: lámina de escurrimiento

P: precipitación

I<sub>a</sub>: pérdidas iniciales

S: capacidad de almacenamiento actual del suelo

La precipitación es considerada como total diario, es decir como proveniente de registros pluviométricos.

El método considera “pérdidas iniciales” (*I<sub>a</sub>*) a la lámina de lluvia caída desde el inicio de la precipitación hasta el momento en que comienza el escurrimiento. Estas pérdidas están constituidas por: retención superficial + intercepción por la vegetación + infiltración previa a la iniciación del escurrimiento.

Para evitar la necesidad de estimar las variables *I<sub>a</sub>* y *S* de la ecuación anterior, la relación entre ellas se desarrolló por medio de datos de precipitación y escurrimiento de pequeñas cuencas experimentales, resultando empíricamente de la graficación de (*I<sub>a</sub>*) versus (*S*) para tormentas individuales. La relación queda entonces:

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ec 0.8}$$

Y reemplazando en (Ec 0.7):

$$Lám = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec 0.9}$$

El NC se relaciona con el escurrimiento a través de la capacidad del suelo para almacenar agua (S). El valor de S varía entre cero (nula retención y máximo escurrimiento) e infinito (situación inversa). Su valor está relacionado con el NC de AMC II, según la siguiente expresión:

$$NC = \frac{25400}{254 + S} \quad \text{Ec 0.10}$$

Si S vale cero, NC es igual a 100, máximo valor que puede tomar para el cálculo del escurrimiento. S, como es evidente, depende de los mismos factores que NC y su valor será:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad \text{Ec 0.11}$$

La obtención del NC se hace por medio de tablas que consideran los parámetros mencionados arriba, para la condición AMC II. Luego hay que transformar este NC según la precipitación de los 5 días anteriores. De este modo obteniendo el valor de NC se calcula la lámina de escurrimiento Lám con la Ec. II.9 de pág. 71.

Además, el método requiere para caudales máximos, los datos de:

- Área.
- Longitud del cauce.
- Tipo de tormenta.
- Pendiente.

Cuyo cómputo puede efectuarse mediante el uso de nomogramas, fórmulas o de programas computacionales como el TR 20, TR 55 (NEH-4,1981), etc.

El modelo del NC considera para los caudales máximos la longitud del cauce, para, a través del tiempo de concentración, calcular la base del triángulo cuya altura dará el caudal pico. El método en sí no transita el hidrograma en cauces ni en embalses. Estas operaciones no obstante, son resueltas en el National Engineer Handbook (NEH-4,1981) opcionalmente por tres vías diferentes:

Ecuación de continuidad.

Uso de relaciones entre hidrogramas de entrada y salida.  
Uso de la teoría del Hidrograma Unitario.

### **Capacidad del método para representar las diferentes situaciones monitoreadas**

La relación de abstracción inicial  $I_a/S=0.2$  es de uso universal. No obstante, debe considerarse que este valor surgió de ajustar una función lineal al gráfico de Pérdidas iniciales ( $I_a$ ) versus  $S$  para tormentas individuales (NEH-4,1981) en cuencas menores a 4 ha.

Esta graficación resultó con una dispersión notable, y según destaca la misma publicación del NEH-4, esa dispersión de los puntos graficados se debió principalmente a errores en la determinación de  $I_a$ . Esos errores se atribuyen a:

- Dificultad en la determinación del comienzo de la lluvia, por movimiento de las tormentas o falla de instrumental.
- Dificultad de determinar el momento de comienzo del escurrimiento, y
- Imposibilidad de determinar cuánto de la interceptación previa al escurrimiento encontraba luego un camino hacia la superficie del terreno, contribuyendo al escurrimiento superficial.

Diversos autores han encontrado valores diferentes para la relación  $I_a/S$ . Wisner et al. (1989, en Maza 2000) encontró que el valor  $I_a=S0.55$  era mas ajustado a la realidad.

Zucarelli et al. (2005) destacan la necesidad de obtener un buen estimador del parámetro  $S$  para disminuir el error en el caudal estimado.

Hawkins (1978) expresa entre otras consideraciones, que el NC no tiene significado intrínseco, y que es solamente una transformación conveniente de  $S$  para establecer una escala de 0 a 100.

En nuestro país, algunos autores (Santanatoglia et al., 1996) han referido una subestimación del parámetro  $S$  midiendo en una microcuenca de suelo Argiudol vértico en de pampa ondulada.

Woodward et al. (2002) y Woodward et al. (2003) trabajando en cuencas de Ohio (EEUU) determinaron el valor de  $I_a=0.05 S$ , que encontraron más apropiado que el valor usual de  $I_a= 0.2 S$ . Esta misma condición es presentada por Hawkins et al. (2002).

Lim et al. (2006), trabajando en el Estado de Indiana (EEUU) con datos de 4600 días de lluvia ocurridos durante 38 años, encontraron más adecuado el valor de  $I_a=0.05 S$ . Los suelos fueron en ambiente urbano y Clase Hidrológica D, por lo cual es lógico considerar menores pérdidas iniciales, no obstante, destacan los autores, no siempre las pérdidas iniciales del 5% de  $S$  producen mayor escurrimiento que las de 20% de  $S$ . Esto es debido a que el valor de  $S$  cambia, y en consecuencia también el del NC, que debe ser modificado. Superado un umbral de lluvia diaria, el escurrimiento es mayor con  $I_a=0.2 S$ . Los autores concluyen que la



expresión  $Ia=0.05 S$  para suelos clase D en zona urbanizada, mejora la estimación del escurrimiento en períodos largos de tiempo. Hawkins et al (2002) (en Lim et al., 2006) presentan una expresión para la obtención del NC con  $Ia=0.05 S$  a partir del NC estimado con  $Ia=0.2 S$ .

Castiglioni et al. (1998) trabajando sobre Argiudoles vérticos en la Provincia de Buenos Aires, utilizaron un S calculado para cada evento por la fórmula de Haan, en un estudio sobre tiempos de concentración:

$$S = 5P + 10Q - 10\sqrt{Q^2 + 1.25PQ} \quad \text{Ec 0.12}$$

Siendo:

P = lluvia caída en mm

Q= escurrimiento en mm

S= retención potencial máxima en mm

Las mayores fuentes de error en el método de estimación del escurrimiento son las determinaciones de la precipitación y del NC. Sin embargo, si bien existen estudios para estimar el error en las lluvias, no hay métodos semejantes para estimar el error del NC en cuencas no aforadas; solamente la comparación de escurrimientos estimados y observados indican la bondad de las estimaciones (SCS, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Part I, Watershed Planning, Chapter 10, Estimating of direct runoff from storm rainfall; 10.18 – Accuracy).

La capacidad de representación del modelo NC SCS está directamente relacionada a la habilidad de estimación del parámetro NC. Así, errores en la estimación de NC pueden conducir a consecuencias mucho más serias que las provocadas por errores de similar magnitud en la precipitaciones (Hawkins, 1975). Boughton (1989) expresó: la mayor debilidad del método es la sensibilidad del escurrimiento estimado con relación a los errores en la determinación del NC.

De los parámetros del método, la condición de humedad antecedente del suelo (AMC) ha sido frecuentemente reportada como causa principal de una errónea determinación de NC (Chagas et al, 1993; Santanatoglia et al, 1996; Hjelmfelt et al, 2001; Esmoriz et al, 2002a).

### **Variabilidad experimentada por el parámetro AMC**

Hjelmfelt (1991) hace notar que el SCS da tres definiciones para la condición de humedad antecedente II (AMC II):

1. Condición promedio.
2. Mediana del Número de Curva.
3. Ocurrencia de lluvias antecedentes.

siendo este último el más utilizado.

En este estudio, acorde al tercer criterio, para definir la condición de humedad antecedente (AMC) fueron considerados el estado fenológico del cultivo y la precipitación ocurrida en los 5 días anteriores a cada evento.

Tablas de NC para diferentes tipos de vegetación y grupos hidrológicos de suelos son presentados en el NEH-4 y por doquier, sin embargo la información básica acerca de la calibración es escasa (Hawkins, 1978).

Chagas et. al, (2006) determinaron para una cuenca situada en el Norte de la Provincia de Buenos Aires, que la mayoría de los escurrimientos ocurrieron en condición AMC I, “mostrando un aspecto crítico de discusión para el uso de esta metodología”.

Hawkins (1978) señala que algunas dificultades reales y conceptuales surgen al aplicar esta parte de los procedimientos del NEH-4, siendo la primera, el hecho de que las relaciones se muestran como discretas, no como continuas, implicando saltos repentinos en el NC, con los correspondientes saltos en los cálculos del escurrimiento. Concordantemente con esta problemática, otros autores, para cuantificar la influencia de las lluvias previas a la precipitación estudiada, expresaron aquellas en términos de lámina de agua (variable continua) y no en forma de categorías I, II o III como propone el método del SCS (Chagas et al., 1998).

Además, del análisis de las tablas del SCS se desprende que hay más variación entre AMC que entre Clase Hidrológica de Suelo, pero mientras el suelo es perfectamente clasificable, Chen, en 1981 declaró que no hay forma de saber cómo fueron desarrolladas las relaciones entre las tres condiciones de humedad antecedente (AMC) (Perrone y Madramootoo, 1998). Asimismo la racionalidad para los cinco días antes de la AMC es también poco clara (Enright, 1988; citado por Perrone y Madramootoo, 1998).

Silveira et al. (2000) trabajando en pastizales naturales en Uruguay, encontraron un mejor ajuste del NC con la humedad antecedente considerando las lluvias ocurridas desde 15 días antes del evento considerado, y estableciendo límites entre las condiciones de AMC I, II y III diferenciados según dos niveles de evapotranspiración: alto (Octubre a Abril) y bajo (Mayo a Septiembre).

Más recientemente, el Departamento de Agricultura de los EEUU, conformó un grupo de trabajo para investigar el estado del procedimiento del Número de Curva y para delinear su futuro desarrollo. Este grupo estuvo integrado por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) y el Agricultural Research Service (ARS), agencias ambas del referido Departamento de Agricultura.

El resultado de esta revisión (Hjelmfelt et al., 2001) incluye puntos como:

- La referencia a la condición de humedad antecedente (AMC) fue quitada. La variación es incorporada considerando al NC como una variable aleatoria y las condiciones AMC-I y AMC-III como límites de la distribución.
- La reiteración de la conveniencia de la determinación local de los NC. Esto era parte de la documentación original, pero se ha tendido a descuidar.

- Expresión explícita de la ecuación de escurrimiento del NC como una transformación de la frecuencia de distribución de lluvias a frecuencia de distribución de escurrimientos. Esto estaba demostrado en la documentación original, pero de nuevo ha sido a menudo desatendido.
- La expresión de AMC-I y AMC-III como medidas de dispersión alrededor de la tendencia central (AMC-II). Esto es un corolario del tratamiento del NC como una variable aleatoria.

Algunos autores consideraron la determinación del NC como probabilidad de una distribución Log Normal (Yoo et al., 1993).

Otros autores, trabajando en cuencas de Australia y EEUU, determinaron un mejor ajuste de los NC considerando el aporte al escurrimiento como producido exclusivamente por las áreas saturadas (Steenhuis et al., 1995).

Basados en estas investigaciones, Lyon et al. (2004), desarrollaron un método que combina el NC SCS con áreas fuente variables (VSA: variable source areas). Este método se llamó CN-VSA, y utiliza para la determinación de las áreas saturadas, el índice topográfico de Beven y Kirkby (1979) cuya expresión se muestra en la ecuación II.13:

$$\lambda = \ln \left( \frac{a}{tg \beta} \right) \quad \text{Ec 0.13}$$

Al que agrega información sobre profundidad del suelo y conductividad hidráulica a saturación. De este modo añade en forma bastante simple, a la determinación de la fracción de la cuenca que produce escurrimiento, expresada por Steenhuis, la posibilidad de ubicar geográficamente las áreas saturadas. Los autores destacan que el modelo SMR (Soil Moisture Routing), de base física e integrado a un Sistema de Información Geográfico diseñado para los suelos del NE de los EEUU, ha dado buenos resultados, pero puede ser demasiado complicado para las necesidades de los gestores de cuencas hídricas.

Castiglioni et al. (2004) marcaron también la importancia de la variación espacial de la infiltración en una cuenca de 300 ha con suelos Argiudoles vérticos de la Provincia de Buenos Aires.

En una línea similar, Kirkby et al. (2005) aplicaron la ecuación de infiltración de Green-Ampt modificada concluyendo que es una buena aproximación al NC del SCS, constituyendo una base teórica mejorada para el enfoque del Número de Curva, y relacionando este método con datos de infiltración y propiedades de la superficie tales como área y pendiente.

El estudio de la espacialización de la cuenca del presente trabajo, y las relaciones entre los parámetros  $S$  e  $la$  del método del NC SCS y la infiltración, son líneas de investigación que se señalan y recomiendan bajo el título "TAREAS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS" de esta tesis.

Diversos autores (Hawkins, 1975), dada la implicancia de AMC en la elección del valor de NC, determinaron que la elección inicial de este último resultó inadecuado para la mayoría de los eventos, generando errores en la lámina escurrida inclusive superiores al 100%.

Marano y Micheloud (2005), condujeron experiencias sobre NC en Argiudoles típicos trabajados con SD con diferentes rotaciones en la región central de la Provincia de Santa Fe (Arg.). Los ensayos se efectuaron sobre parcelas experimentales con simulador de lluvias. Estos autores concluyeron que los valores de NC para la condición AMC II de las tablas del SCS no abarcan gran cantidad de situaciones intermedias presentes en una región. Por otro lado, encontraron que en condición de sequía las correcciones por AMC del método NC SCS llevaron a una sobreestimación del escurrimiento, en tanto que bajo condiciones de alto contenido hídrico del suelo ocurría la situación inversa, resultando una subestimación del escurrimiento.

### **Arhymo**

Este modelo es una adaptación argentina (de allí su nombre) del modelo Hymo 10 y utiliza el NC del SCS (Maza et al, 2000). Como ya se dijera, se menciona como el mas usado en la llanura pampeana junto con otras variantes y adaptaciones del modelo de onda cinemática (Riccardi et al., 2002).

El modelo, según los criterios de clasificación enumerados precedentemente, es del tipo empírico, determinístico, concentrado, de eventos y de proyecto. No obstante esta última característica, es también ampliamente usado en simulación y gestión.

#### Descripción de los componentes del modelo

Se hace aquí una breve descripción de las operaciones utilizadas y los datos de entrada requeridos obviando los comandos, códigos, etc propios del software.

Operación: Iniciación del problema.

Datos de entrada: Hora

Operación: Cálculo de hidrogramas para cuencas rurales.

Datos de entrada: Intervalo de tiempo de la precipitación

Datos de precipitación en diferentes opciones: por intervalos, acumulada, diaria, etc.

Área

Número de Curva

Abstracción inicial de la precipitación: Permite la expresión del SCS o una lámina predeterminada.

Diferencia máxima de elevación sobre el cauce principal.

Longitud del cauce principal.

Operación: Suma de hidrogramas.

Datos de entrada: Hidrogramas sumandos

Operación: Cálculo de los tiempos de tránsito en un tramo de cauce

Datos de entrada: Cantidad de secciones transversales en el tramo  
Longitud del tramo  
Pendiente del tramo

Operación: Cálculo de la relación Altura-Caudal de la sección de un cauce

Datos de entrada:  $n$  de Manning  
Pendiente del cauce  
Coordenadas de la sección

Operación: Tránsito de hidrogramas por un cauce

Datos de entrada: Incremento de tiempo para el cálculo

Operación: Tránsito de un hidrograma por un embalse

Datos de entrada: Volumen inicial en el embalse  
Pares de valores de descarga y volumen por vertedero

Dentro del cálculo del hidrograma para cuencas rurales, Arhymo computa el caudal máximo. Este hidrograma es obtenido a través de la convolución entre el hietograma de la precipitación efectiva y el hidrograma unitario instantáneo (HUI) sintético utilizado por Hymo en su versión original. Este HUI adimensional está formulado, desde su origen hasta el punto de inflexión de la rama descendente, por la analogía de Nash de  $n$  embalses lineales en serie, y desde ese punto de inflexión hasta su agotamiento, por dos ecuaciones exponenciales negativas. Estas ecuaciones pueden consultarse en el manual del programa Arhymo.

Debido a las facilidades planteadas, en las determinaciones sucesivas el Número de Curva será aplicado a través del modelo Arhymo, salvo que expresamente se indique lo contrario.

Para la determinación de los diferentes  $n$  de Manning en cada segmento de la sección de un cauce, se consideró las diferencias que pudieran haber entre el cauce propiamente dicho y las diferentes fisonomías de la planicie inundable (Engman, 1986).

### **Corridas de Arhymo**

En el ANEXO 6 se presenta un ejemplo de corrida del programa Arhymo para un evento de Cuenca Grande.

## **MÉTODOS ESTADÍSTICOS**

Para la elaboración del modelo de Lám, se seleccionaron las variables que la literatura clásica refiere como determinantes de la ocurrencia de escurrimiento (Remenieras, 1974):

De las precipitaciones, se utilizan comunmente los parámetros de intensidad, duración, frecuencia y distribución areal.

En cuanto al primero, se midió la correspondencia entre intensidades en diferentes períodos de tiempo, a saber: 10, 20, 30, 60 y 120 minutos, con los

escurrimientos observados, seleccionándose en definitiva la mayor lámina caída en una hora (P1h).

En cuanto a la duración, se consideraron todas las precipitaciones que produjeron escurrimiento, sin importar que duración tuvieran.

Para la frecuencia de precipitaciones, se observó la influencia de las lluvias anteriores, desde 1 a 30 días antes al evento considerado.

La distribución areal se evaluó considerando los datos de los dos pluviógrafos instalados ponderados por el área de influencia según Thiessen. Esta distribución areal se utilizó para dar peso tanto a la intensidad como a la duración y la frecuencia de cada evento.

No se consideró la variable suelo, ya que todos los suelos presentes en la cuenca pertenecen a la clase B de la clasificación hidrológica del método del NC SCS.

En la microcuenca se consideró la variable cobertura como variable de clasificación, con valor 0 o 1 (ver el título Ecuación de regresión para lámina de escurrimiento (Lám) en pág.89).

En Cuenca Grande la variable COB no interviene en las ecuaciones de regresión debido a que prácticamente la totalidad de la cuenca se encuentra bajo el sistema de siembra directa.

A fin de valorar las determinaciones con los datos, se utilizó el estadístico Coeficiente de Determinación. El Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) es una medida de la capacidad predictiva de un modelo, que relaciona la variación explicada por el modelo con la variación total. Mide la proporción de la variación de Y que es explicada por la relación con X (InfoStat, 2002), siendo Y la variable dependiente y X la variable independiente. Se calcula como la relación entre la suma de cuadrados del modelo y la suma de cuadrados total. La variación de este coeficiente es entre 0 y 1.

### **El método Jack Knife**

En ausencia de cualquier otra información respecto a la población que no sea la contenida en la propia muestra, la distribución de los valores encontrados en una muestra aleatoria constituyen la mejor orientación en cuanto a la distribución de esa población. En esta línea se inscribe el método denominado Jack Knife propuesto por Tukey en 1958 (Molinero, 2002).

Al no utilizar más que los valores observados en la muestra, éste y otros métodos con esta característica son denominados como autosuficientes. La idea que subyace en alguno de los métodos autosuficientes es la de generar a partir de los valores observados muestras aleatorias de acuerdo a un modelo específico que se está contrastando.

Si hay  $n$  observaciones, las diferentes muestras se van construyendo eliminando cada vez una de las observaciones y en ellas se calcula de nuevo el valor

del parámetro de interés, repitiendo el proceso  $n$  veces. Se obtiene lo que se denomina pseudo valores.

Se llama estimador Jack Knife a la media de esos pseudo valores, y a partir de la distribución obtenida se calcula también su varianza y un intervalo de confianza para el mismo.

Este método valida hasta cierto punto las predicciones del parámetro de interés, al determinar su valor por regresión pero haciendo que no intervenga en el cálculo.

El CpMallows (InfoStat, 2002) que se muestra en algunas tablas, es un indicador, para cada regresora, de su contribución en el ajuste del modelo propuesto de  $p$  regresoras. Valores de Cp cercanos a  $p$  corresponden a modelos con pequeño sesgo en la predicción. A la inversa, cuando los valores de Cp son altos para una variable, se puede pensar que su contribución es importante para el ajuste del modelo.

## SECCIÓN TERCERA

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## PARTE I. MICROCUENCA

Debido a que el comportamiento del modelo será evaluado a través de la lámina escurrida, se efectuaron primeramente diversas corridas de Arhymo alternadamente con y sin simular el tránsito por el microembalse (ver Subcuenca de 9.3 ha, en pág. 37) para delatar la influencia de este elemento sobre dicha lámina.

Las diferencias entre la modelización sin el microembalse y con el microembalse, indicarían que su influencia en la lámina escurrida (Lám) es muy pequeña, siendo más importante en la morigeración de los caudales pico.

El ajuste del modelo seleccionado para este estudio se procura que permita caracterizar los procesos hidrológicos ante los cambios ocurridos, lo que aumentaría su confiabilidad para la simulación aplicada a proyectos.

### La Condición de Humedad Antecedente en la microcuenca

En lo que respecta a las estimaciones de las pérdidas iniciales (Ia) en el presente estudio, cabe destacar tres aspectos: (a) frecuentemente los valores de Ia deducidos de los datos hidrológicos resultaron inferiores a los estimados por ambas fórmulas empíricas, y (b) existe una correlación funcional entre NC e Ia que implica comportamientos compensados entre ambos parámetros. Esta correlación impide el análisis estrictamente individual de los mismos.

Los análisis de los eventos locales no hacen sino confirmar la falta de adecuación del parámetro Condición de Humedad Antecedente (AMC), ya que la humedad del suelo anterior a los eventos no fue bien representada por la condición AMC del método NC SCS, reafirmando la consideración adoptada de determinar localmente el NC que mejor se adapte (NEH-4,1981; Woodward et al, 2003).

Los ensayos iniciales implicaron la selección del valor de NC de acuerdo a las tablas clásicas del método. La clase hidrológica de suelo adoptada para cada evento surgió de considerar: el tipo de cultivo y la práctica de uso al momento de la ocurrencia de la lluvia y la condición hidrológica resultante. Esto porque si bien las características del perfil ubican a estos suelos como clase B, cuando se encuentran refinados y sin cobertura se observa un encostramiento superficial en días posteriores a la precipitación, lo que limita severamente la infiltración a partir de los primeros minutos de iniciada la lluvia (Aoki, 2002).

Estudios de infiltración realizados por INTA Marcos Juárez en suelos de textura semejante y con lluvia simulada de 60 mm/h de intensidad (Marelli, 1998) coinciden al respecto.

Este encostramiento, aparentemente no se revierte sino que se mantiene aún después de la cobertura por desarrollo de la canopia, con el consecuente incremento de los coeficientes de escorrentía (Esmoriz et al, 2000).



En las presentes experiencias, de los 28 eventos considerados en la microcuenca, 15 son de AMC I, 6 son de AMC II y 7 de AMC III (ver Tabla III.1 y Figura III.1). La mayor frecuencia de la condición AMC I se contradice con uno de los supuestos del método NC SCS (SCS, 1972) (Silveira, 2000). Análoga situación ha sido reportada por Santanatoglia et al. (1996), Chagas et al, (1998) y Chagas et al, (2006) en argiudoles vérticos en la región de San Pedro en la Provincia de Buenos Aires.

En la Tabla III.1 se muestra la lámina precipitada (PP), el escurrimiento observado (Lám Obs), la PP ocurrida en los 5 días anteriores (PP 5 días), la intensidad máxima en una hora (P1h), el índice de precipitación (IPP) y la clasificación de humedad antecedente (AMC).

Tabla III.1 - Condición de humedad antecedente de los eventos de la microcuenca. Los eventos están ordenados según AMC crecientes. Se resaltan los de AMC II para mejor visualización.

Fecha	PP	Lam Obs	PP 5 días	P1h	IPP	AMC
	mm	mm	mm	mm/h		
1996 11 29	17.8	0.2	0	17	7	I
1997 11 10	45.2	4.1	12	26	20	I
1997 12 09	32	10.4	2	28	13	I
1998 02 17	30	0.5	0	18	12	I
1999 02 06	84.6	45.4	0	76	34	I
1999 04 25	62.4	0.3	3	16	25	I
2000 03 06	72	27.5	9	70	29	I
2000 03 12	12.8	0.0	15	8	5	I
2000 11 28	47.4	0.0	12	39	19	I
2000 12 13	49.6	5.7	17	47	21	I
2001 01 28	24.2	4.7	9	17	10	I
2001 02 07	26.8	3.2	0	27	11	I
2001 03 16	55.8	10.5	23	33	22	I
2002 01 04	43.4	1.7	22	12	18	I
2003 01 21	25	4.8	11	25	12	I
1996 12 02	24	1.8	18	21	10	II
1996 12 21	20.2	5.7	23	15	9	II
2000 02 07	23.5	4.4	48	31	13	II
2000 12 29	22.2	5.2	23	21	12	II
2001 01 19	14.5	5.3	21	8	9	II
2001 03 04	47.6	4.1	42	29	21	II
1996 12 03	17	5.2	42	12	11	III
1996 12 04	50.6	23.4	63	27	25	III
1996 12 05	19	16.2	95	14	18	III
1996 12 06	21.2	12.9	129	15	18	III
1997 11 30	14.6	0.3	32	6	8	III
1997 12 12	83.2	41.8	56	16	36	III
2001 03 18	30.2	10.9	56	30	16	III

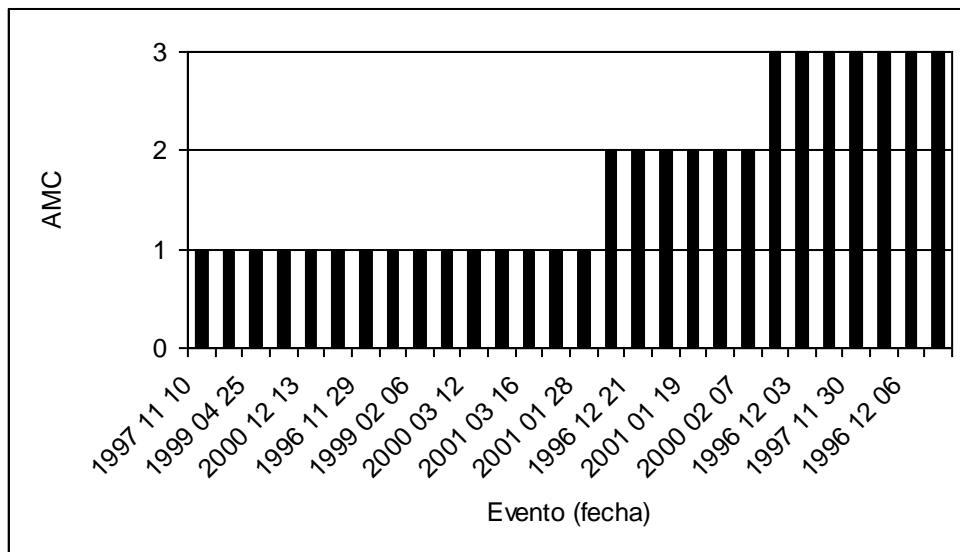


Figura III.1- Se observa que las lluvias ocurridas bajo Condición de Humedad Antecedente II son minoría

Las modificaciones de Scotta (1995) en Entre Ríos a la tabla original del SCS, no mejoraron la estimación del método, cuyo principal escollo continuó siendo la correcta evaluación de la AMC.

La adopción de una AMC basada en las informaciones de campo relativas a la humedad de suelo tampoco condujo a una adecuación de los valores de NC, independientemente de la condición de cobertura. La razón de ello radica en los exagerados cambios de NC que son propuestos por las tablas originales al variar la AMC. El método es muy sensible a los valores de NC, razón por la cual los modelos que lo emplean están sujetos a esta sensibilidad.

### Evaluación del NC SCS en la microcuenca (labranza convencional)

En esta microcuenca de 9.3 ha, la pendiente, el estado del cultivo, la condición del suelo y la distribución areal de la precipitación son factores que pueden considerarse uniformes para un mismo evento. Al trabajarse bajo labranza convencional, las precipitaciones que se analizan en este trabajo han ocurrido bajo situaciones de protección superficial que van desde suelo desnudo hasta cobertura vegetal máxima por cultivo.

### El Número de Curva ajustado (NCaj)

Se determinó para cada evento el NC que ajustara perfectamente la lluvia (PP) y el escurrimiento registrado (Lám); a estos Números de Curva se los denominó Números de Curva ajustados (NCaj). Se obtuvieron primeramente deducidos de la ecuación del SCS y se ajustaron luego por prueba y error con el programa Arhymo, debido a la influencia del tránsito por el microembalse. Un ajuste

similar, fue publicado por Boughton (1989) y expresado en unidades métricas por Auerswald y Haider (Auerswald et al, 1996).

Se comparan seguidamente los NCaj con los NC SCS y el escurrimiento observado con el determinado por el método del NC SCS.

### Comparación de NCaj y NC SCS

La comparación de los NCaj con los NC SCS mostró un ajuste pobre, con un  $R^2$  igual a 0.37, (Figura III.2). Los valores de los NC pueden observarse en la Tabla III.2.

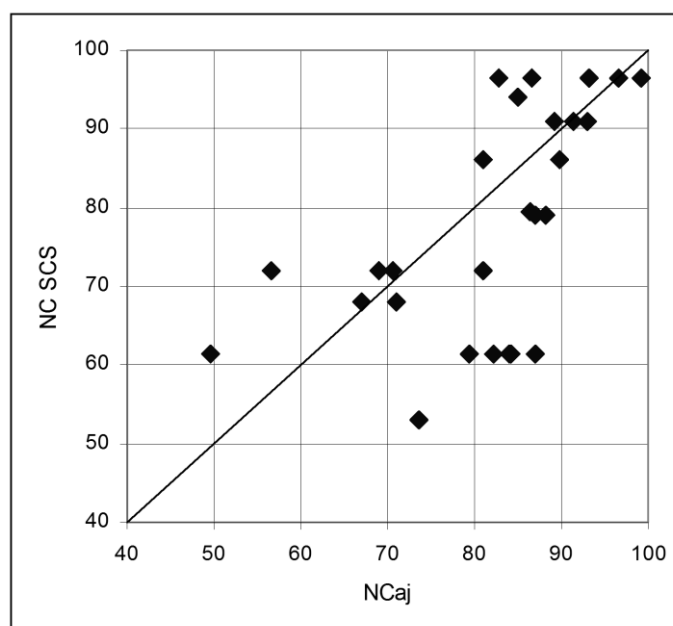


Figura III.2- Comparación entre el NCaj y el NC SCS mostrando la recta de ajuste ideal. La dispersión que se observa corresponde a un  $R^2$  de 0.37.

### Comparación de Lám Obs y estimada por el método NC SCS

La lámina de escurrimiento estimada por el método NC SCS (Lám SCS) se obtuvo a través del modelo Arhymo que utiliza el método del Número de Curva. El NC aplicado en cada caso es el determinado por las tablas del método (NC SCS). En la Tabla III.2 se muestra para cada fecha, el escurrimiento registrado para cada evento (Lám Obs) comparado con el determinado por el método del Número de Curva (Lám SCS).

Tabla III.2 - Comparación de los escurrimientos observados (Lám Obs) y los determinados por el método del Número de Curva del SCS (Lám SCS). Se muestra también el NCaj, NC SCS y AMC de cada evento.

Fecha	Lám Obs (mm)	Lám SCS (mm)	NCaj	NC SCS	AMC
1996 11 29	0,2	0,0	81,0	72,0	1
1996 12 02	1,8	4,0	81,0	86,0	2
1996 12 03	5,2	9,1	93,1	96,5	3
1996 12 04	23,4	42,9	86,5	96,5	3
1996 12 05	16,2	11,2	99,1	96,5	3
1996 12 06	12,9	12,8	96,5	96,5	3
1996 12 21	5,7	5,4	91,3	91,0	2
1997 11 10	4,1	4,9	70,5	72,0	1
1997 11 30	0,3	4,4	85,0	94,0	3
1997 12 09	10,4	3,7	88,2	79,0	1
1997 12 12	41,8	73,1	82,8	96,5	3
1998 02 17	0,5	0,0	71,0	68,0	1
1999 02 06	45,4	12,8	84,2	61,5	1
1999 04 25	0,3	5,1	50,0	61,5	1
2000 02 07	4,4	1,0	86,9	79,0	2
2000 03 06	27,5	7,8	79,4	61,5	1
2000 03 12	0,0	0,0	84,0	61,5	1
2000 11 28	0,0	9,3	56,6	72,0	1
2000 12 13	5,7	6,6	70,6	72,0	1
2000 12 29	5,2	6,7	89,2	91,0	2
2001 01 19	5,3	3,9	95,6	91,0	2
2001 01 28	4,7	0,4	86,9	61,5	1
2001 02 07	3,2	0,2	82,2	61,5	1
2001 03 04	4,1	6,1	69,0	72,0	2
2001 03 16	10,5	0,2	73,5	53,0	1
2001 03 18	10,9	7,3	89,8	86,0	3
2002 01 04	1,7	2,7	67,0	68,0	1
2003 01 21	4,8	1,5	86,4	79,5	1

El gráfico de la Figura III.3 muestra la Lám SCS obtenida por NC versus la observada.

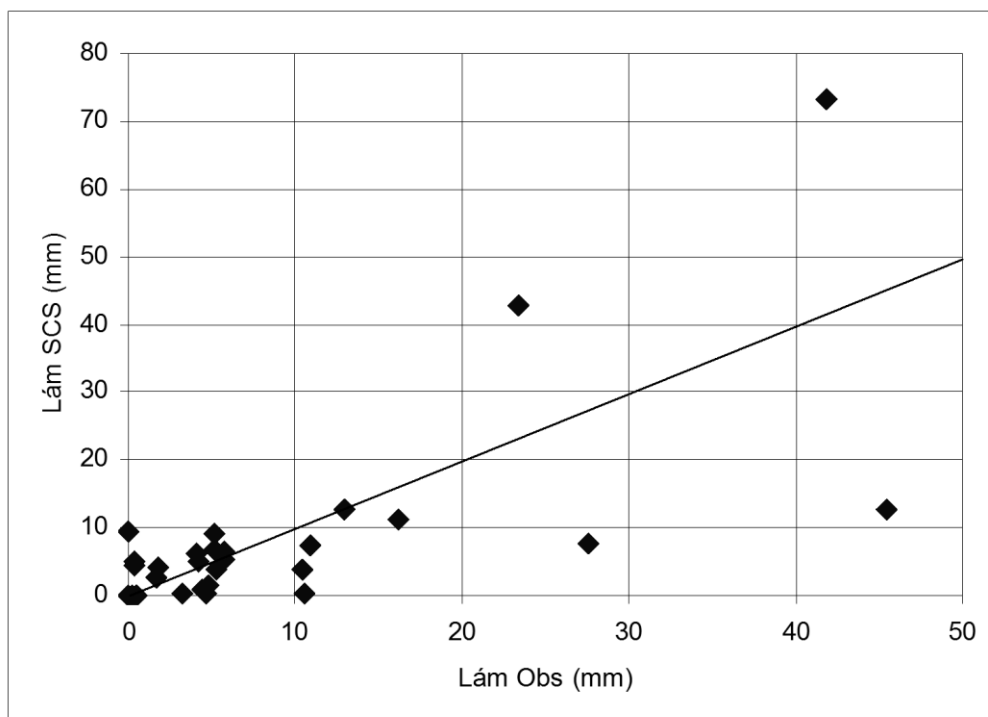


Figura III.3- Comparación de Lám Obs y Lám SCS, ambas en mm. Se grafica la línea de ajuste ideal.

Si bien existe una relación lineal positiva y significativa entre la lámina observada y la lámina predicha por el método SCS, el valor predictivo del método es, para este conjunto de datos, bajo. Mientras las láminas observadas fueron siempre menores a 50 mm, la lámina predicha superó los 70 mm.

Para este conjunto de pares de valores:

$$R^2 = 0.48$$

Puede comprobarse además que 14 eventos hubieran mejorado la estimación del escurrimiento si hubieran sido cambiados a otra condición de AMC. Entre los eventos a los que les corresponde AMC II y aquellos que mejorarían la estimación pasando a AMC II suman 18, es decir que sólo 10 están mejor como AMC I o como AMC III. Esto confirma la falta de adecuación de la condición de humedad antecedente del método NC SCS para la región. Por ende, se verificó que los valores de NC deducidos de las tablas originales no conducen a una representación adecuada de la lámina escurrida. Una conclusión preliminar en este sentido ya había sido expuesta con un número reducido de eventos analizados (Esmoriz et al, 2002a).

En los ensayos mencionados y por tratarse de una muestra reducida de eventos no fue posible precisar una tendencia definida en los desvíos producidos sobre los valores de NC y, consecuentemente, sobre la lámina escurrida. En los eventos de CG, una conclusión preliminar es que en AMC I la tendencia del método

es a subestimar el NC (10 a 4); en AMC II está equilibrado (2 a 3) y en AMC III podría pensarse que tiende a sobreestimar (4 a 2).

En vista del desempeño poco satisfactorio del método NC SCS para las presentes condiciones, se trabajó sobre tres líneas diferentes:

1. En primer lugar, se aplicó el procedimiento recomendado por el SCS para la determinación del NC de condición AMC II (NEH-4, Chapter 5.7). Esto es sólo a título ilustrativo, ya que no constituye un método para determinar el NC de un evento en particular, sino una condición promedio.
2. En segundo lugar, con las observaciones de los distintos eventos, se procuró determinar una ecuación para predecir lámina de escurrimiento, en forma totalmente separada del método del NC: Ecuaciones no relacionadas con el NC.
3. En tercer lugar, se trabajó en procura de mejorar la estimación del NC para las condiciones de la cuenca: Ecuación de regresión para el número de curva

#### **Procedimiento del SCS para la determinación del NC de condición AMC II**

El NEH-4 (NEH-4,1981; Silveira et al., 2000) en su capítulo 5, expresa que los datos de precipitación y escurrimientos máximos anuales constituyen el mejor medio para establecer los NC y esos NC son superiores a los determinados por otros métodos, puntualizando que este procedimiento es para la condición de humedad antecedente II.

El método consiste en graficar las precipitaciones y escurrimientos de recurrencia anual sobre la figura que en la publicación original aparece como Figura 10.1 y que aquí se presenta en la Figura III.4. El NC es aquél que divide al gráfico en dos partes de igual número de puntos. Puede ser necesario interpolar entre dos curvas. El NC así seleccionado es el NC que mejor representa la condición promedio de la cuenca.

Para ello se consideró la lluvia diaria con período de retorno de un año, que se presentara en la Tabla II.7 de la pág. 52. La lluvia con período de retorno (TR) de un año es de 48 mm.

Los eventos cuya lámina de precipitación fuera igual o mayor a 48 mm se representaron sobre el gráfico del método original del NC SCS de la Figura III.4 que para mayor claridad se reproduce en la Figura III.5 en unidades métricas.

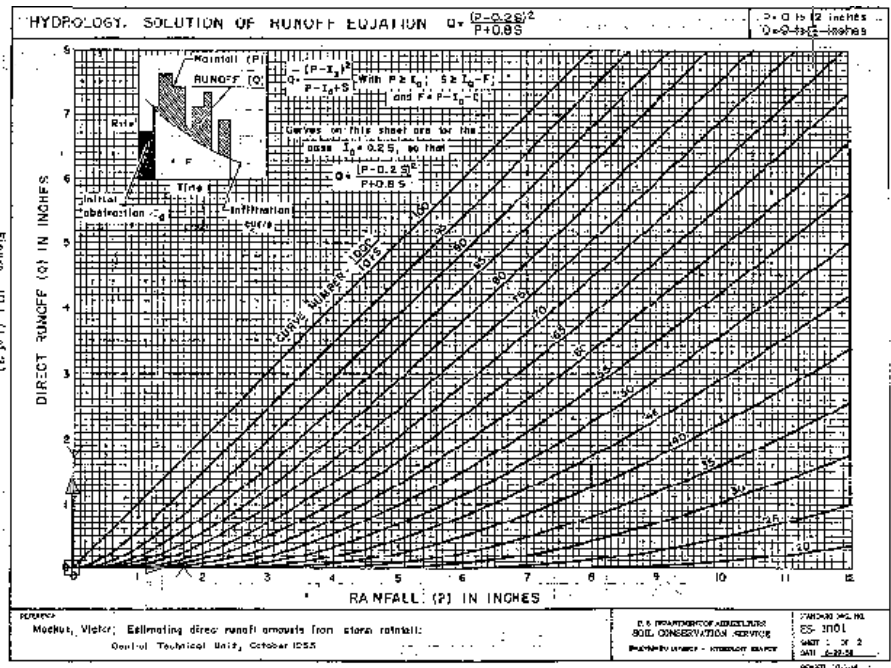


Figura III.4- Gráfico original de NC del SCS

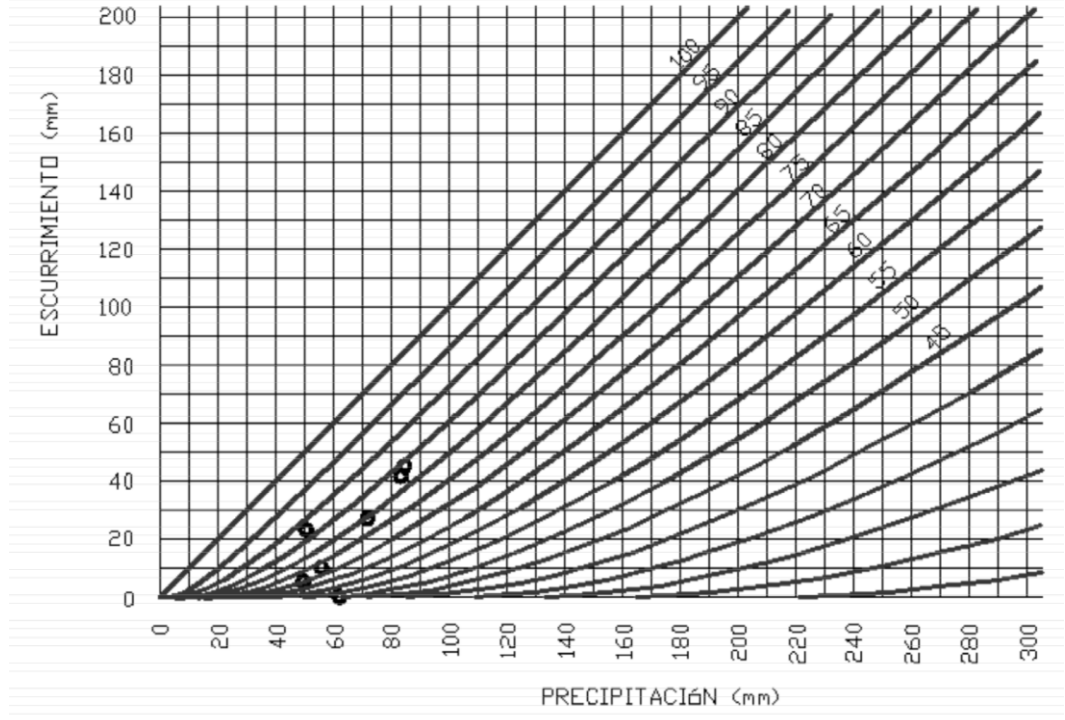


Figura III.5- Reproducción del gráfico de NC del SCS con los datos de precipitación y caudal con período de retorno de un año en la microcuenca.

El número de años es bajo, aunque sin embargo el número de eventos presentados en el ejemplo del NEH-4 (NEH-4.1981) es de 13, lo que no aparece como una serie tan larga desde el punto de vista estadístico. Se observa que por

ajuste visual, el NC para la condición II sería igual a 80. Si se efectúa el cálculo de la mediana, ese valor es NC AMC II=79.

Los NC para las condiciones AMC I y AMC III podrían obtenerse ordenando por separado los pares de valores PP y Lám y considerando el 10% superior e inferior (Chagas et al., 2006) pero el escaso número de valores desacredita esa metodología para el presente caso.

Tomando los valores de tablas del SCS, se tendría NC I=61.5 y NC III=90.5

### **Ecuaciones no relacionadas con el método del NC**

Este algoritmo se trabajó en forma independiente del método del Número de Curva.

Los pasos seguidos fueron:

1. Determinar una expresión que mejore la estimación del escurrimiento (Lám) con respecto al método del NC SCS., para lo cual se cuenta con registros con suficiente grado de detalle de los eventos ocurridos.
2. Obtener un algoritmo que mejore la valoración de la influencia de la humedad antecedente del suelo en la estimación del escurrimiento (Índice de Precipitación: IPP).

Estas dos primeras ecuaciones se procuraron trabajando en forma simultánea con regresiones lineales sobre los datos observados de 28 eventos ocurridos durante 8 años.

El uso de la regresión lineal para predicción de escurrimientos en arroyos, fue tratado por Garen (1992), quien recomendaba:

- Basar el modelo de regresión sólo en datos conocidos al momento de la predicción, es decir no usar datos posibles de ocurrir en el futuro.
- El uso de los componentes principales como variables independientes.
- Validación cruzada.
- Una búsqueda sistemática para lograr una combinación óptima o casi óptima de las variables.

El análisis de componentes principales es una técnica estadística que reestructura un conjunto de variables correlacionadas en un número igual de variables no relacionadas. Cada nueva variable (componente principal) es una combinación lineal diferente de las variables originales.

El análisis de componentes principales trata de encontrar, con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variables (componentes principales)



no correlacionadas que expliquen la estructura de variación en las observaciones de una tabla de datos (InfoStat 2002).

Cada componente principal explica un cierto porcentaje de la variación total. Los componentes principales están usualmente ordenados en orden de monto decreciente de explicación de la variación. Típicamente, la mayoría de la variación es explicada por pocas de las primeras componentes.

Para predicción, los componentes principales, calculados del conjunto de variables predictoras disponible, pueden ser usados como variables independientes en la ecuación de regresión. El número de componentes retenido en la ecuación depende de cuántos de ellos tengan coeficientes de la regresión estadísticamente significativos.

### **Ecuación de regresión para lámina de escurrimiento (Lám)**

Como primer paso de esta etapa se procuró estimar la lámina de escurrimiento (Lám). Para ello se estableció un algoritmo de regresión múltiple en función de la precipitación (PP), cobertura (COB), precipitación máxima en una hora (P1h) e índice de precipitación (IPP) (ver Ec III.1).

Resulta interesante mencionar aquí que Chagas et al (1998) y Chagas et al. (2000) utilizaron para el cálculo del escurrimiento, además de la lluvia del evento actual y de los anteriores, la energía cinética de la precipitación. Esa metodología, aunque escapa a los objetivos del presente trabajo, puede constituir un futuro tema de investigación local, habida cuenta de que se dispone de los registros necesarios.

La PP se tomó en todos los casos como lámina precipitada total del evento. Para estimar cobertura se siguieron criterios expuestos por Esmoriz en Sereno et al (1997) y estimación visual (Auerswald and Haider, 1996). Con la COB se intentaron correlaciones separando intervalos de clase según diversos criterios lógicos, pero los resultados no fueron satisfactorios ya que el  $R^2$  era muy bajo y la variable no significativa. Se obtuvieron sí, valores de regresión altos y significativos, utilizando a la COB como variable de clasificación, con valor 0 o 1. Los resultados indicaron que el límite entre estos dos valores correspondía a una cobertura de aproximadamente el 20 %. Es de destacar que este porcentaje es el que indica el método del NC SCS como umbral entre una cobertura buena y una pobre.

$$Lam = a + b \cdot PP + c \cdot PP^2 + d \cdot COB \cdot PP + e \cdot Plh + f \cdot IPP \quad Ec 0.1$$

Donde a, b, c, d, e y f son coeficientes obtenidos en la regresión, cuyos valores se aprecian en la segunda columna de la Tabla III.4.

### **Ecuación de regresión para determinar un Índice de Precipitación (IPP)**

IPP – segundo paso planteado bajo el título “Ecuaciones no relacionadas con el método del NC”- es un índice de precipitación que toma en cuenta las precipitaciones del evento (día cero) y anteriores (humedad antecedente) y que

interviene como último término en la Ec III.1 de pág.89. Para su estimación se siguió un criterio similar al de Bruce y Clark (1966) que propusieron un Índice de Precipitación Antecedente al que llamaron API (Antecedent Precipitation Index), de la forma:

$$API_0 = kP_1 + k^2P_2 + \dots + k^n P_n \quad \text{Ec 0.2}$$

Donde  $API_0$  es el Índice de Precipitación Antecedente para el día cero;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  son las precipitaciones de 1,2,...n días anteriores y  $k$  es menor que 1.

Perrone y Madramootoo (1998) correlacionaron el API con los NC del SCS según la siguiente expresión:

$$NC = a(b - e^{-cxAPI}) \quad \text{Ec 0.3}$$

En donde  $a, b, c$  son constantes y  $e$  es la base de los logaritmos neperianos.

La expresión desarrollada por Perrone y Madramootoo, citada en el párrafo anterior y que resultara adecuada en regiones húmedas de Québec (Canadá), fue probada con los datos locales, pero el ajuste no resultó satisfactorio, como puede observarse en la Tabla III.3. En ella se aplicaron las ecuaciones III.2 y III.3 para 5 eventos tomados al azar (columna 1). En las columnas 2 y 3 se muestra la precipitación ocurrida y el escurrimiento observado. La columna 4 presenta el valor del API, y en la columna 5 la determinación de la lámina escurrida con el API correspondiente y a través del NC.

Tabla III.3 - Determinación del NC y Lám con el índice API

1	2	3	4	5
fecha	PP (mm)	Lám Obs (mm)	API (mm)	Lám det. c/API (mm)
09/12/1997	32	10	11,6	1
06/03/2000	72	28	7,7	12
29/12/2000	22,2	5	22,97	1
07/02/2001	26,8	3	6,2	0
04/03/2001	47,6	4	29,96	14

Comparando el escurrimiento determinado a través del API con el observado (columnas 5 y 3), el Coeficiente de Determinación resulta:

$$R^2 = 0.21$$

No obstante, se considera que el método puede mejorar sensiblemente sus resultados toda vez que las constantes de la Ec III.3, así como  $k$  y  $n$  de la Ec III.2 sean ajustados para las condiciones locales, tarea esta que puede constituir una futura línea de investigación.

Apartándose de la línea del API, en su lugar, se configuró un modelo de la siguiente forma:

$$IPP = k \cdot PP_0 + k^2 \cdot PP_1 + k^3 \cdot PP_2 + \dots + k^{n+1} \cdot PP_n \quad \text{Ec 0.4}$$

Donde:

IPP: Índice de precipitación del día del evento.

k: constante ( $k < 1$ )

$PP_0$ : Precipitación del evento

$PP_1, PP_2, \dots, PP_n$ : precipitación de los días 1,2,...n anteriores al evento.

Esta ecuación se obtuvo por análisis de regresión utilizando *Lám Obs* como variable dependiente y como regresoras *PP*, cobertura del suelo (*COB*), precipitación por cobertura (*PP\*COB*), precipitación máxima en una hora (*P1h*) y sucesivamente diferentes Índices de Precipitación (*IPP*) utilizando diferentes valores de *k*.

A diferencia de la ecuación III.2, en ésta se incluye en el primer término del segundo miembro la precipitación del evento considerado ( $PP_0$ ). Además, en la ecuación III.2 de Bruce y Clark, se consideran las lluvias de los 14 días anteriores, en tanto que para la ecuación III.4 el valor de *n* llega hasta 5.

Aunque todos los valores de *k* entre 0.3 y 0.8 tuvieron un comportamiento aceptable, se eligió  $k = 0.4$  por optimizarse con este valor la regresión. El valor de *n* se tomó hasta 30 días anteriores al evento considerado, pero los resultados no justificaron la extensión del cálculo y se concluyó en un número de cinco días anteriores, igual que en el método del SCS. La ecuación resultó entonces:

$$IPP = 0,4 \cdot PP_0 + 0,4^2 \cdot PP_1 + 0,4^3 \cdot PP_2 + 0,4^4 \cdot PP_3 + 0,4^5 \cdot PP_4 + 0,4^6 \cdot PP_5 \quad \text{Ec 0.5}$$

Y consecuentemente, la Ec III.1 para *Lám* queda:

$$Lám = 6.14 - 1.19 \cdot PP + 0.01 \cdot PP^2 - 0.20 \cdot COB \cdot PP + 0.34 \cdot P1h + 1.30 \cdot IPP \quad \text{Ec 0.6}$$

### Comparación de *Lám Obs* con *Lám* de la regresión

Para los 28 eventos considerados, la regresión para *Lám Obs* con las cinco variables regresoras usadas en la Ec. III.1 de la pág. 89 tuvo un  $R^2 = 0.93$  con un nivel de significación de todas las variables  $p < 0.001$  (Tabla III.4). En esta tabla, el hecho de que haya coeficientes negativos, se debe a que esos coeficientes corresponden a una variable que interviene en más de un término, lo que implica comportamientos compensatorios.

En la Figura III.6 se observa la correlación entre Lám Obs y lámina estimada (PRED Lám). Es de hacer notar que los cinco términos de la Ecuación III.1 son derivados de dos variables: PP y COB. Esto condice con la finalidad expresada en pág17 de que los parámetros se determinen en función de datos fácilmente accesibles.

Tabla III.4 - Regresión lineal de Lám. La variable dependiente es Lám Obs; la columna Est. muestra los coeficientes de cada término (valor estimado); EE es el error estándar de la estimación; LI y LS son los límites del intervalo de confianza al 95% y p-valor el grado de significación. El  $R^2$  es de 0.93.

Análisis de regresión lineal					
Variable	N	R <sup>2</sup>			
Lám Obs	28	0,93			
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados					
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	p-valor
const	6,14	3,18	-0,46	12,74	0,0668
PP	-1,19	0,18	-1,57	-0,81	<0.0001
PP <sup>2</sup>	0,01	0,00	0,01	0,02	<0.0001
COB*PP	-0,20	0,04	-0,29	-0,11	0,0001
P1h	0,34	0,06	0,21	0,48	<0.0001
IPP	1,30	0,27	0,74	1,85	0,0001

La Tabla III.5 presenta para cada evento y en diferentes columnas:

1. Fecha del evento (columna 1).
2. Precipitación (columna 2).
3. Lámina de escurrimiento observada (Lám Obs; columna 3). Esta lámina está tomada de los registros limnigráficos.
4. Lámina determinada por el método NC SCS (Lám SCS; columna 4). Estos valores se determinaron con las tablas del método.
5. Lámina predicha por la regresión (PRED Lám; columna 5). Valores obtenidos con la aplicación de la Ec III.6.
6. Lámina predicha por la regresión por el método Jack Knife (PJack Lám; columna 6).

Todas las láminas están expresadas en mm. El gráfico de la Figura III.6 compara las columnas 3 (Lám Obs) y 5 (PRED Lám) de esta tabla, y el de la Figura III.7 compara las columnas 3 y 6 (PJack Lám).

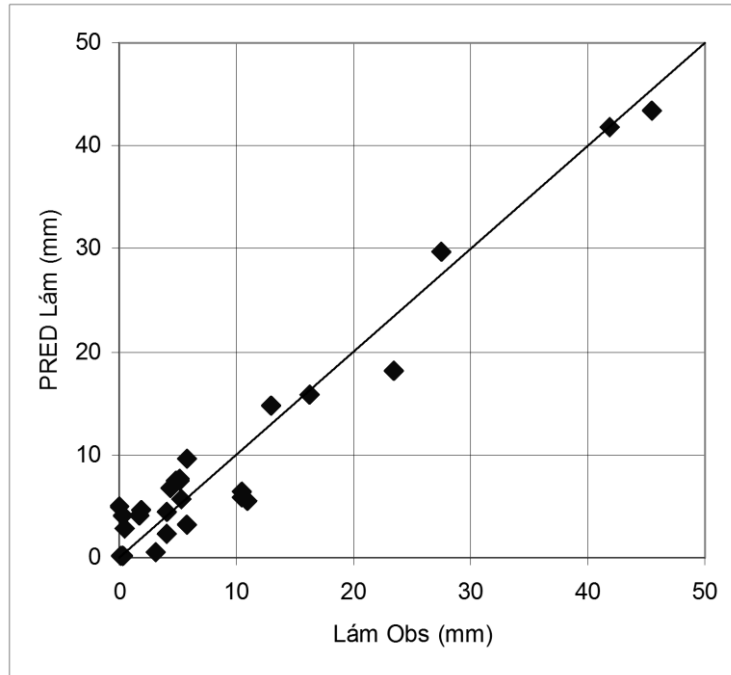


Figura III.6- Predicción de la lámina de escurrimiento, mostrando la recta de ajuste ideal.

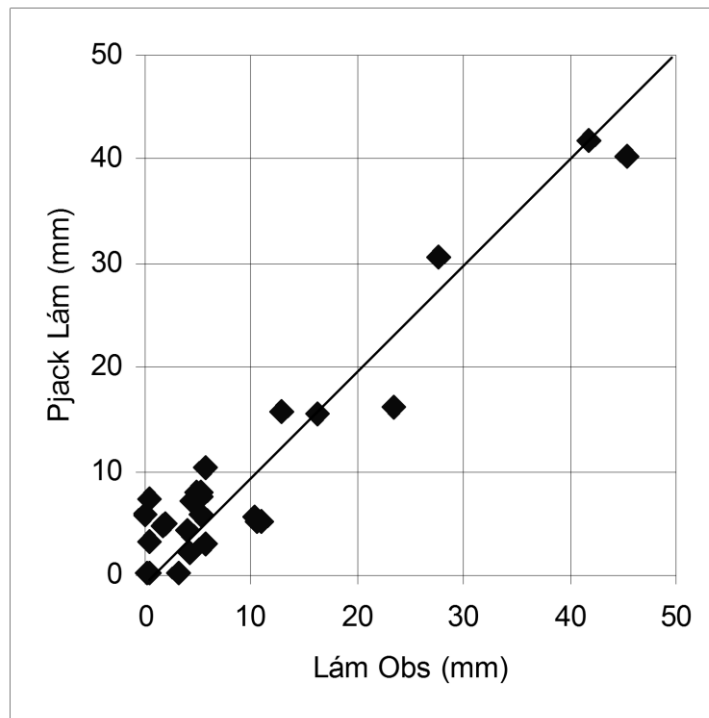


Figura III.7- Predicción de la lámina de escurrimiento por el método Jack Knife, mostrando la recta de ajuste ideal.

Tabla III.5 - Determinación de Lám por el modelo de regresión. Los valores negativos fueron reemplazados con cero. En la última fila figuran los Coeficientes de Determinación para las columnas 4, 5 y 6.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Fecha	PP (mm)	Lám Obs	Lám SCS	PRED Lám	PJack Lám
1996 11 29	17.8	0.2	0.0	0.1	0.1
1996 12 02	24.0	1.8	4.0	4.6	5.0
1996 12 03	17.0	5.2	9.1	7.4	7.6
1996 12 04	50.6	23.4	42.9	18.2	16.2
1996 12 05	19.0	16.2	11.2	15.9	15.6
1996 12 06	21.2	12.9	12.8	14.8	15.7
1996 12 21	20.2	5.7	5.4	3.2	3.0
1997 11 10	45.2	4.1	4.9	2.3	2.1
1997 11 30	14.6	0.3	4.4	0.2	0.2
1997 12 09	32.0	10.4	3.7	6.5	5.5
1997 12 12	83.2	41.8	73.1	41.8	41.7
1998 02 17	30.0	0.5	0.0	2.8	3.2
1999 02 06	84.6	45.4	12.8	43.4	40.2
1999 04 25	62.4	0.3	5.1	4.1	7.3
2000 02 07	23.5	4.4	1.0	6.8	7.1
2000 03 06	72.0	27.5	7.8	29.7	30.7
2000 03 12	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0
2000 11 28	47.4	0.0	9.3	5.0	5.7
2000 12 13	49.6	5.7	6.6	9.6	10.3
2000 12 29	22.2	5.2	6.7	7.7	7.9
2001 01 19	17.5	5.3	3.9	5.8	5.9
2001 01 28	24.2	4.7	0.4	0.0	0.0
2001 02 07	26.8	3.2	0.2	0.5	0.3
2001 03 04	47.6	4.1	6.1	4.4	4.4
2001 03 16	55.8	10.5	0.2	6.0	5.1
2001 03 18	30.2	10.9	7.3	5.6	5.1
2002 01 04	43.4	1.7	2.7	4.0	4.7
2003 01 21	25.0	4.8	1.5	7.6	7.9
R <sup>2</sup>			0.45	0.94	0.90

La última fila muestra que el R<sup>2</sup> de las láminas de escurrimiento determinadas por regresión es alto, tanto para la muestra completa (los 28 eventos) como para el método Jack Knife.

## Prueba de IPP como única variable regresora

El hecho de que en el IPP las lluvias anteriores a cinco días del evento considerado tuvieran escasa significación, dio lugar a la especulación de que su comportamiento predictivo tuviera distinto peso para la condición de suelo seco que para suelo húmedo.

Consecuentemente, se separaron las pruebas estadísticas por grupo de AMC según el criterio del SCS. Se presenta en la Tabla III.6 el análisis de la regresión para la lámina de escurrimiento observada, con IPP como única regresora, para la condición AMC III. Se observa que el valor de  $R^2$  es de 0.99, el valor de p es altamente significativo y CpMallows es elevado. Debe considerarse que la lámina observada (Lám Obs) es el dato registrado indirectamente en el campo por el limnógrafo. La determinación estadística de esta variable (predicción) pasa a llamarse PRED Lám.

Tabla III.6 - Análisis de la regresión de Lám para los 7 eventos de condición AMC III. Se observa que el  $R^2$  es de 0.99.

Análisis de regresión lineal AMC III						
Variable	N	R <sup>2</sup>	ECMP			
Lám Obs	7	0.99	5			
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados						
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	p-valor	CpMallows
const	-10.98	1.27	-14.24	-7.72	0.0003	
IPP	1.43	0.06	1.27	1.58	<0.0001	456.03

Resulta entonces la siguiente ecuación:

$$Lám = -10.98 + 1.43IPP \quad \text{Ec 0.7}$$

La Tabla III.7 presenta para cada uno de los 7 eventos ocurridos en condición húmeda según el criterio del método NC SCS y en diferentes columnas:

Fecha del evento (columna 1)

Precipitación (columna 2).

Lámina de escurrimiento observada (columna 3).

Predicción de Lám, con IPP como única variable regresora (columna 4).

Predicción de Lám, con IPP como única variable regresora pero por el método Jack Knife (columna 5).

Tabla III.7- Eventos ocurridos en condición AMC III y las láminas determinadas por regresión con IPP como única variable regresora.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fecha	PP	Lám Obs	PRED Lám	Pjack Lám
1996 12 03	17	5,2	4,45	4,18
1996 12 04	50,6	23,4	24,86	25,26
1996 12 05	19	16,2	14,64	14,38
1996 12 06	21,2	12,9	14,77	15,09
1997 11 30	14,6	0,3	0,00	0,00
1997 12 12	83,2	41,8	40,74	38,24
2001 03 18	30,2	10,9	11,36	11,45
$R^2$			0.99	0.98

La última fila de la tabla muestra que los coeficientes  $R^2$  para las dos columnas de predicción del escurrimiento en condición de suelo húmedo y con IPP como única variable regresora, son elevados.

En la Figura III.8 se presenta la correlación entre la lámina de escurrimiento observada y la determinada por regresión para las condiciones enunciadas.

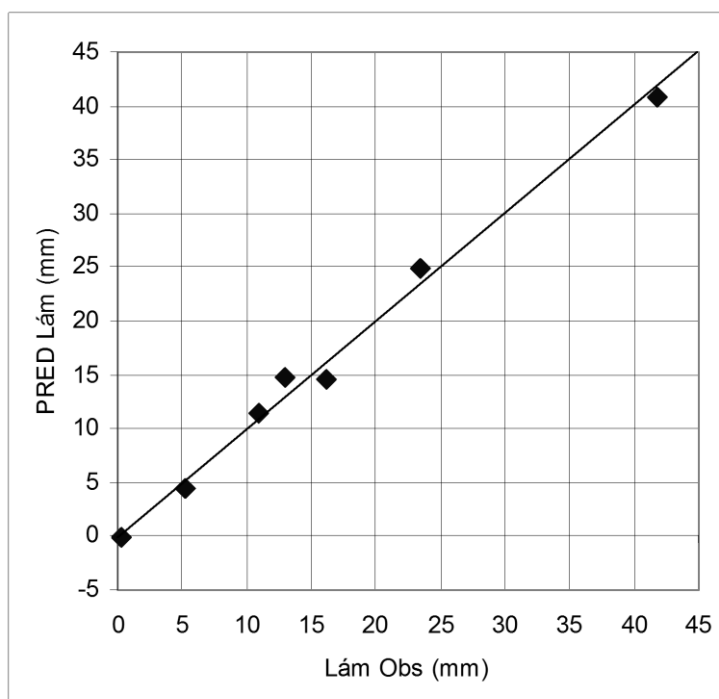


Figura III.8- Predicción de Lam por IPP para los 7 eventos de condición AMC III.  $R^2 = 0.99$ .



La misma predicción de Lám por IPP pero con el método Jack Knife, arrojó el resultado que se muestra en la Figura III.9:

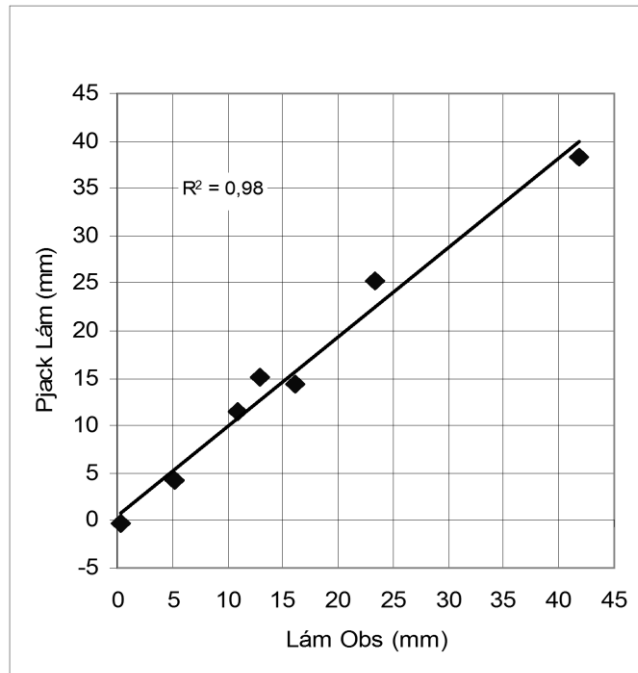


Figura III.9- Predicción de Lám por IPP para los 7 eventos de condición AMC III. Método de Jack Knife. Se muestra la línea de tendencia..

La predicción con IPP como única variable regresora resultó poco satisfactoria para las condiciones AMC I y AMC II. La Figura III.10 muestra la relación de la Lám Obs con el IPP para estas condiciones.

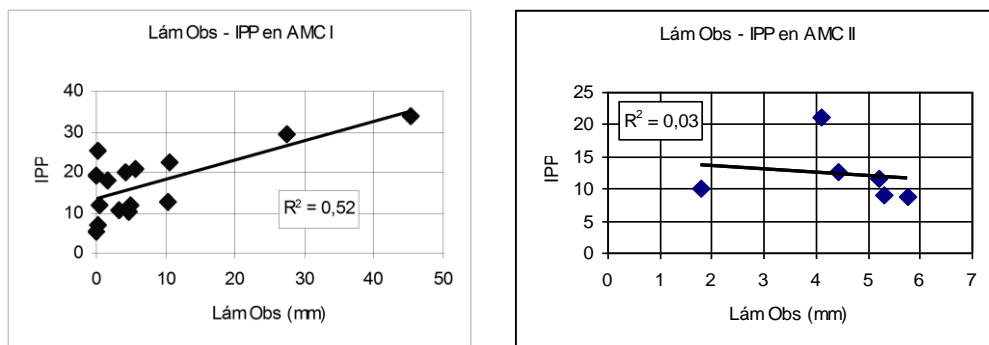


Figura III.10- La predicción del escurrimiento por el IPP no resultó satisfactoria para las condiciones AMC I y AMC II.

Estos resultados aparecen como lógicos, por la importante influencia que tienen las lluvias anteriores en el valor del IPP y debido a que en el caso de AMC I y

AMC II no se puede esperar influencia de precipitaciones anteriores que no ocurrieron o fueron escasas.

### **Ecuación de regresión para el número de curva**

El este punto se trabajó con ecuaciones de regresión **volviendo nuevamente sobre el modelo de NC**. Se procuró determinar una expresión de NC que ajuste mejor los cálculos de escurrimiento para las condiciones de la cuenca.

### **Determinación del modelo de regresión para la variable NCaj**

Se utilizaron los mismos 28 eventos que produjeron escurrimiento registrados en la microcuenca.

Si bien la ecuación fundamental del SCS está referida a la lámina de escurrimiento, algunos autores (Schneider y McCuen, 2005) creen que puede ser conveniente desarrollar una nueva tabla de Números de Curva basada en la medición de los caudales máximos más que en la lámina de escurrimiento, No obstante, aquí se trabajó con láminas de escurrimiento, ya que a igualdad de precipitación, suelos, uso y manejo, dos cuencas pueden diferir en características tales como área, forma, pendiente, etc. lo que redundará en diferentes caudales máximos (Tucci, 1993 ; Remenieras, 1974; Hudson, 1982).

En la ecuación de regresión, NCaj se usó como variable dependiente y como regresoras las mismas ya citadas. **A la predicción de la variable dependiente se la llamó Número de Curva de la regresión (NCr):**

$$NCr = a + b * PP + c * PP^2 + d * COB * PP + e * P1h + f * IPP$$

Ec 0.8

Donde a, b, c, d, e y f son coeficientes obtenidos en la regresión.

Los parámetros estadísticos se muestran en la Tabla III.8.

Tabla III.8 - Estadística de la regresión lineal del NC

Análisis de regresión lineal					
Variable	N				
CNaj	28				
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados					
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	p-valor
const	101,11	5,24	90,24	111,98	<0,0001
PP (mm)	-2,00	0,30	-2,62	-1,38	<0,0001
PP^2	0,01	2,60E-03	0,01	0,02	0,0002
COB*PP	-0,24	0,07	-0,38	-0,09	0,0026
P1h (mm)	0,45	0,11	0,23	0,67	0,0003
IPP (mm)	1,57	0,44	0,66	2,49	0,0017

De este modo la ecuación queda:

$$NCr = 101,11 - 2 \cdot PP + 0,01 \cdot PP^2 - 0,24 \cdot COB \cdot PP + 0,45 \cdot P1h + 1,57 \cdot IPP \quad Ec 0.9$$

La Figura III.11 muestra el NC así calculado (NCr) para los 28 eventos, contrastado con el NC ajustado por lluvia y escurrimiento (Ncaj).

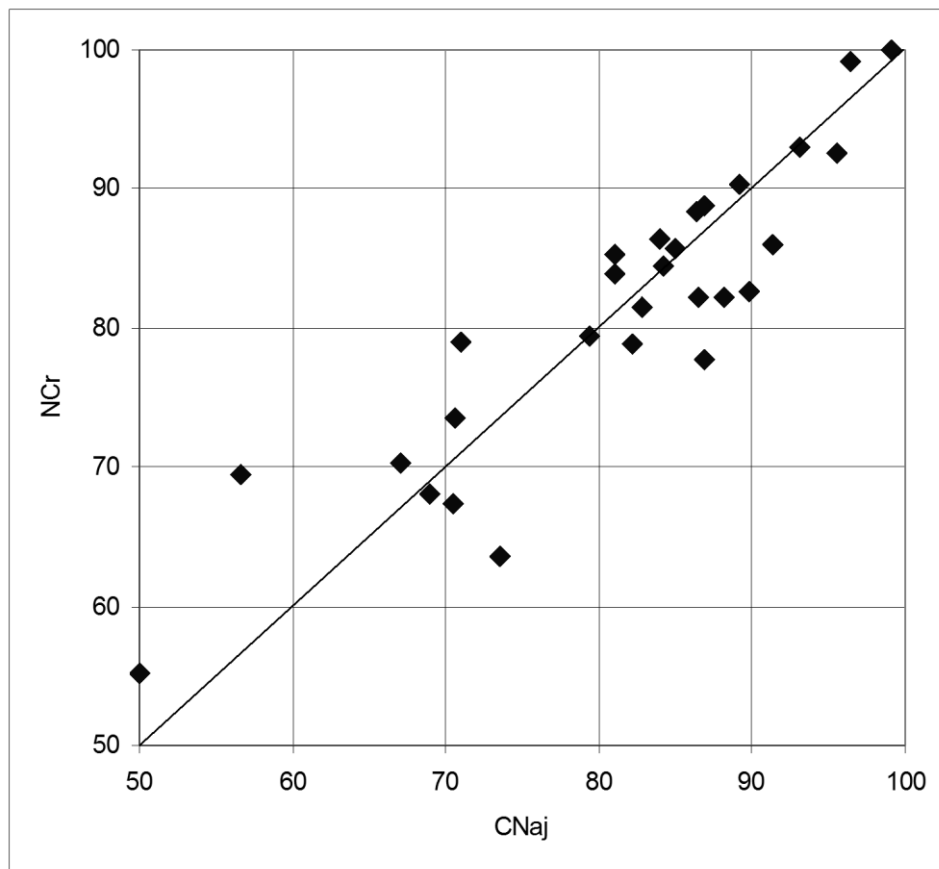


Figura III.11- Predicción de NC calculada por regresión (NCr) mostrando la línea de ajuste ideal

En la Tabla III.9 se muestran los 28 eventos y los NC ajustado, de tablas y de la regresión.

Tabla III.9 - Número de Curva ajustado (NCaj); NC de tablas (NC SCS), NC calculado con la ecuación de regresión (NCr) y por el método Jack Knife ((NCr (JK)). Los valores de PP y Lám Obs están en mm.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Fecha	PP	Lám Obs	NCaj	NC SCS	NCr	NCr (JK)
1996 11 29	17,8	0,2	81,0	72,0	83,9	84,3
1996 12 02	24,0	1,8	81,0	86,0	85,3	85,8
1996 12 03	17,0	5,2	93,1	96,5	93,0	93,0
1996 12 04	50,6	23,4	86,5	96,5	82,1	80,4
1996 12 05	19,0	16,2	99,1	96,5	100,0	100,0
1996 12 06	21,2	12,9	96,5	96,5	99,3	100,0
1996 12 21	20,2	5,7	91,3	91,0	85,9	85,3
1997 11 10	45,2	4,1	70,5	72,0	67,4	66,9
1997 11 30	14,6	0,3	85,0	94,0	85,7	85,9
1997 12 09	32,0	10,4	88,2	79,0	82,1	80,7
1997 12 12	83,2	41,8	82,8	96,5	81,3	77,1
1998 02 17	30,0	0,5	71,0	68,0	78,8	80,0
1999 02 06	84,6	45,4	84,2	61,5	84,6	85,2
1999 04 25	62,4	0,3	49,5	61,5	55,1	59,7
2000 02 07	23,5	4,4	86,9	79,0	88,8	89,0
2000 03 06	72,0	27,5	79,4	61,5	79,5	79,6
2000 03 12	12,8	0,0	84,0	61,5	86,4	87,2
2000 11 28	47,4	0,0	56,6	72,0	69,4	71,2
2000 12 13	49,6	5,7	70,6	72,0	73,5	74,0
2000 12 29	22,2	5,2	89,2	91,0	90,2	90,3
2001 01 19	17,5	5,3	95,6	91,0	89,5	89,2
2001 01 28	24,2	4,7	86,9	61,5	77,7	76,9
2001 02 07	26,8	3,2	82,2	61,5	78,8	78,5
2001 03 04	47,6	4,1	69,0	72,0	68,1	67,9
2001 03 16	55,8	10,5	73,5	53,0	63,5	61,7
2001 03 18	30,2	10,9	89,8	86,0	82,6	81,9
2002 01 04	43,4	1,7	65,7	68,0	70,0	71,3
2003 01 21	25,0	4,8	86,4	79,5	88,3	88,5
				0.06	0.81	0.72

Los Coeficiente de Determinación figuran en la última fila, para cada una de las últimas 3 columnas, considerando a la columna NCaj como valores de referencia. Así, el Coef. de Determinación del NC SCS (col. 5) con respecto al NCaj (col 4) es de 0.06; el Coef. de Determinación del NCr (col. 6) con respecto al NCaj (col. 4) es de 0.81 y el del NCr (JK) es de 0.72.

Estos coeficientes ponen de relieve la falta de ajuste de los Números de Curva determinados por las tablas del SCS. El Coef. de Det. para NCr es

considerablemente elevado ( $R^2=0.81$ ), pero al intervenir todos los eventos de la muestra en la determinación de NCr, no tiene posibilidad de validación.

El Coeficiente de Determinación para NCr (JK) es de menor valor, lo que se explica porque el número de eventos de la muestra es reducido.

La gran variación entre NC que se observa en la tabla, es debida a que son NC correspondientes a eventos de PP – esorrentía de muy diversas intensidades. NC de valores extremos, como los que corresponden a los eventos del 5 y 6 de Diciembre de 1996, se explican porque hubo lluvias en forma ininterrumpida desde el día 2 de Diciembre, con lo cual al estar el suelo saturado de humedad, gran parte de la lluvia se transformó en escurrimiento.

Por el contrario, fechas como el 25 de Abril de 1999, presentan NC muy bajos, debido a las condiciones de la cuenca, que provocaron la infiltración de casi toda la lámina de lluvia ocurrida.

Debe diferenciarse esta aplicación del NC en procesos de simulación con lluvias de intensidad, duración y frecuencia muy variables, de su uso en proyectos, cuando las precipitaciones consideradas son tormentas de proyecto, y por lo tanto con intensidades elevadas y con períodos de retorno prolongados, frecuentemente de 10 años o más.

El siguiente paso fue utilizar los NC así determinados para calcular el escurrimiento.

### **Determinación con Arhymo de la lámina y caudales de escurrimiento con los NC calculados en la regresión**

Con el objeto de evaluar el comportamiento de los NC determinados por regresión, se determinaron los escurrimientos calculados corriendo el programa Arhymo de dos formas para cada uno de los 28 eventos:

1. Con NCr
2. Con NCr (JK)

Aplicando la Ecuación III:9 de pág. 99 a los datos observados, se obtuvieron los Números de Curva (NCr), y corriendo el modelo Arhymo para cada evento se obtuvo la lámina de escurrimiento Lám NCr (ver Tabla III.10 y Figura III.12). De la misma forma, se corrió el modelo Arhymo para cada evento utilizando el NC determinado por regresión y con el método Jack Knife. Estos resultados figuran en la columna (5) de la Tabla III.10 y en la Figura III.13.

Ecuación (III.9)                       $\longrightarrow$       NCr                       $\longrightarrow$       Arhymo                       $\longrightarrow$       Lám NCr

Tabla III.10 - Láminas de escurrimiento observada (Lám Obs) en col. 3, Lám determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión (Lám NCr en col. 4) y Lám determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife (Lám NCr (JK)) en col. 5.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fecha	PP (mm)	Lám Obs	Lám NCr	Lám NCr (JK)
1996 11 29	17,8	0,2	0,9	1,1
1996 12 02	24,0	1,8	3,6	3,6
1996 12 03	17,0	5,2	5,1	4,4
1996 12 04	50,6	23,4	17,5	16,5
1996 12 05	19,0	16,2	18,7	18,7
1996 12 06	21,2	12,9	18,7	20,9
1996 12 21	20,2	5,7	2,4	1,8
1997 11 10	45,2	4,1	2,7	2,4
1997 11 30	14,6	0,3	0,5	0,5
1997 12 09	32,0	10,4	5,4	4,4
1997 12 12	83,2	41,8	39,1	63,2
1998 02 17	30,0	0,5	2,8	3,2
1999 02 06	84,6	45,4	46,4	37,7
1999 04 25	62,4	0,3	3,7	3,9
2000 02 07	23,5	4,4	5,7	7,3
2000 03 06	72,0	27,5	27,8	27,2
2000 03 12	12,8	0,0	0,2	1,0
2000 11 28	47,4	0,0	4,2	6,1
2000 12 13	49,6	5,7	7,6	9,2
2000 12 29	22,2	5,2	6,0	5,7
2001 01 19	17,5	5,3	2,7	2,1
2001 01 28	24,2	4,7	0,8	0,7
2001 02 07	26,8	3,2	1,8	2,0
2001 03 04	47,6	4,1	3,6	3,9
2001 03 16	55,8	10,5	3,8	2,9
2001 03 18	30,2	10,9	4,9	4,9
2002 01 04	43,4	1,7	3,4	2,9
2003 01 21	25,0	4,8	6,1	6,0
$R^2$			0.93	0.89

Resultando los Coeficientes de Determinación:

Coeficiente de Determinación (Lám Obs; Lám NCr):  $R^2 = 0.93$

Coeficiente de Determinación (Lám Obs; Lám NCr (JK)):  $R^2 = 0.89$

La Figura III.12 y la Figura III.13 muestran una comparación gráfica de los datos de la Tabla III.10.

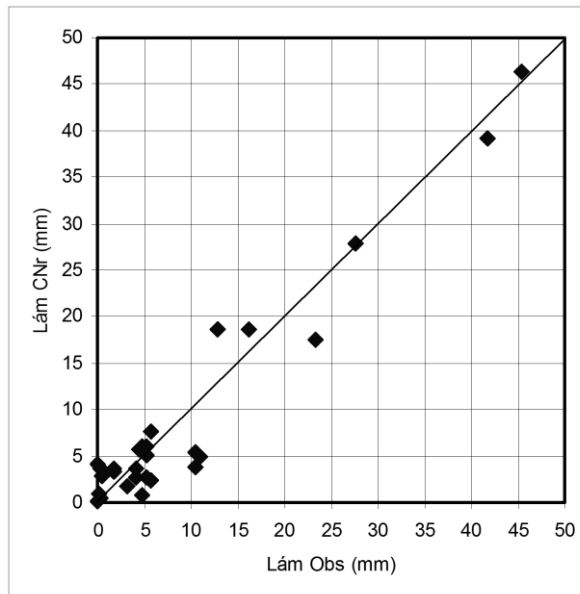


Figura III.12- Determinación de la lámina de escurrimiento calculada con NCr, mostrando la recta de ajuste ideal.

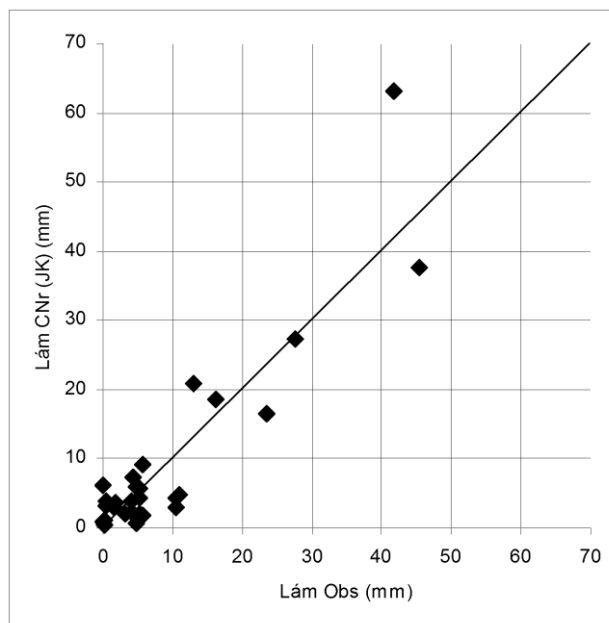


Figura III.13- Correlación entre la lámina de escurrimiento observada (Lám Obs) y la lámina determinada con Arhymo utilizando el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife (Lám CNr (JK))



Aquí también, como en el caso de los Número de Curva, la determinación de Lám con el NCr (JK) muestra un valor menor del coeficiente de determinación ( $R^2=0.83$ ), atribuible a la misma causa. Cuanto mayor es el tamaño de la muestra, se comprueba que la diferencia entre los  $R^2$  con y sin Jack Knife tiende a ser menor.

En la Figura III.14 se aprecian los hidrogramas observado y determinado con el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife para el evento ocurrido el 6 de Marzo de 2000.

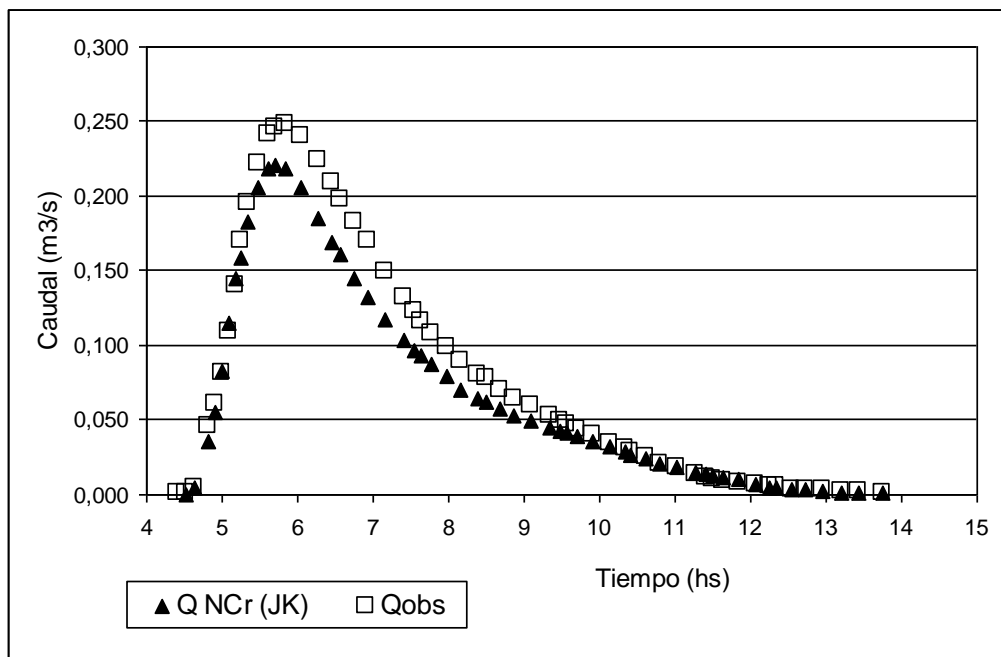


Figura III.14- Hidrogramas de fecha 6 Marzo de 2000. El  $R^2$  del hidrograma observado con respecto al calculado, para este caso particular, fue de 0.99.

## PARTE II. CUENCA GRANDE

### Evaluación del NC SCS en la cuenca grande

#### Comparación de Láminas Observada y estimada por el método NC SCS

Al igual que se hiciera en la microcuenca, en primer lugar se contrastó la lámina de escurrimiento observada contra la determinada por el método del NC SCS, es decir, corriendo el Arhymo con los NC sacados de las tablas publicadas por el SCS (USDA-SCS, 1972). Las láminas de escurrimiento observadas y las determinadas con el método NC SCS se presentan en la Tabla III.11.

Tabla III.11 - Comparación de Láminas Observada y Lám SCS (col 2 y 6). Se muestra también la precipitación, condición de humedad antecedente y NC del método del SCS (col. 3, 4 y 5).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Fecha	Lám Obs (mm)	PP (mm)	AMC	NC SCS	Lám SCS (mm)
06/01/97	0.6	71	I	56,74	5.40
26/01/97	0.1	53	I	56,70	0.50
10/11/97	0.0	51	I	57,10	1.90
09/12/97	0.0	33	I	58,10	0.10
12/12/97	0.8	95	III	88,32	65.6
30/12/97	0.2	35	I	56,40	0.10
01/12/99	0.2	59	I	54,65	2.90
01/12/99(2)	0.1	46	I	54,65	0.90
18/12/99	0.0	37	I	56,35	0.10
11/01/00	1.4	64	I	55,90	2.90
06/03/00	3.1	63	I	56,02	2.70
13/12/33	0.8	43	I	56,8	0.30

En el gráfico siguiente (Figura III.15) puede observarse que existe escasa correspondencia entre ambas. A fin de valorar las determinaciones con los datos, se utilizó el estadístico Coeficiente de Determinación.

Coef de Determinación (Lám Obs, Lám SCS):

$$R^2 = 0.01$$

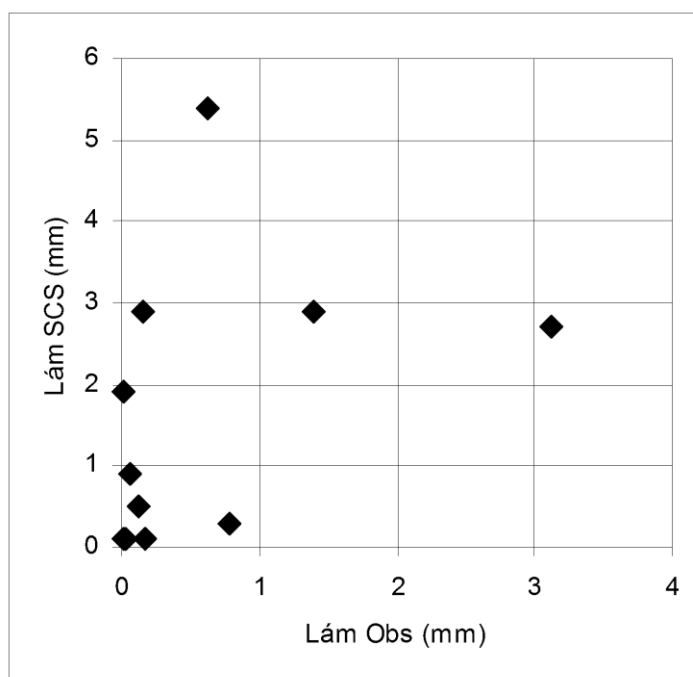


Figura III.15- Láminas observadas y determinadas por el método del NC SCS.

### Pruebas de regresión para lámina de escurrimiento (Lám)

Se utilizaron como variables regresoras precipitación (PP), lluvia máxima en una hora (P1h) e índice de precipitación (IPP), en conjunto, solas y en diferentes combinaciones, pero los resultados no fueron significativos y los coeficientes de determinación resultaron de valores muy bajos, se estima que debido a la corta duración de la precipitación neta con respecto al tiempo de concentración de la cuenca (Remenieras, 1974; Tucci, 1993; Chow et al, 1994).

### Comparación entre NC ajustado y NC de tablas

De la misma forma que para la microcuenca, se determinó para cada evento el NC que ajustara perfectamente la lluvia (PP) y el escurrimiento registrado (Lám), despejándolo en las ecuaciones II.9 y II.10 de pág. 71 ; a estos Números de Curva se los denominó Números de Curva ajustados (NCaj).

Si se ilustra esto con la comparación del NC de tablas (NC SCS) con el NC ajustado (NCaj), se observa que la correspondencia es también débil, como cabía esperar por la interrelación entre NC y Lám (Tabla III.12 y Figura III.16).

Tabla III.12 - Comparación entre NC ajustado y NC SCS.

Fecha	NCaj	NC SCS
06/01/97	47.1	56.7
26/01/97	52	56.7
10/11/97	51	57.1
09/12/97	61.9	58.1
12/12/97	39.5	88.3
30/12/97	63.3	56.4
01/12/99	49.3	54.7
01-12-99(2)	54.9	54.7
18/12/99	59.4	56.3
11/01/00	52.8	55.9
06/03/00	57.6	56.0
13/12/00	61.4	56.8

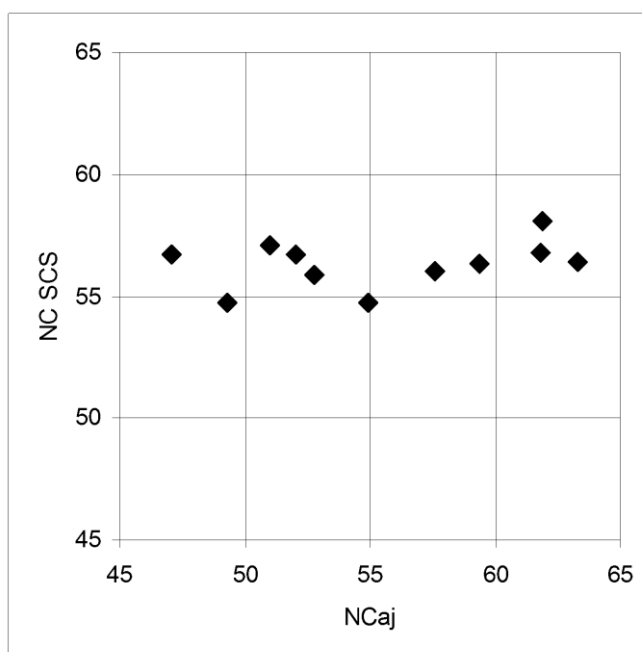


Figura III.16- Gráfico comparativo de NC SCS y NC ajustado. Se ha omitido representar el evento correspondiente a la fecha 12-12-97, por la distorsión que produce.

Siendo la correlación, según el Coeficiente de Determinación:  
 $R^2=0.39$

**Gráfico de precipitaciones y escurrimientos sobre los NC del SCS**

A título ilustrativo, debido a la escasa extensión del registro, se graficaron lluvias y escurrimientos sobre el gráfico del SCS, en forma similar a lo realizado para la microcuenca. Aquí se tomaron todas las precipitaciones que superaran los 48 mm en el día, aunque hubieran ocurrido en el mismo año (Figura III.17). Esto implica que no puede determinarse aquí el NC para la AMC II, como en el caso de la microcuenca, ya que para ello el método requiere la pp máx. de cada año.

De todas maneras se observa que los NC para la cuenca grande, bajo siembra directa, son muy inferiores al NC para AMC II de la microcuenca (NC=79), de la microcuenca.

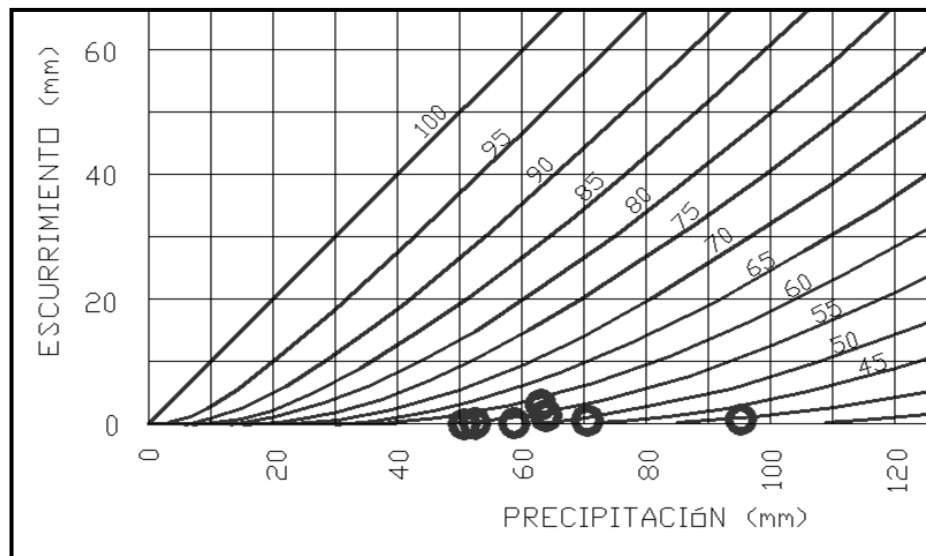


Figura III.17- Reproducción del gráfico de NC del SCS con los datos de precipitación y escurrimiento para lluvias mayores de 48 mm.

Debe distinguirse entre estos valores de NC, que son correspondientes a situaciones de escaso escurrimiento, de aquellos valores que corresponden a tormentas de proyecto. En éstas, la precipitación tiene una intensidad diaria ajustada a un período de retorno de 10 años o más, mientras que las lluvias del gráfico de la Figura III.17 han ocurrido con una frecuencia de más de una por año.

En un estudio sobre cuencas rurales pequeñas, el Australian Water Resources Council (1971) determinó los NC para tres cuencas, entre otras, que resultaron con valores relativamente bajos, con NC de 58 en dos de ellas y 59 en la restante. Esto fue resultado de un período de observación corto y seco. Posteriores estudios mostraron y advirtieron del problema que representa la calibración de los NC cuando se dispone sólo de un corto período de registros.

Similar precaución expresan Hjelmfelt et al. (2001) al advertir que la aplicación de los Números de Curva en modelos de simulación continuos (CREAMS, GLEAMS, EPIC, SWAT) puede ser muy diferente de los Números de Curva de tormentas de diseño del NEH-4.

## Ecuaciones de regresión para determinar NC

Al igual que en el caso de la micro cuenca de 9.3 ha, se procuró aquí mejorar la predicción del escurrimiento mediante modelos de regresión. Es importante destacar aquí que este trabajo no pretende fijar un modelo de regresión definitivo para el cálculo del Número de Curva, habida cuenta del escaso número de eventos considerados, pero sí validar una metodología que podrá tener aplicación práctica cuando los registros de campo conformen una base de datos lo suficientemente amplia.

Debe tenerse en cuenta que en esta cuenca la cobertura del terreno no puede clasificarse nunca como desnudo, habida cuenta de que la totalidad de la cuenca – si no se considera la micro cuenca de 9.3 ha – se trabaja bajo siembra directa. Consecuentemente se ha descartado de entrada el parámetro cobertura.

Se utilizó como variable dependiente el NCaj y como regresoras, diversas variables seleccionadas en un contexto de regresiones múltiples, a saber: lámina de lluvia (PP), lámina máxima en una hora (P1h) e índice de precipitación (IPP).

Los resultados obtenidos fueron:

### **Variables regresoras: PP, P1h, IPP**

Los resultados no fueron satisfactorios, como puede apreciarse en la Tabla III.13. Los valores de “*p*” resultaron no significativos y el CpMallows con valores bajos, comparables al número de variables regresoras (tres), lo que desestima la capacidad de este modelo.

Tabla III.13 - Análisis de una regresión lineal para la var. NCaj. Los valores de *p* en la penúltima columna indican que las variables PP e IPP consideradas conjuntamente no tienen significación en la predicción del NC.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP			
NCaj	12	0,89	0,85	21,75			
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	69,33	3,19	61,98	76,67	21,76	<0,0001	
PP	-0,48	0,57	-1,79	0,82	-0,86	0,416	3,76
P1h	0,16	0,07	-0,01	0,33	2,2	0,0594	7,39
IPP	0,29	1,26	-2,62	3,2	0,23	0,826	3,16

### Variables regresoras: P1h, IPP

Como en el caso de la microcuenca, se utilizaron la precipitación máxima caída en una hora y el índice de precipitación. En la determinación de ambas variables se utilizaron promedios de lluvia ponderados por la superficie de influencia según Thiessen de cada pluviógrafo.

La ecuación de regresión resultante es:

$$NCr = a + b * P1H + c * IPP \quad \text{Ec 0.10}$$

En la Tabla III.14 se presenta el análisis de la regresión:

Tabla III.14 - Regresión múltiple con Ncaj como variable dependiente

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP			
Ncaj	12	0,88	0,85	16,85			
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	68,49	2,99	61,73	75,24	22,93	<0,0001	
P1h (mm)	0,12	0,06	-0,01	0,25	2,13	0,0615	6,2
IPP (mm)	-0,79	0,1	-1,02	-0,56	-7,75	<0,0001	56,09

Reemplazando los coeficientes de la Ec III.10 por su valor:

$$NCr = 68.49 + 0.12 * P1h - 0.79 * IPP \quad \text{Ec 0.11}$$

En donde NCr es la predicción por regresión del Ncaj.

En este análisis de regresión llama la atención en primer lugar, el coeficiente negativo de la variable IPP. Esto significa que cuando aumente IPP – lo que significa mayor lámina de lluvia en cualquiera de los 6 días que incluye esta variable- disminuirá el Número de Curva. Esto no aparece como lógico, ya que a mayor precipitación se supone mayor escurrimiento. Sin embargo, debe tenerse presente que en la comparación de eventos diferentes, mayor escurrimiento no significa necesariamente mayor NC.

La Figura III.18 muestra la relación decreciente entre PP y Ncaj.

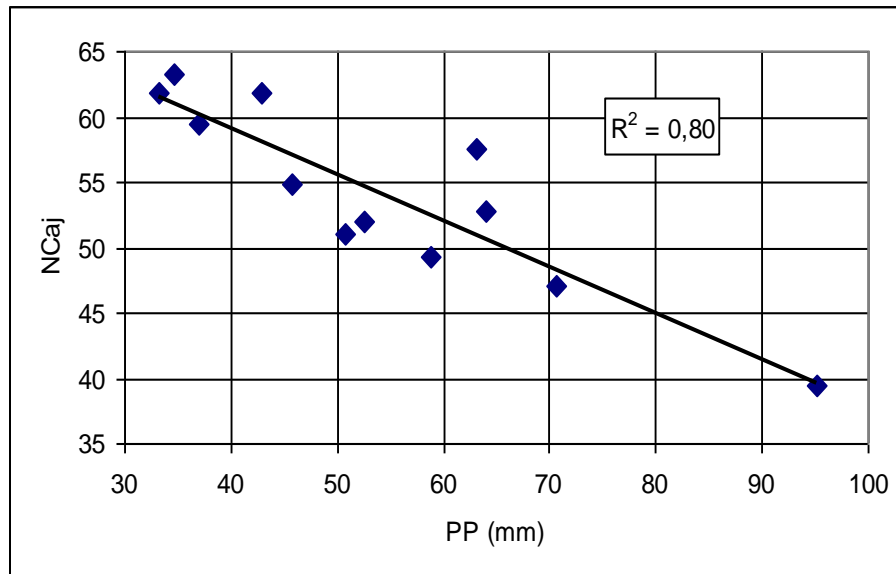


Figura III.18– Para los eventos ocurridos en Cuenca Grande, a un aumento de la PP le corresponde una disminución del valor del NC.

Diversos autores han reportado similar comportamiento en estudios de calibración del NC en diferentes cuencas:

Hawkins (1973, citado por Boughton, 1989), trabajando en tres cuencas de 63, 188 y 1700 ha, mostró que los NC decrecían a medida que aumentaba la precipitación.

Este mismo autor documentó (1979), con datos de 11 cuencas en Utah (EEUU) una gran variación en los NC, que fue atribuida a que el escurrimiento se producía desde sólo una pequeña área impermeable de cada cuenca. Paralelamente los coeficientes de escorrentía eran muy pequeños, en el rango de 0.0006 a 0.0635, similar a lo ocurrido en la cuenca grande de este estudio, como se aprecia en la Tabla III.15.

También respecto de la variabilidad espacial de la dinámica del agua, Ateca (2004) comprobó, trabajando en labranza convencional, que el comportamiento del contenido de humedad del suelo es estable en el tiempo, es decir que cada punto puede ser caracterizado como seco o húmedo, y esto no se modifica bajo diferentes condiciones meteorológicas.

Boughton y Stone, en 1985 (Boughton, 1989), trabajando en una región semiárida, mostraron que ocurrían pérdidas muy altas por transmisibilidad, en vías de escurrimiento efímeras lo que provocaba que los NC calibrados (ajustados) decrecieran a medida que el tamaño de la cuenca aumentaba.

Se observa en la cuenca grande, que efectivamente hay mayor escurrimiento cuando la precipitación es mayor (Figura III.19), aunque el escurrimiento es proporcionalmente menor con respecto a la lluvia, es decir que



esta reflejando un aumento proporcionalmente mayor de la infiltración a medida que la lluvia aumenta.

El escurrimiento en Cuenca Grande es muy pequeño, como queda reflejado en la Tabla III.15, en la que se observan para los mismos eventos, los coeficientes de escorrentía, láminas escurridas y relaciones entre estos parámetros para Cuenca Grande y Microcuenca. Para los eventos analizados, un aumento de los registros de PP diaria se corresponde con una disminución de los NCaj (ver Figura III.18).

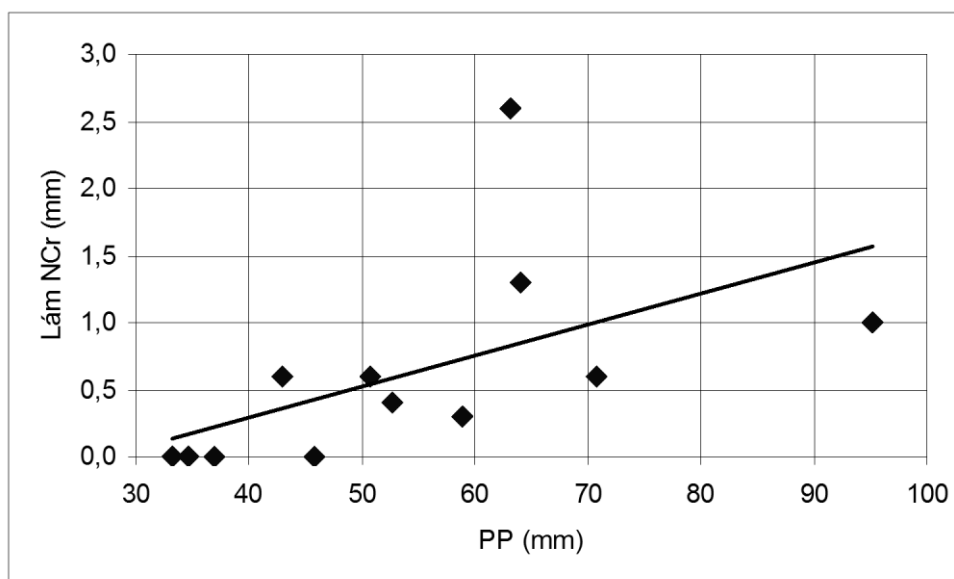


Figura III.19- Para los eventos ocurridos en Cuenca Grande, a un aumento de la PP le corresponde también un aumento en la Lám estimada con el NC de la regresión

Estas diferencias también pueden observarse en el gráfico de la Figura III.20, que muestra las lluvias caídas y láminas escurridas en ambas cuencas. Puede verse que la línea de ajuste entre PP y Lám para la microcuenca presenta una inflexión aproximadamente en correspondencia con los 50 mm de lluvia. Es decir que a partir de este nivel de precipitaciones, hay un incremento más directo de los escurrimientos. La recta de ajuste para la cuenca grande en cambio, tiene una pendiente mucho menor, indicando que a pesar de los aumentos en la precipitación, los aumentos de los escurrimientos son mucho menos significativos.

Es decir para que la Lám no se incremente ante un aumento de la PP, el Número de Curva debe disminuir, lo que se refleja en el coeficiente negativo de la variable IPP.

Ésta comparación de escurrimientos entre cuencas con diferentes manejo, ha sido reportada como consecuencia de la eficiencia de la complementación de la SD con las terrazas de desagüe, en la disminución de los excedentes hídricos en las cuencas rurales de la región en estudio (Esmoriz et al., 2002b).



Tabla III.15 - Para eventos de lluvias similares (col. 2 y 3) registradas en ambos pluviógrafos, se muestran las láminas escurridas (col. 4 y 5), los coeficientes de escurrentía (col. 6 y 7) y la relación entre estos últimos (col. 8).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
FECHA	PP (mm)		LÁM (mm)		C		RELAC. (7) / (6)
	CG	MICROC	CG	MICROC	CG	MICROC	MICROC / CG
10-11-97	51	45	0,016	4,140	0,0003	0,0916	291
09-12-97	33	32	0,024	10,400	0,0007	0,3250	455
12-12-97	95	83	0,760	41,800	0,0080	0,5024	63
06-03-00	63	72	3,123	27,545	0,0495	0,3826	8

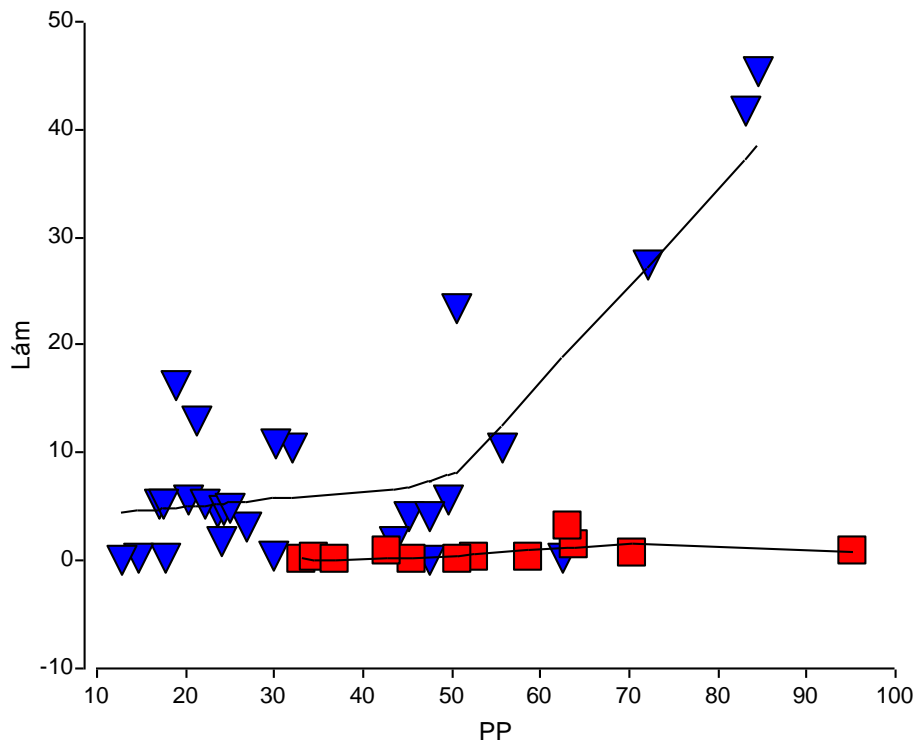


Figura III.20- Precipitaciones y escurrimientos, en mm, de la microcuenca (triángulos) y de la cuenca grande (cuadrados) con sus respectivas líneas de ajuste. Después de los 50 mm de precipitación el escurrimiento aumenta en forma marcada en la microcuenca, lo que no ocurre en la cuenca grande.

Es decir que la aparente incongruencia del resultado de esta regresión no es otra cosa que el reflejo de lo que sucede en la cuenca grande para este conjunto de datos.

### Comportamiento del Número de Curva

Hjelmfelt et al. (2001) describieron este comportamiento del NC como “comportamiento complaciente”: Aquí el NC observado declina suavemente con el incremento de la precipitación, y sin una tendencia apreciable a alcanzar un valor estable. El NC no puede ser determinado en forma segura de datos que muestran este patrón, porque no hay una aproximación clara a un valor constante. Se ha hallado que este comportamiento del NC indica una situación de escurrimiento de área parcial, donde la fracción de área fuente puede ser muy pequeña (p.ej. 0.1 – 5 por ciento), situación estudiada por otros investigadores como Steenhuis et al., (1995) y Lyon et al. (2004), como se refiriera bajo el título Variabilidad experimentada por el parámetro AMC de pág. 73.

Coincidentemente con este patrón de comportamiento la cuenca grande presenta con frecuencia la condición de escurrimiento de áreas parciales ya que el escurrimiento de la microcuenca es proporcionalmente mayor al resto, constituyendo en ocasiones la totalidad del escurrimiento observado.

Estos mismos autores, utilizando una base de datos de lluvia – escurrimiento descrita como de las más completas en el mundo, definen también otras dos formas de relación entre la PP y el NC: El comportamiento normal y el comportamiento violento, ambos tendiendo a un NC estable.

**Comportamiento Normal:** Este es el escenario más común. El NC observado declina con el tamaño creciente de la tormenta, como en la situación complaciente descrita arriba. Sin embargo, aquí los números de curva se aproximan o mantienen un valor casi constante con tormentas de tamaño cada vez mayor. El escurrimiento mismo puede crecer desde una variedad de procesos fuente, incluyendo escurrimiento laminar y flujo subsuperficial rápido.

**Comportamiento violento.** La característica distintiva aquí es que los NC observados crecen súbitamente y se aproximan asintóticamente a un valor aparentemente constante. A menudo acompaña un comportamiento complaciente en las precipitaciones menores. Desde un punto de vista del origen del proceso, esto podría ser un fenómeno umbral para algunos valores críticos de profundidad de precipitación.

Para una mejor comprensión de estos comportamientos, se incluye la Figura III.21 con los gráficos de la publicación referida.

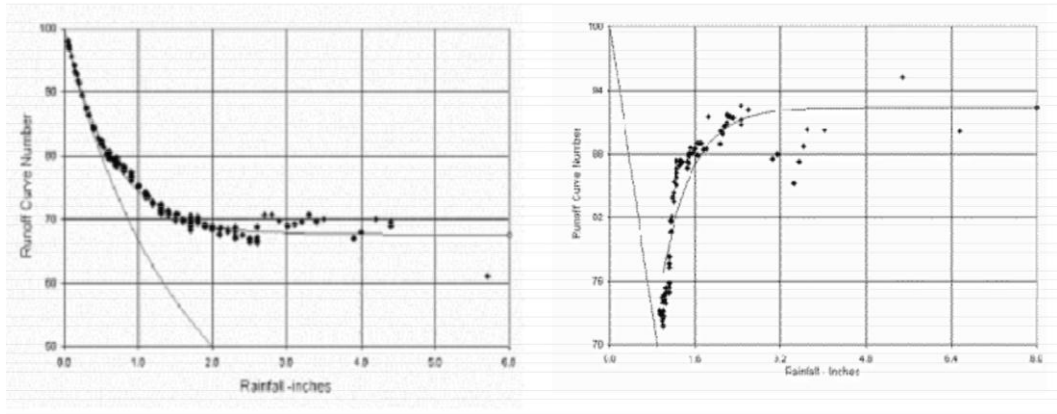


Figura III.21-Ejemplos de la relación entre PP (en abcisas) y NC (en ordenadas) según Hjelmelt et al. A la izquierda comportamiento normal; a la derecha comportamiento violento.

Si se ajusta a las relaciones PP - NC de cuenca grande que se observan en la Figura III.18 una exponencial decreciente, puede observarse que el comportamiento en la cuenca en estudio, para los datos con que se cuenta, se asemeja a un comportamiento complaciente, pero no puro, sino con cierta tendencia a hacerse asintótico al eje de PP (Figura III.22).

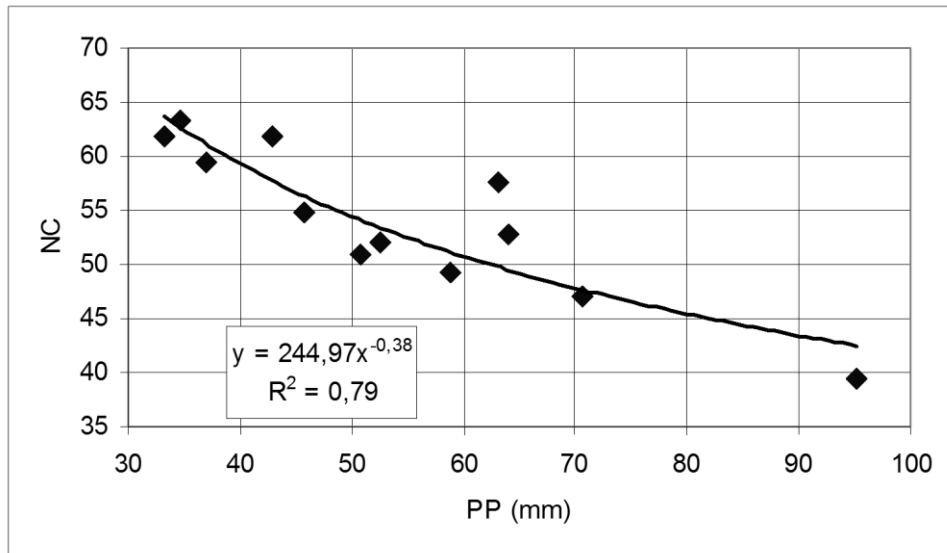


Figura III.22- Comportamiento de la relación PP-NC en cuenca grande.

Así como los coeficientes de las diferentes regresoras tienen variaciones según sean los eventos que intervengan en la regresión y podría esperarse que su

valor tienda a estabilizarse cuando la base de datos comprenda el suficiente número de eventos y condiciones diversas de humedad antecedente, también es lógico esperar que el comportamiento de la relación entre la PP y el NC derivará a un comportamiento normal o violento.

Cabe destacar que Silva y Olivera (1999), trabajando en el centro oeste brasilero, en una cuenca con vegetación natural, analizaron 31 eventos de lluvia escurrimiento. Utilizando técnicas estadísticas de regresión, con el escurrimiento como variable dependiente y la precipitación, intensidad promedio de la lluvia y lámina de lluvia caída en los 5 días anteriores como variables regresoras, encontraron que la única variable independiente que afectaba al escurrimiento era la precipitación, con un  $R^2=84$ .

### **Resultados de la determinación del Número de Curva en función de la precipitación**

La aplicación de la Ecuación III.11 de pág 111 produjo los NC que se observan en la última columna de la Tabla III.16.

Tabla III.16 - Valores de las variables consideradas, para cada uno de los eventos, Número de Curva ajustado y Número de Curva obtenido por la Ecuación III.11

Fecha	PP	P1h	IPP	NCaj	NCr
06/01/1997	71	35	29	47	50
26/01/1997	53	34	21	52	56
10/11/1997	51	32	22	51	55
09/12/1997	33	29	13	62	62
12/12/1997	95	17	42	40	37
30/12/1997	35	26	14	63	61
01/12/1999	59	11	25	49	50
01/12/1999	46	10	20	55	54
18/12/1999	37	19	15	59	59
11/01/2000	64	33	26	53	52
06/03/2000	63	61	26	58	56
13/12/2000	43	41	18	62	59

### **Comparación entre NC ajustado y NC de la regresión**

En el gráfico de la Figura III.23 puede observarse la correlación entre el NCaj y el NCr:

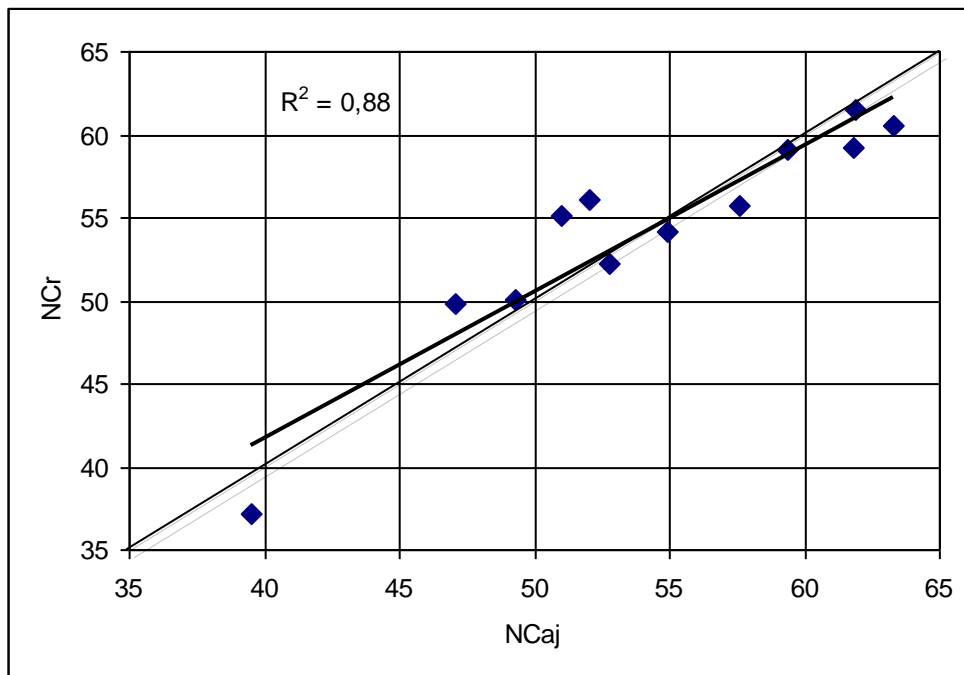


Figura III.23- Correlación entre NCaj y NCr. Se muestra la recta de ajuste ideal, en trazo fino, y la línea de tendencia, en trazo grueso.

El Coeficiente de Determinación es  $R^2 = 0.88$ , como puede observarse en la tercera columna de la Tabla III.17.

#### **Determinación de la lámina de escurrimiento con el NC de la regresión**

El paso siguiente consistió en calcular la Lámina de escurrimiento (Lám NCr) con NCr y evaluar su grado de ajuste con Lám Obs. Para ello se corrió el programa Arhymo con NCr, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla III.17.

Tabla III.17 - Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la estimada con NCr.

Fecha	Lám Obs (mm)	Lám NCr (mm)
06/01/97	0.62	0.6
26/01/97	0.13	0.4
10/11/97	0.02	0.6
09/12/97	0.02	0.0
12/12/97	0.76	1.0
30/12/97	0.18	0.0
01/12/99	0.16	0.3
01-12-99(2)	0.07	0.0
18/12/99	0.03	0.0
11/01/00	1.39	1.3
06/03/00	3.12	2.6

En la Figura III.24 se observa el gráfico correspondiente a la Tabla III.17, mostrando la línea de ajuste ideal de pendiente 1:1.

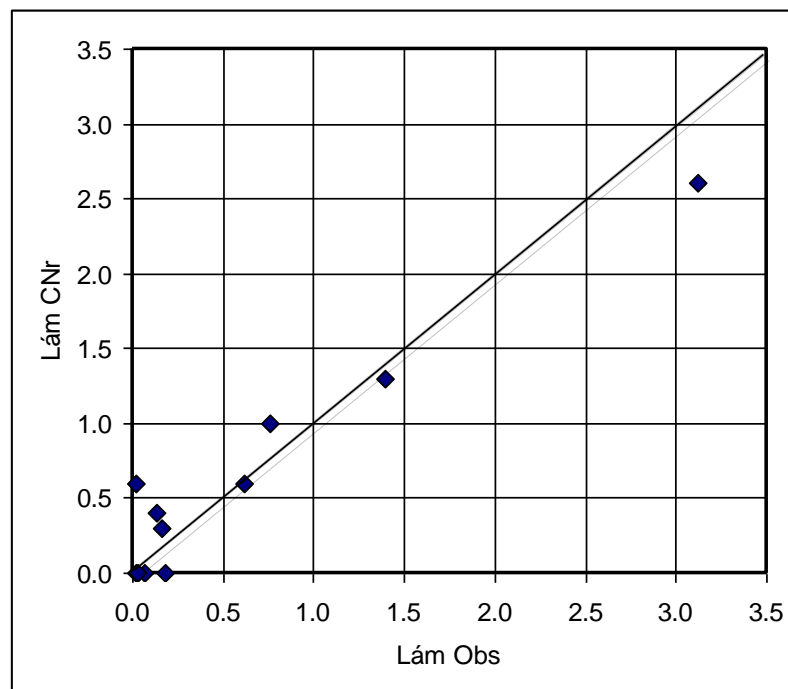


Figura III.24- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la determinada mediante el NC de la regresión.

Aplicando el estadístico Coeficiente de Determinación (Lám Obs, Lám NCr) :



$$R^2=0.89$$

Aplicando Jack Knife:

Considerando ahora el cálculo del escurrimiento también en función de NCr, pero por el método Jack Knife (Lám NCr (JK)) y aplicando la misma prueba estadística, se obtuvieron los resultados que se observan en la Figura III.25 y Tabla III.18:

Tabla III.18 - Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la estimada con NCr por el método Jack Knife.

Fecha	Lám Obs	Lám NCr (JK)
06/01/97	0.62	0.5
26/01/97	0.13	0.5
10/11/97	0.02	0.7
09/12/97	0.02	0.0
12/12/97	0.76	0.7
30/12/97	0.18	0.0
01/12/99	0.16	0.4
01-12-99(2)	0.07	0.0
18/12/99	0.03	0.0
11/01/00	1.39	1.2
06/03/00	3.12	1.7
13/12/00	0.79	0.5

Coef de Determinación (Lám Obs, Lám NCr (JK)):

$$R^2 = 0.78$$

La concordancia es sensiblemente menor, se estima que por al bajo número de casos analizados.

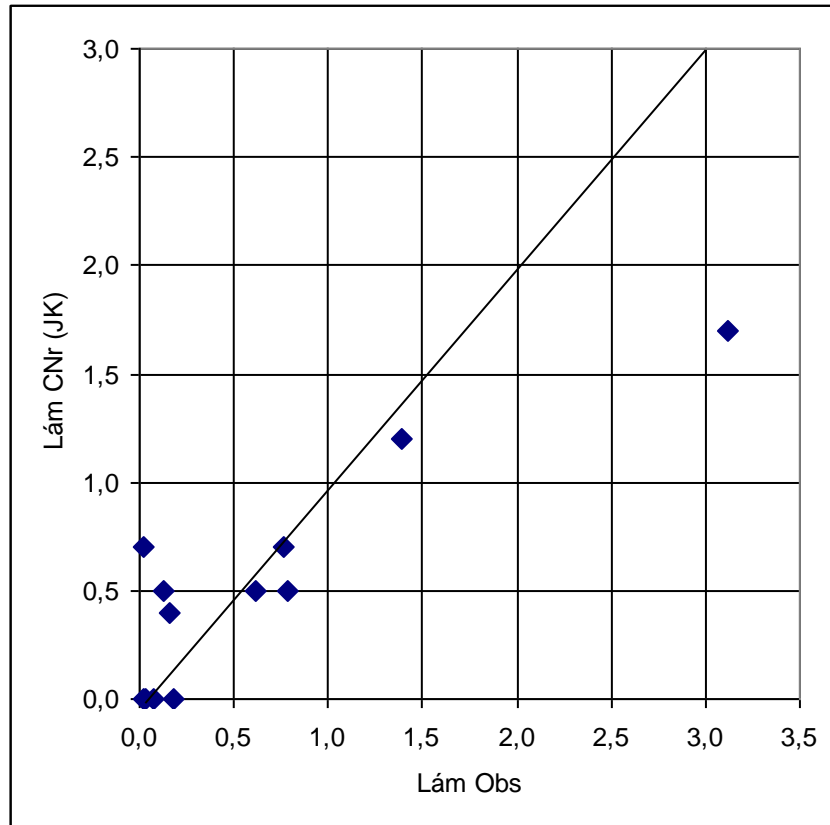


Figura III.25- Comparación de la lámina de escurrimiento observada con la determinada mediante el NC de la regresión por el método Jack Knife.

## Caudales Máximos

Se comparan en este título, los caudales pico de cada evento, observados, determinados con el NC SCS a través de Arhymo (Qp SCS) y determinados con el NCr, también a través del programa Arhymo (Qp NCr) agregando también el método Jack Knife. La determinación de estos caudales, a excepción de los caudales observados, se obtuvo a través del programa Arhymo.

En primer lugar se comparan los caudales máximos observados con los estimados con el NC SCS, que pueden observarse en la Tabla III.19 y en la Figura III.26.

### **Comparación de caudales pico observados y con NC de tablas (Qp SCS)**

Tabla III.19 - PP y caudales máximos de cada evento: observados y del método NC SCS.

Fecha	PP	Qp Obs	Qp scs
	mm	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
06-01-97	71	0,329	4,454
26-01-97	53	0,129	0,196
10-11-97	51	0,036	1,192
09-12-97	33	0,049	0,048
12-12-97	95	0,269	19,129
30-12-97	35	0,144	0,036
01-12-99	59	0,033	1,378
01-12-99(2)	46	0,031	0,519
18-12-99	37	0,009	0,058
11-01-00	64	0,524	1,767
06-03-00	63	2,681	2,451
13-12-00	43	0,526	0,240

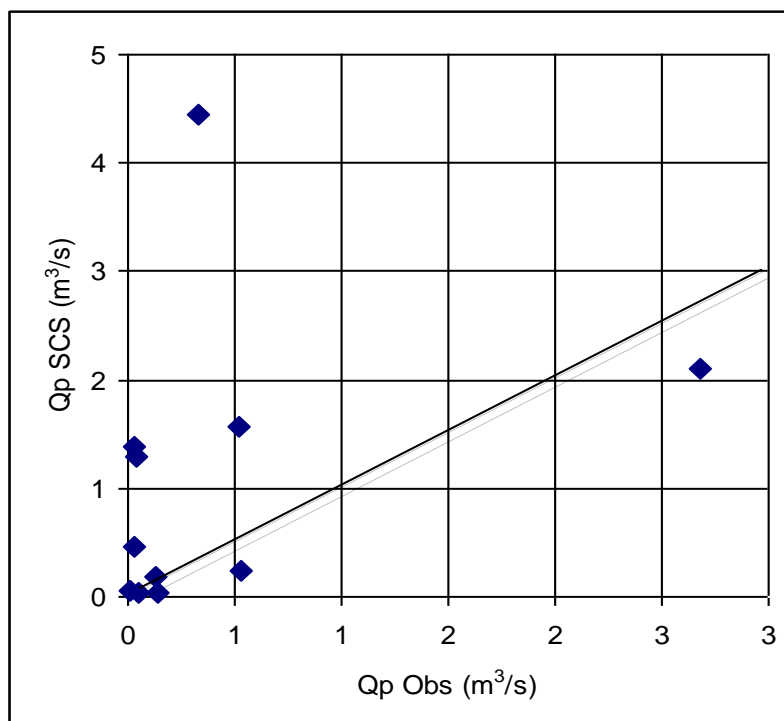


Figura III.26- Comparación de los caudales máximos de cada evento: observados y del método NC SCS, mostrando la recta de ajuste ideal. El caudal del día 12-12-97 se ha omitido, para evitar la distorsión gráfica que produce por el cambio de escala. Se observa que el método NC SCS ha tendido a sobreestimar los caudales para este conjunto de datos.

Siendo:

Coef de Determinación (Qp Obs, Qp NC Tablas):

$$R^2 = 0.002$$

Como puede observarse en la Figura III.26, la correspondencia entre los caudales observados y los determinados por el método del Número de Curva del SCS es muy poco significativa para este grupo de eventos.

### **Cálculo de Caudales Pico con el NC de la regresión**

Para la determinación de estos caudales máximos se corrió el programa Arhymo con el NCr correspondiente a cada evento. Los caudales máximos de estas corridas figuran en la columna (3) de la Tabla III.20.

Seguidamente se corrió el programa Arhymo para cada evento, pero con los Números de Curva determinados por el método Jack Knife. Los caudales máximos de estas corridas figuran en la columna (4) de la referida tabla.

Tabla III.20 - Caudales máximos de cada evento, observados, calculados con NCr y calculados con NCr (JK).

(1)	(2)	(3)	(4)
Fecha	Qp Obs	Qp NCr	Qp NCr (JK)
06-01-97	0,329	0,686	0,320
26-01-97	0,129	0,225	0,267
10-11-97	0,036	0,322	0,420
09-12-97	0,049	0,043	0,022
12-12-97	0,269	0,429	0,307
30-12-97	0,144	0,018	0,000
01-12-99	0,033	0,028	0,206
01-12-99(2)	0,031	0,004	0,009
18-12-99	0,009	0,034	0,009
11-01-00	0,524	0,725	0,929
06-03-00	2,681	2,772	1,808
13-12-00	0,526	0,575	0,510
Coef Determinación		0.97	0.87

La graficación de los caudales de la columna (3) respecto de los observados se presenta en la Figura III.27. Análoga correlación pero entre las columnas (2) y (4) se grafica en la Figura III.28.

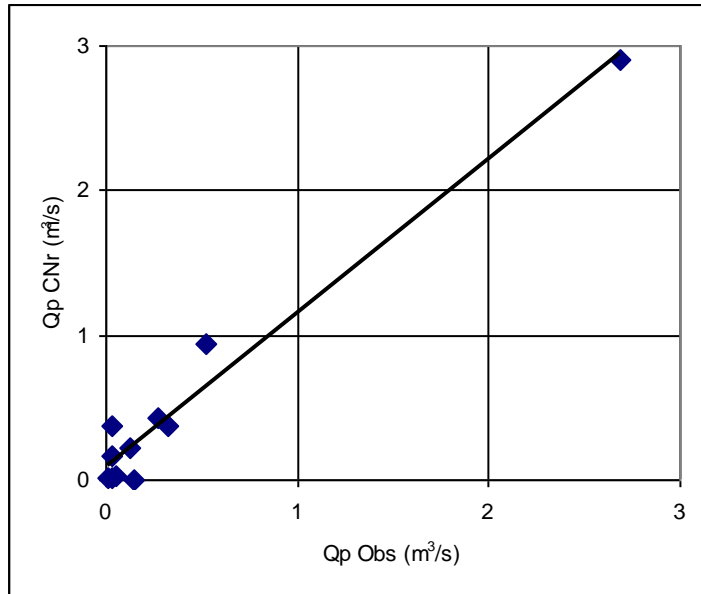


Figura III.27- Gráfico de dispersión de los caudales pico determinados con NCr y los observados, con la línea de tendencia.

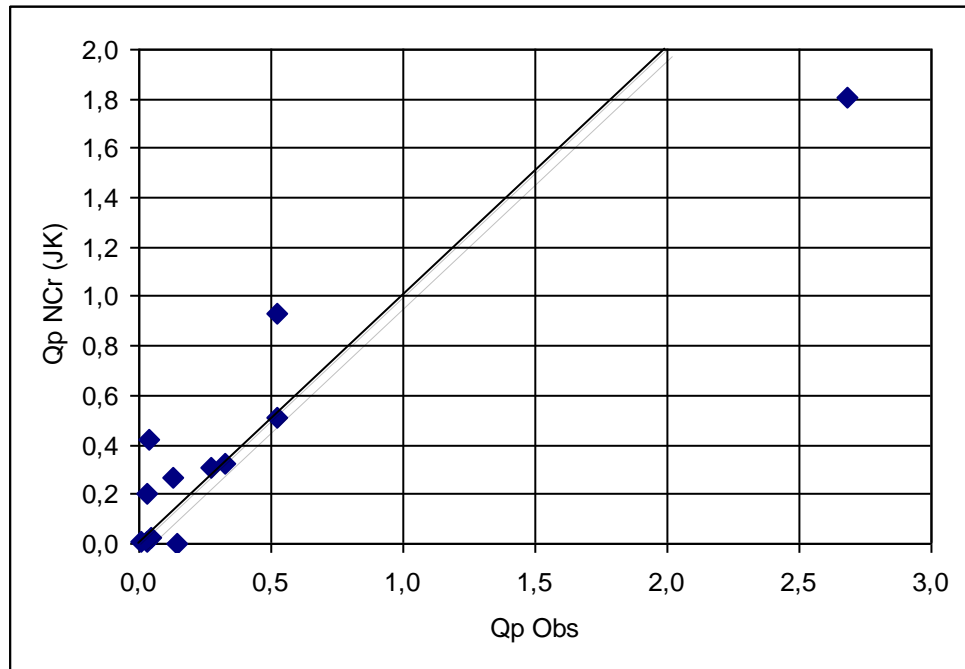


Figura III.28- Gráfico de dispersión de los caudales pico determinados con NCr (JK) y los observados.

Los coeficientes de Determinación para cada una de las dos predicciones, es decir con el Número de Curva de la regresión (NCr) y con el Número de Curva de la regresión por el método Jack Knife, figuran al pie de las respectivas columnas (3 y 4) de la Tabla III.20.

Puede observarse que los resultados presentan Coeficientes de Determinación elevados, y pueden caber aquí similares acotaciones que las efectuadas en las determinaciones de láminas de escurrimientos y Números de Curva. Se desprende de esas consideraciones, que es importante procurar una continuidad en la tarea de mantenimiento de instrumental de las cuencas estudiadas y en la recolección y procesamiento de los datos obtenidos.

### Uso de una ecuación de infiltración

Habida cuenta de los resultados detallados bajo el título “Ecuaciones de regresión para determinar NC” de pág. 110, y no contando con más datos locales, se planteó la alternativa de utilizar una ecuación de infiltración en lugar de las pérdidas “*I<sub>a</sub>*” del método del NC SCS. Esta opción ha sido promocionada por diversos investigadores en trabajos referidos al Número de Curva, como se mencionara bajo el título “Variabilidad experimentada por el parámetro AMC” de pág. 73 (Boughton, 1989; Kirkby et al. 2005).

Se pretende con ello contrastar si las relaciones halladas entre precipitación, escurrimiento y NC observaban similar comportamiento que el obtenido en las ecuaciones de regresión, sobre todo en lo referido a la disminución del NC con el aumento de la precipitación.

La ecuación de infiltración seleccionada fue la de Horton (Ec III.12), que demostró ser la que más se ajusta en los ensayos realizados con simulador de lluvias por Aoki (2002) en la cuenca en estudio, no obstante no haber sido ajustada in situ para la situación de siembra directa.

$$i = i_f + (i_i - i_f) \cdot e^{(-\beta \cdot t)} \quad \text{Ec 0.12}$$

En donde:

- $i$  = velocidad de infiltración, que varía entre  $i_i$  e  $i_f$
- $i_f$  = velocidad de infiltración final
- $i_i$  = velocidad de infiltración inicial
- $\beta$  = tiempo al cual  $i$  disminuye al 36.8 % de su variación total ( $i_i - i_f$ )
- $t$  = tiempo transcurrido desde saturación superficial del suelo

Se aplicó la ecuación de infiltración a un rango amplio de precipitaciones, para determinar los escurrimientos, el NC y comparar la variación de estos tres parámetros (PP, Lám y NC).

Se simularon precipitaciones diarias entre 40 y 250 mm, con un patrón de distribución acorde a los patrones determinados por Caamaño Nelly y Dasso (2005) y una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. La Figura III.29 muestra la distribución aludida de la precipitación. A cada una de estas lluvias así distribuidas, se le sustrajo la lámina infiltrada determinada por la ecuación de Horton, determinando así la lámina de escurrimiento.

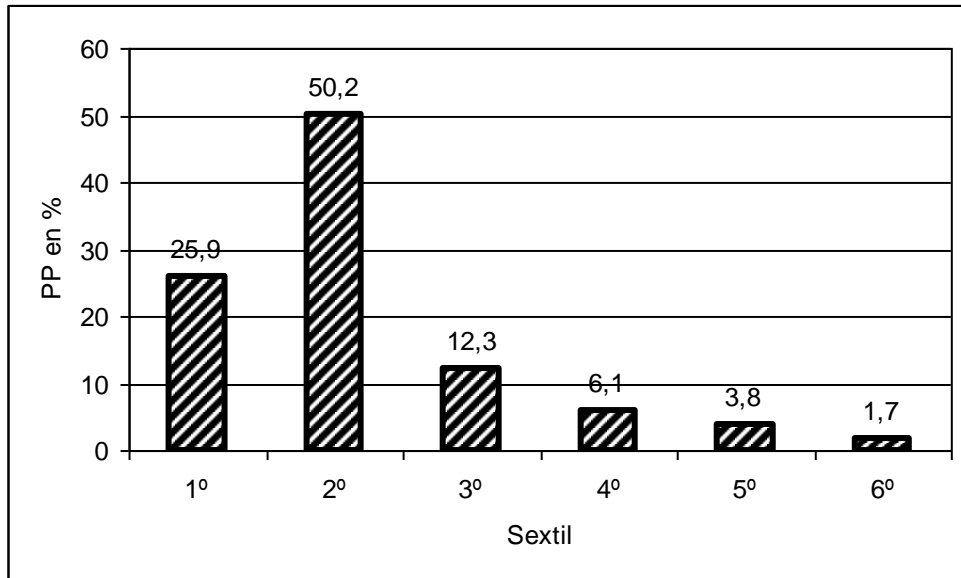


Figura III.29- Hietograma de diseño según Caamaño Nelly-Dasso para una duración de la precipitación de 180 min.

Con la precipitación y el escurrimiento se determinó también el NC de cada uno de estos eventos simulados. Estos resultados se muestran en la Tabla III.21.



Tabla III.21- Esgurrimiento de diferentes precipitaciones diarias sustrayendo la lámina infiltrada. La última columna muestra los NC correspondientes.

PP	Lám	NC
mm	mm	
40	5,9	77
50	9,7	76
60	13,5	74
70	17,2	72
80	21,0	71
90	25,0	69
100	30,0	68
110	35,0	67
120	40,0	66
130	44,9	65
140	49,9	65
150	54,9	64
160	59,9	63
170	65,2	62
180	71,6	62
190	78,4	61
200	85,3	61
210	92,1	61
220	99,0	61
230	105,9	60
240	112,7	60
250	119,6	60
300	154,4	58

En esta tabla, se observa una situación similar a la descrita bajo el título Ecuaciones de regresión para determinar NC, de pág. 110, para los datos de la cuenca grande: A medida que aumenta la precipitación, aumenta el escurrimiento (Lám), pero el NC disminuye. Sin embargo, esa disminución tiende también a una posición asintótica respecto del eje de precipitaciones, como puede observarse en la Figura III.30 y Figura III.31 que muestran los gráficos de estas relaciones.

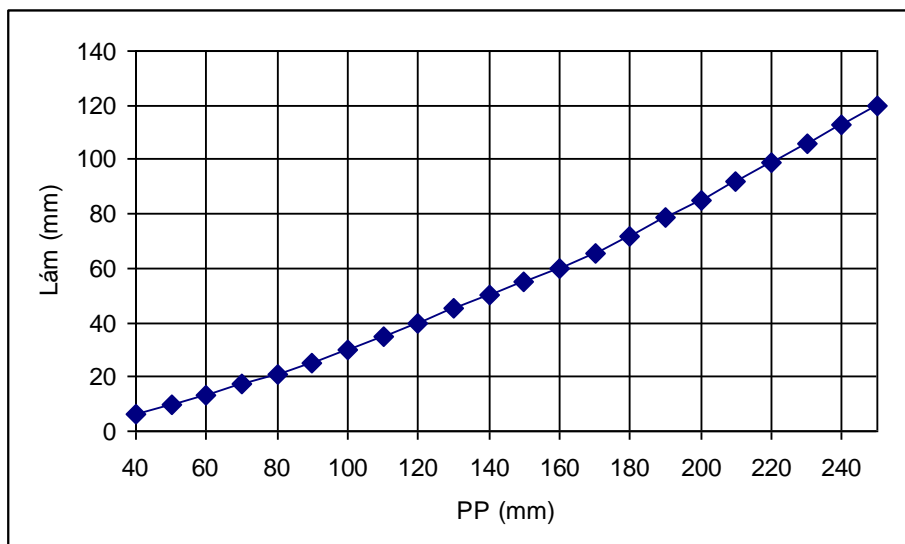


Figura III.30- Lám resultante de aplicar una curva de infiltración a diferentes PP.

Se observa en la figura siguiente (Figura III.31), la misma situación que se mostrara en la Figura III.18: A un aumento de la PP le corresponde una disminución del NC.

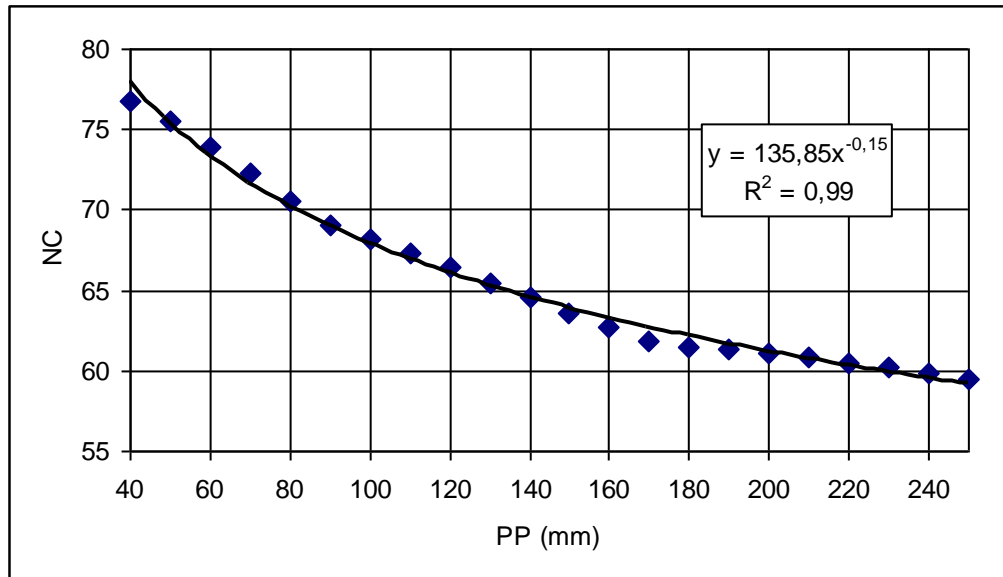


Figura III.31- Relación entre PP y NC. Observese que la ecuación de ajuste (corresponde a la línea llena) es similar a la ecuación de ajuste de la Figura III.22.

Aquí la cuenca tendería a presentar un comportamiento normal, según el criterio de Hjelmfelt et al. (2001), con un NC que tiende a estabilizarse acercándose a una posición asintótica respecto del eje de las precipitaciones.

Una primera observación del comportamiento de los NC en cuenca grande, tanto según los valores observados como los obtenidos con lluvias simuladas y la curva de infiltración, es que para tormentas diarias con período de retorno de 10 años, las tablas del SCS proponen NC excesivos.

Es decir que que los NC correspondientes a tormentas de recurrencia elevada (períodos de retorno bajos), por ejemplo un año, son mayores que los NC que corresponden a precipitaciones con períodos de retorno mayores, tales como por ejemplo 10 años. Lo que significa que para iguales condiciones, los NC que se utilizan en simulación de eventos de baja intensidad deberían ser mayores que aquellos utilizados para tormentas de proyecto.

## SECCIÓN CUARTA

### CONCLUSIONES

Las condiciones de humedad antecedente (AMC) establecidas originalmente por el método SCS NC no permiten identificar un valor aceptable para el parámetro Número de Curva, tanto en la microcuenca con labranza convencional como en la cuenca grande bajo siembra directa. Una causa principal radica en los apreciables cambios de NC que son propuestos por las tablas originales al variar la condición de humedad antecedente (AMC).

Entre el Número de Curva ajustado (NCaj) y el de las tablas del método del Soil Conservation Service (NC SCS), hay diferencias significativas que demuestran que este último no se adecua a las condiciones locales.

En la microcuenca, la determinación del Número de Curva siguiendo el procedimiento recomendado por el Soil Conservation Service arroja un  $NC=79$  para la condición II de humedad antecedente. El número de eventos utilizados para esta determinación fue de 7, y aunque el ejemplo brindado por el Soil Conservation Service es también con un número reducido de casos (13), se considera el guarismo obtenido como de valor orientativo para la condición de labranza convencional.

Existe una correspondencia muy baja entre lámina de escurrimiento observada y lámina determinada por el método del SCS, tanto en labranza convencional como en siembra directa.

El conocimiento de las condiciones de cobertura y precipitaciones permitiría a través de una ecuación de regresión, una mejor estimación de la lámina de escurrimiento que la estimada por el método NC – SCS, para las condiciones locales y bajo labranza convencional, como lo demuestra la comparación de los Coeficientes de Determinación (0.93 y 0.48 respectivamente).

El Índice de Precipitación (IPP) confeccionado en base a la precipitación de los 5 días anteriores al evento considerado, es una variable altamente significativa ya sea en labranza convencional como en siembra directa, y tanto para la determinación de lámina de escurrimiento como de Número de Curva ( $p<0.0001$ ).

En labranza convencional, la ajustada predicción del escurrimiento (Lám) en los eventos de condición AMC III por una variable regresora basada sólo en precipitaciones (IPP), estaría indicando la falta de gravitación de la cobertura vegetal sobre la lámina escurrida cuando el suelo se encuentra saturado.

El Índice de Precipitación (IPP) por sí sólo permitiría en condiciones de suelo saturado, estimar la lámina de escurrimiento con un coeficiente de determinación elevado.

En labranza convencional el método de regresión lineal permitió una mejor estimación del Número de Curva para las condiciones de la cuenca, conociendo la precipitación del evento, la de los cinco días anteriores, la cobertura del terreno y la lámina máxima de lluvia caída en una hora. Es de hacer notar que estas cinco

variables son derivadas de dos: Precipitación (PP) y Cobertura (COB), parámetros estos de fácil accesibilidad para cualquier técnico dedicado al tema.

En Cuenca Grande la predicción del escurrimiento en forma directa, por las mismas variables regresoras que se utilizaron en la microcuenca, tuvo resultados de poca significación, se estima que debido a la corta duración de la lluvia neta con relación al tiempo de concentración de la cuenca.

En Siembra Directa el Número de Curva se predijo con un Coeficiente de Determinación  $R^2=0.88$ , lo que indica un buen grado de ajuste. Las variables regresoras, a diferencia de Labranza Convencional, fueron solamente la lámina máxima caída en una hora (P1h) y el índice de Precipitación (IPP).

Una segunda alternativa de regresión indica que la precipitación (PP) aparece como buena predictora del Número de Curva, con un Coeficiente de Determinación  $R^2=0.80$ , con un valor de  $p$  altamente significativo ( $p=0.0001$ ) y un  $C_p$  Mallows elevado, para una sola variable regresora. Esto significa que el algoritmo así obtenido es también adecuado para este conjunto de datos.

En Siembra Directa, la lámina de escurrimiento calculada con el Número de Curva de la regresión resultó con un Coeficiente de Determinación  $R^2=0.89$ , lo que constituye una significativa mejora con respecto al método NC del Soil Conservation Service. Al aplicar el método Jack Knife, el Coeficiente de Determinación, aunque significativo, fue sensiblemente menor (0.78), lo que se atribuye al bajo número de casos analizados.

En Cuenca Grande, la simulación de precipitaciones de intensidad diaria creciente, afectadas por una curva de infiltración hortoniana (determinada para la microcuenca), permiten determinar Números de Curva que muestran tendencia a un comportamiento normal, es decir hacia un valor de Número de Curva estable.

En forma preliminar puede estimarse por lo antedicho que para tormentas de proyecto con recurrencia de 10 años en una cuenca de las condiciones de Cuenca Grande, y para una superficie que está en el límite superior del rango de validez del método del SCS (800 ha), los valores de NC estarían en el orden de un rango de 50 a 60.

En Cuenca Grande, el Coeficiente de Determinación  $R^2=0.002$  demuestra que los caudales máximos determinados con los NC SCS (de tablas) no son adecuados para este conjunto de datos.

Los caudales máximos calculados en Cuenca Grande con el Número de Curva de la regresión, aparecen como bien ajustados a las observaciones, con un  $R^2=0.97$  para el total de la muestra y  $R^2=0.87$  para la validación por el método Jack Knife.

El rango de variación de los diferentes coeficientes tiende a disminuir con el aumento del número de eventos observados, por lo cual es dable esperar un mejor ajuste de las ecuaciones en la medida en que se mantengan las observaciones a campo.

## TAREAS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

La base de datos con que se cuenta para las cuencas en estudio constituida por datos climáticos, edáficos, estudios de infiltración, registro de caudales, etc., constituye un área de experimentación única en la región, que podrá ser aprovechada para experimentación y calibración de modelos a ser utilizados en el área de influencia.

Los resultados de una investigación sólo son confiables cuando se fundamentan en datos medidos objetivamente. Por este motivo y en primer lugar se considera como tarea inmediata a la presente tesis, asegurar la continuidad de las mediciones y toma de datos en las cuencas de experimentación actual, sin perjuicio de que pudieran expandirse los estudios a áreas mayores si se contara con los elementos materiales y humanos necesarios. El aumento de la base de datos permitirá reducir el rango de incertidumbre en las determinaciones expuestas en esta tesis.

Los resultados del presente trabajo, además de enriquecerse con el aporte de nuevas mediciones, deberán ser validados contrastándolos con datos de eventos lluvia-caudal que puedan ser medidos en el futuro.

Una línea a futuro es la determinación del escurrimiento en función de la energía cinética de la lluvia, habida cuenta de que se dispone de la información necesaria, aplicando la metodología, interactuando y aprovechando la experiencia desarrollada en otros centros de investigación (Chagas et al (1998) y Chagas et al. (2000)).

El rol de la capacidad de infiltración y sus relaciones con el NC y las propiedades de humedad del sitio necesitan ser exploradas, explicadas y aplicadas a esta tecnología (Hawkins, 1978). El estudio de la infiltración es un tema de la mayor importancia en cualquier modelo hidrológico. En el caso del método del Número de Curva esto cobra especial significado, toda vez que ha sido ampliamente reconocido que las llamadas “pérdidas iniciales” (que no son otra cosa que una fracción de la lámina infiltrada) y la humedad antecedente del suelo son la principal fuente de error en la aplicación de este modelo. Refuerzan este argumento la disponibilidad de manejar grandes volúmenes de datos e información derivada, merced a la tecnología computacional, lo que elimina también el factor limitante de la capacidad de análisis matemático de la información. Modelos de balance de agua deberían ser considerados.

Efectuar la aplicación del método del CN SCS en un modelo distribuido. Esto atendiendo a diferenciar las áreas que aportan al escurrimiento. La importancia de la variación espacial de la infiltración es destacada por varios autores (Lyon et al., 2004; Castiglioni et al., 2004) y se cuenta a nivel local y nacional con investigadores capacitados y entrenados en el tema. La relación entre el índice topográfico de Beven y Kirkby y la infiltración es un tema que puede ser central en esta línea de estudio.

Una proyección a futuro es la de desarrollar un Sistema de Información Georeferenciada en la cuenca bajo estudio, lo que facilitará en gran medida tanto el

desarrollo de las líneas expuestas cuanto la experimentación e investigación con diferentes modelos.

El estudio de las “pérdidas iniciales” del método del Número de Curva deducidas de los datos de precipitación y escurrimiento es una tarea que aparece como aconsejable, considerando que gran parte del trabajo de base para este fin se encuentra ya ejecutado.

Las relaciones entre precipitaciones anteriores a un evento y Números de Curva límite para las condiciones de humedad antecedente AMC I y AMC III del método es también una línea a explorar.

El relevamiento detallado de las vías de escurrimiento naturales de la parte alta de la cuenca para su inclusión en los modelos hidrológicos es una tarea menor, pero no despreciable que debe ser considerada.

Se considera que el método del Antecedent Precipitation Index (API) puede ser explorado para mejorar los resultados presentados en esta tesis, procurando ajustar las ecuaciones involucradas a las condiciones locales.

En la línea de trabajo seguida por Boughton (1989) al mostrar que los valores de NC disminuyen cuando aumenta el tamaño de la cuenca, debido a altas pérdidas por transmisibilidad, sería también deseable explorar esa relación en las condiciones locales.

## LITERATURA CITADA

Agencia Córdoba Ambiente – INTA. 2006. Recursos naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Nivel de reconocimiento 1:500.000. Córdoba.

Agencia Córdoba D.A.C.Y T. S.E.M. Dirección de Ambiente – INTA Manfredi. 2003. Los Suelos. Nivel de Reconocimiento. Córdoba.

Agencia Córdoba D.A.C.y T. Dirección de Ambiente. 2003. Regiones naturales de la Provincia de Córdoba. Serie C. Publicaciones Técnicas. Córdoba.

Almorox Alonso J., R. De Antonio Garcia A., Saa Requejo M. C. y Diaz Alvarez J. M.1994. Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España.

Alonso F. J. y Bertoni J. C. 2005. Técnicas de calibración global de modelos hidrológicos: Estado del arte. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

Aoki Antonio M. 2002. Caracterización de las propiedades hidráulicas como indicadores de la calidad de un suelo haplustol típico de la Región Central de la Provincia de Córdoba. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Córdoba, Argentina, 117 pp.

Aoki A., Apezteguía H. y Sereno, R. 1996. Determinación de la infiltración con simulador de lluvia en suelos con diferentes manejos en la región central de la provincia de Córdoba, Argentina. XIII° Congresso Latinoamericano de Ciência do Solo. Aguas de Lindóia, SP - Brasil. 1996.

Aoki A. y Sereno R. 1999. Caracterización de la Conductividad Hidráulica de un Suelo Haplustol típico bajo condición de Monte Natural y de Monocultivo de Soja usando Infiltrómetro de Tensión. Resumen en Actas del XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, pág. 616. 1999.

Apezteguía H., Amaya H. y Crusta L.1987. Medición de pérdidas de suelo y disminución de los rendimientos de soja debidos a la erosión hídrica en la región Semiárida Central de Córdoba. Ciencia del Suelo 5(1):51-55.

Ateca M. R. 1997. Caracterización Agroclimática. Capítulo 2 en: Manual de Control de la Erosión Hídrica. Facultad de Ciencias Agropecuarias - SeCyT. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Ateca M. R. 2004. Aspectos agrometeorológicos de la dinámica del agua del suelo en una microcuenca de la región central de Córdoba. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela para Graduados. Córdoba, Argentina, 133 pp.

Auerswald K. and Haider J. 1996. Runoff curve numbers for small grain under german cropping conditions. Journal of Environmental Management (1996) 47, 223-228.

Australian Water Resources Council. 1971. Hydrology of small rural catchments. Res. Rep. 68/1. Final report, vol. 2. Report of analysis components. Canberra, Australia.

Beasley R.P., Gregory J.M. and Mccarty T.R. 1984. Erosion and sediment pollution control. Iowa State University Press. EEUU.

Beasley D., and Huggins L. F. 1991. ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) User's Manual Agricultural Engineering Department, Purdue University, West Lafayette, Indiana, EEUU.

Bertoni J. C. 1994. Modelación matemática de procesos hidrosedimentológicos en cuencas rurales. XV Congreso Nacional del Agua. La Plata, Argentina.

Beven K. J. y Kirkby M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24:43-69.

Boughton W. C. 1989. A review of the USDA SCS CN Method. Australian Journal of Soil Research 27, 511-523, Australia.

Bricchi E., Formía F. y Cisneros J. 1996. Relación entre la condición superficial y el régimen hídrico en un Haplustol Típico, bajo diferentes manejos. Actas del XIII Congreso Latinoamericano de Ciencia do Solo. Aguas de Lindoia, Brasil.

Bricchi E., Formía F., Cisneros J. y Cerioni G. 1999. Escurrimiento en un Haplustol típico con dos sistemas de labranzas. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile. Pp 628.

Bruce J. P. and Clark R. H. 1966. Introduction to hydrometeorology. Pergamon Press. Oxford. United Kingdom, pp 252-257.

Caamaño Nelly G., Di Benedetto H. M. y Zamanillo E. A. 1994. Hietogramas típicos de tormentas intensas en la Estación La Suela, Provincia de Córdoba. XI Congreso Nacional del Agua, La Plata, Argentina.

Caamaño Nelli G. y Dasso C. M. 2003. Lluvias de diseño. Conceptos, técnicas y experiencias. Ed. Universitas. Córdoba, Argentina. 2003.

Caamaño Nelli G. y Dasso C.M. 2005 Red regional de lluvias de diseño en la Provincia de Córdoba. Informe técnico Estación N° 74 Rafael García. Zona hidrometeorológica Centro. Departamento Santa María.

Castiglioni M. G., Chagas C. I., Massobrio M. J., Santanatoglia O. J. y Buján A. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. Ci. Suelo, Argentina, 24 (2) 169-176.

Castiglioni M. G., Massobrio M. J., Chagas C. I. y Santanatoglia O. J. 1998. Predicción de hidrogramas modificando el tiempo de concentración de una microcuenca de la Pampa Ondulada (Argentina) con pendientes menores al 2%. Ciencia del Suelo 16: 134-136.



Castiglioni M. G., Pujol, Massobrio M. J., Chagas C. I. y Santanatoglia O. J. 2004. Variación espacial de la tasa de infiltración de una microcuenca agrícola de pampa ondulada. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Argentina.

Chagas C.I., Santanatoglia O.J. y Rienzi E.A. 1993. Análisis del escurrimiento de una microcuenca utilizando distintas metodologías. Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal 8:177-190.

Chagas C.I., Santanatoglia O.J., Massobrio M., Castiglioni M.G. y Buján A. 1998. Influencia de las lluvias previas sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. Avances en el manejo del suelo y agua en la ingeniería rural latinoamericana. La Plata, Noviembre 1998.

Chagas C.I., Santanatoglia O.J., Massobrio M., Castiglioni M.G., Buján A. y Yáñez M. 2000. La energía cinética de las lluvias como condicionante de los pulsos de escurrimiento en una microcuenca de la Pampa Ondulada. Editorial Facultad de Agronomía. Bs. As. Argentina.

Chagas C. I., Santanatoglia O. J., Castiglioni M. G., Massobrio M. J., Buján A. e Irurtia C. 2006. Numero de curva de escurrimiento para una microcuenca bajo labranza convencional y siembra directa. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Argentina.

Cholaky C., Cisneros J., Uberto M., Vignolo C., Giayetto O. 2005a. Degradación-recuperación de la condición hidrofísica de Haplustoles/udoles del Sur cordobés manejados con siembra directa. Seminario Internacional sobre Indicadores de Calidad de Suelo. Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

Cholaky C. G., Reynero M. A., González J., Cisneros J. M., Degioanni A. y Cantero Gutiérrez A. 2005b. Avance de la erosión lineal y producción de sedimentos en los arroyos menores del sur de Córdoba. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

Chow V.T., Maidment D.R. y Mays L. W. 1994. "Hidrología Aplicada". Mc Graw Hill, USA.

Cisneros J. M., Cholaky C., Bricchi E., Giayetto O. y Cantero J. J. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. Rev. UNRC 17(1):13-22.

Cisneros J. M., De Prada J., Degioanni A., Cantero A., Gil H., Reynero M. A., Shah F., Bravo Ureta B. 2004. Erosion hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba: Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná

De Fina A. L. 1992. Aptitud agroclimática de la República Argentina. Ed. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, Buenos Aires, Argentina, 402 pp.

De Paco López-Sánchez. 1993. Fundamentos del cálculo hidráulico en los sistemas de riego y de drenaje. CENTER (Centro Nacional de Tecnología de Regadíos) Ed. Mundi-Prensa. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. IRYDA. Madrid.

Dolfo N., Degiovanni S. y Origlia D. 2005. Fenómenos de suflusión, colapso y erosión en obras hidráulicas situadas en los arroyos Del Gato y Las Lajas, Córdoba, Argentina. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza, Argentina.

Engman E. T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 112, Nº 1, February, 1986.

Esmoriz G., Ruiz Posse E., Croce A., Luque R. y Bertoni J. 2000. Comportamiento hidrológico de dos cuencas agrícolas en la Región Central de Córdoba. 11th International Soil Conservation Organization Conference. ISCO 2000, Buenos Aires, Argentina.

Esmoriz G. E., Luque R. L., Sereno R., Vettorello C. I., Ruiz Posse E. y Bertoni J. C. 2002a. Modelación del escurrimiento superficial en una microcuenca agrícola de Córdoba: Relaciones con estudios de campo. XIX Congreso Nacional del Agua. Carlos Paz, Argentina.

Esmoriz G. E., Luque R. L., Ruiz Posse E. J., Croce A. J. y Ateca M. R. 2002b. Comportamiento hidrológico de dos cuencas agrícolas bajo formas de manejo contrastantes en la región central de Córdoba, Argentina. XII Congreso Brasileiro de Agrometeorologia. Fortaleza, Brasil.

Foster, G. R. and L. J. Lane. 1987. User Requirements: USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP) NSERL Report N 1. West Lafayette, Indiana: USDA- ARS National Soil Erosion Research Lab.

Garen D. C. 1992. Improved techniques in regression-based streamflow volume forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, 118(6), 654-670.

Gómez Orea D. 1996. Evaluación de impacto ambiental. Editorial Agrícola Española SA, 2ª Ed., Madrid, España.

González J. G., 1999. Sistemas de información geográfica (SIG) y modelos hidrológicos: Articulación para el estudio de una cuenca representativa en Córdoba, Argentina. Tesis Magíster. Universidad Nacional del Comahue, Neuquen, Argentina, 212 pp.

Goodrich D. C. y Simanton J. R. 1995. Water research and management in semiarid environments. *Journal of Soil and Water Conservation*. 50(5): 416-419

Hawkins R. H. 1975. The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff. *Water Resources Bulletin*. American Water Resources Association. Vol 11 Nº 5. October, 1975.

Hawkins R. H. 1978. Runoff curve numbers with varying site moisture. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. American Society of Civil Engineers. Vol. 104, Dic 1978.

Hawkins R. H., Jiang R., Woodward D. E., Hjelmfelt A. T., Van Mullem J. A. 2002. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio.

Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada. U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado.

Hjelmfelt A.T. 1991. Investigation of curve number procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 117, 725-737.

Hjelmfelt A.T., Woodward, D.E., Connaway, G., Plummer, A., Quan, Q.D., Van Mullen, J., Hawkins, R.H. y Rietz, D. 2001. Curve Numbers, Recent Developments. Proc. 29th Congress of the Intl. Assoc. for Hydraulic Research. Beijing, China. <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/water/quality/wst.html>.

Hudson N. 1982. Conservación de suelos. Edición Española Ed. Reverte S.A. Barcelona.

Ibáñez J.J., Machado C., Zucarello V. y González Huecas C. 1995. Modelos de simulación y variabilidad espacio temporal. En: Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. Ed. Paz González, A. y Taboada Castro, M.T. Universidade Da Coruña. España. 1999.

Ibáñez J.J., Zinck J.A. y Jiménez-Ballesta R. 1993. Soil survey: Old and New Challenges. *ITC Journal* 1993-1, pag 7-14.

InfoStat. 2002. InfoStat. Versión 1.1/Profesional. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Primera Edición, Argentina.

Israelsen O.W. y V.E. Hansen. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Editorial Reverté S.A. Barcelona.

Izaurrealde, R.C., J.R. Williams, W.B. McGill, N.J. Rosenberg, and M.C. Quiroga Jakas. 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling* 192: 362-384.

King H.W. y Brater E. F. 1962. Manual de Hidráulica. UTAHA, México

Kirkby M. J., Bracken L. J. and Shannon J. The influence of rainfall distribution and morfological factors on runoff delivery from dryland catchments in SE Spain. 2005. *CATENA*, Vol. 62, Issue 2/3, p136-156.

Knisel W. G. 1980. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agriculturas management systems. Conservation Research Report N°26. South East Area. U. S. D A. Washington, D. C. EUA.

Lim Kyoung Jae, Engel B. A., Muthukrishnan S and Harbor J. 2006. Effects of Initial Abstraction and Urbanization on Estimated Runoff Using CN Technology. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 42(3):629-643.

Linsley R. K., Kohler M. A. and Paulhus J. M. 1982. Hydrology for engineers. McGraw-Hill, New York.

Lyon S. W., Walter M. T., Gérard-Marchant P. and Steenhuis T. 2004. Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS

curve number equation. Hydrological Processes. Published online: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com).

Luque, R.L., Torre, D y Negro, G. 1987. Plan básico de acción y mapa de suelos detallado del consorcio de conservación de Suelos Monte Grande. Dirección de Conservación de Suelos, MAGyRR Córdoba.

Luque R. L., Ruiz Posse E. J., Negro G. J., Esmoriz G. F., Croce A. J. y Bertoni J. C. 1996. Evaluación de los procesos hidrosedimentológicos típicos de la región agrícola central de Córdoba. IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural (CADIR 96) Neuquén, Argentina.

Luque R. L. 1997. Cap. 6: Prácticas estructurales. En: Sereno, R., Apezteguía, H. P., Ateca, M. R., Bertoni, J. C., Esmoriz, G. F., Luque, R. L., Mendoza Reinoso, R. I. y Porcel de Peralta, R. 1997. Manual de control de la erosión hídrica. Programa de Evaluación y control de la erosión hídrica. Secretaría de Ciencia y Tecnología – Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, pp. 1-58.

Luque R. L., Ruiz Posse E. J., Croce A. y Esmoriz G.F. 1998. Valores medidos y estimados del tiempo de concentración (TC) de una cuenca agrícola. XVIº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

Luque, R. L.; Croce, A.; Ruiz Posse, E. J. 1999. Comparación de valores medidos y estimados de Tiempo de Concentración (Tc) y Lámina de Escurrimiento (E) en una cuenca agrícola de la Región Central de Córdoba. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile.

Luque R L y Esmoriz G. 2006. Variación de coeficientes de una regresión para predecir escorrentía en una cuenca agrícola. XX Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo. Salta. Sept 2006.

Luti R., Bertrán de Solís M. A., Galera F. M., Muller de Ferreira N., Berzal M., Nores M., Herrera M.A. y Barrera J. C. 1977. Capítulo 6: Vegetación. En: Geografía física de la Provincia de Córdoba. Vázquez, J. B., Miatello, R. A., Roqué, M. E. (Ed.). Boldt, Córdoba, Argentina, pp 297-368.

MAGyRR. 1987. Acta de constitución del Consorcio de Conservación de Suelos "Monte Grande", Distrito de Conservación de Suelos Jesús María, Córdoba.

Marelli H. 1989. La erosión hídrica. Publicación técnica N° 1. INTA Marcos Juárez, 20pp.

Marelli H. J. 1997. La siembra directa como práctica conservacionista. En: Siembra directa. Panigatti, J. L., Marelli, H., Buschiazzo, D. y Gil R. (eds.). SAGPyA, INTA y Hemisferio Sur, Buenos Aires, pp. 127-140.

Marelli H. 1998. En Panigatti J.L., Marelli, H., Buschiazzo D., y R. Gil. Siembra Directa. Cap 9. S. A. G. P. y A., INTA, Ed. Hemisferio Sur. May 1965.

Marelli H. 2004. Conservación sustentable de suelo y agua. Informe proyecto PICTOR.

Marano R. y Micheloud H. 2005. Determinación de valores de CN para la región central de la provincia de Santa Fe. XX Congreso Nacional del Agua, III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, CONAGUA 2005, Mendoza.

Maza J. A., Fornero L., Litwin C. y Fernández P. 2000. Arhymo. Versión 2.0, INCyTH-CFI, Argentina.

Mendoza Reinoso R. I. y Porcel de Peralta R. F. 1997. Caracterización de los suelos. Capítulo 2. En: Manual de control de la erosión hídrica. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Secretaría de Ciencia y Tecnología, UNCba, Córdoba.

Michelena R. 1986. El uso de modelos hidrológicos en el estudio de los recursos hídricos. INTA Castelar, Año 3 N° 22.

Michelena R. 1998. Degradación de tierras, concepto de calidad y salud, metodología de evaluación de la degradación. En: Suelos II: Utilización de la información de suelos para el uso sustentable de las tierras, INTA Programa nacional de suelos, Buenos Aires, pp. 33-42.

Moliner L. M. 2002. Métodos autosuficientes de estimación y contraste de hipótesis. Utilización de la simulación y el método de Monte Carlo en bioestadística. Asociación de la Sociedad Española de Medicina, <http://www.seh-lelha.org/randomization.htm>.

Morgan R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 343 pg.

Moscateli G. M. 1990. Atlas de suelo de la República Argentina. S.A.G.y P, INTA. Proyecto PNUD ARG, 85/019, Argentina, Tomo I, pp 393-511.

National Engineering Handbook. 1981. Section 4, Hydrology. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, Washington, USA.

Núñez Vázquez F., Salas H. P., Bachmeier O., Robledo W., Lovera E. F. y Rollán, A. 1996. Labranzas en la región central de la Provincia de Córdoba. En: Labranzas en la región semiárida argentina. Buschiazzi, D. E., Panigatti, J. L. y Babinec F. J. (eds.) Extra, Santa Rosa, La Pampa, pp 49-66.

Palacios A. 1990. Jornadas Taller sobre La Problemática del Agua. Dimensión Ambiental, Legislativa y Educativa. U.N.C. Córdoba.

Paz González A. y Taboada Castro M.T. 1999. Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. Jornadas internacionales sobre erosión hídrica. Editores: Antonio Paz González y Ma. Teresa Taboada Castro. Edición: Universidade da Coruña. España.

Perrone J. and Madramootoo C.A. 1998. Improved curve number selection for runoff prediction. Canadian Agricultural Engineering. 25:728 – 734.

Pilgrim D. H. and Cordery I. 1993. Flood runoff. Handbook of Hydrology (Ed. by D. R. Maidment), 9.1-9.42, McGraw-Hill Inc. New York, USA.

Remenieras G. 1974. Tratado de hidrología aplicada. 2ª Ed. Editores Técnicos Asociados, S. A. Barcelona, España.

Riccardi G., Scuderi H. y Stenta. 2002. Modelado del escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe . Centro universitario de Rosario de Investigaciones hidroambientales, Facultad de ciencias exactas y agrimensura. Conagua 2002.

Romero L., Esmoriz G. F., Apezteguía H., Sereno R., Aoki A., Ateca M., Mendoza R. y Robledo W. 1995. Caracterización de una microcuenca sembrada con soja de la región semiárida Central de la Provincia de Córdoba (Argentina). Agriscientia. N° 12, 59-66.

Romero L.E., Moyano M.A., Sereno R., Apezteguía H.P., Aoki A.M., Esmoriz G. F., Ateca M. R., Mendoza R. y Bertoni J. C. 1996. Estimación del escurrimiento y de pérdidas de suelos en una microcuenca agrícola. XV° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Santa Rosa, La Pampa.

Ruiz Posse E.J., A., Risso J.C. Nunes y Haertel V.. 1996. Delimitación automática de cuencas en un área de la Provincia De Córdoba, Argentina. XV Congreso Argentino de la Ciencias Del Suelo. Santa Rosa, La Pampa. pág. 287-288.

Ruiz Posse E., Croce A. y Luque R. L. 1997. Capítulo 2: Caracterización de los parámetros de la cuenca. Informe final SeCyT 89/96. Comisión Agronomía. Proyecto: Estudios de erosión hídrica y dinámica del agua en una subcuenca de la cuenca Rafael García – Lozada.

Santanatoglia O. J., Chagas C. I., Rienzi E. A., Castigioni M. G., Massobrio M. J. y Buján A. 1996. Comportamiento hidrológico de una microcuenca en pampa ondulada en condiciones de suelo seco. IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural. CADIR 96, Neuquén, Argentina. Octubre de 1996.

SAGyP y CFA (Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca y Consejo Federal Agropecuario). 1994. El deterioro de las tierras en la República Argentina. Alerta amarillo. Ed. Consejo Federal Agropecuario. Buenos Aires, Argentina.

Schneider L.E. and McCuen R. H. 2005. Statistical Guidelines for Curve Number Generation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 131, No. 3, May/June 2005, pp. 282-290.

Scotta E.S. 1995. Sistematización de tierras para control de erosión hídrica y agua superficial excedente. Manual metodológico simplificado .EEA Paraná. INTA.

Schwab G., Frevert R., Edminster T. and Barnes K. 1966. Soil and water conservation engineering. Ed. J. Wiley, Inc. N. Y., 683 pp.

Sereno R., Apezteguía H. P., Ateca M. R., Bertoni J. C., Esmoriz G. F., Luque R. L., Mendoza Reinoso R. I. y Porcel de Peralta R. 1997. Manual de control de la erosión hídrica. Programa de Evaluación y control de la erosión hídrica. Secretaría de Ciencia y Tecnología – Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.

Silva C. L. y Oliveira C. A. S. 1999. Medición y simulación del escurrimiento superficial para una microcuenca hidrográfica con vegetación natural localizada en el centro oeste brasileiro. *Revista Brasileira de la Ciencia del Suelo*. 23:695-701.

Silveira L., Charbonnier F. y Genta J. L. 2000. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. *Hydrological Sciences. Journal des Sciences Hydrologiques*. 45 (1) February 2000.

Stamati M., Parmuchi M. G., Strada M., Bono J., Montenegro C., Manghi E. y Brouver M. 2004. Mapa forestal provincia de Córdoba. Actualización 2004. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y desarrollo Sustentable. Ministerio de Salud. República Argentina.

Steenhuis T. S., Winchell M., Rossing J., Zollweg J. A. y Walter M. F.. 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. May/June 1995.

Tucci C. E. 1993. Hidrología, Ciencia e Aplicação. Cap. 11. Escoamento Superficial. Ed. UFRGS. Porto Alegre. Brasil.

U.S. Army Corps of Engineers. 2006. HEC-HMS.

USDA-SCS (U. S. Department of Agriculture - Soil Conservation Service). 1972. Curve Number Method. Washington, D. C.

Vettorello C., Aoki A. y Esmoriz G. 2006. Parámetros físicos, químicos e hidrológicos en un haplustol con diferentes manejos. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina.

Viglizzo E. F. y Roberto Z. E. 1998. On trade-offs in low-input agroecosystems. *Agricultural systems* 56:253-264.

Weibull W. 1939. A statistical theory of strength of materials. *Ing. Vetenskaps Acad. Handl.* Vol. 151. Estocolmo, Suecia.

Valcárcel A., Montserrat, Paz González A., Dafonte J. y Taboada Castro M. T. 1999. Importancia de las prácticas agrícolas en el control de procesos erosivos y evaluación mediante modelos de la incidencia de las mismas. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. Ed. Paz Gonzales, A. y Taboada Castro, M.T. Universidade Da Coruña. España. 1999.

Weir E. y Marelli H. 1983. Cap V: Prácticas estructurales de control de la erosión hídrica. En: *Técnicas de Conservación de Suelos. Prácticas conservacionistas para el sector Este de la cuenca del Río Carcarañá*. INTA. EERA Marcos Juárez, Serie Suelos y Agroclimatología N° 3.

Woodward D. E., Hawkins R. H., Jiang R., Hjelmelt A. T., Van Mullem J. A. and Quan, D. Q. 2002. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. Natural Resources Conservation Service, Water and Climate Center.

Woodward D. E., Hawkins R. H., Jiang R., Hjelmfelt A. T. Jr., Van Mullem J. A., and Quan, Q. D. 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Conference Proceeding Paper. World Water & Environmental Resources Congress.

Yoo K. H., Yoon K. S. and Soileau J. M. 1993. Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillages. Transactions of the ASAE 36 (1): 57-63.

Young R. and Onstad C. A. 1994. Agricultural Non-Point Source Pollution Model, Version 4.03 AGNPS User's Guide. USDA-ARS North Central Soil Conservation Research Laboratory Morris MN . USA.

Zamora E. M. y Jarsun B. A.. 1985. Mapa de Erosión de la Pcia de Córdoba. Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Córdoba. Convenio INTA/SMAG y RR. Dirección de Recursos Renovables.

Zucarelli et al. 2005. Estimación de la retención potencial máxima de humedad en el suelo del método del CN en la cuenca del Arroyo Feliciano. XX Congreso Nacional del Agua. III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur.CONAGUA 2005. Mendoza, Arg.



## SECCIÓN QUINTA

### ANEXOS

#### ANEXO 1

##### SUELOS DE LA CUENCA

Se presenta en este anexo un detalle de los estudios de suelos realizados, como continuación y según se adelantara en el título "Suelos de la cuenca" de pág. 44.

##### DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS

###### **Unidad A:**

Composición: Argiustoles y Haplustoles típicos.

Es un área relativamente plana y alta ubicada dentro de la denominada Depresión Periférica (Capitanelli, 1978) que derrama sus aguas en forma muy lenta hacia los terrenos del Consorcio Monte Grande a través de dos pasos bien definidos ubicados entre los cerrillos correspondientes al borde oriental de la Depresión Periférica u occidental de la Pampa Alta. (Véase ubicación en el mapa de Figura II-1 y en el perfil idealizado T-T' de la Figura II.13).

Esta pequeña porción de la depresión periférica tiene un escurrimiento poco definido con pendientes estimadas en 0.5%.

Los suelos se caracterizan por estar desarrollados sobre materiales eólicos de textura franco limosa identificados como Argiustoles y Haplustoles típicos en proporciones aproximadamente similares. La descripción de campo de los mismos corresponde a la de las series Los Talas y Rafael García respectivamente.

No se advierten fenómenos erosivos de magnitud, aún donde se produce la concentración del escurrimiento hacia el Este a través de los cerrillos indicados anteriormente.

###### **Unidad B:**

Composición: Haplustoles énticos.

Son unidades pertenecientes a cerrillos o montículos muy conspicuos que constituyen el límite entre la Depresión Periférica y la Pampa Alta. Están orientados de Norte a Sur paralelo a las sierras del Oeste con pendientes dominantes (hacia el Este y al Oeste) de clase 3 (entre 3 y 10%) y escurrimiento medio a rápido.

Los suelos se han desarrollado incipientemente sobre depósitos eólicos (loess) de textura franco limosa con perfiles del tipo A-AC-C. Existe peligro muy evidente de erosión hídrica y en cuanto a la actual, depende del laboreo a que han sido sometidos los suelos.

Todos los perfiles estudiados en estas unidades responden a la clasificación de Haplustoles énticos y la descripción responde a la Serie Los Cerrillos.

### **Unidad C:**

Composición: Haplustoles énticos dominantes y Haplustoles y Argiustoles típicos subordinados.

Estos ambientes corresponden al borde occidental de la Pampa Alta con gradientes hacia el Este que oscilan entre 1 y 3%. Incluye también un par de pequeñas unidades similares en forma de lomas aisladas dentro de los predios del Consorcio Monte Grande.

Los suelos dominantes son Haplustoles énticos (ver descripción de campo de la serie Los Cerrillos) desarrollados sobre materiales loéssicos franco limosos. Existen además, pequeñas vías de desagües y paleocauces en proporción mucho menor donde se ubican los Argiustoles típicos y Haplustoles típicos (series Los Talas y Rafael García respectivamente).

Esta unidad, además de tener la pendiente propia (1 a 3%), recibe en gran parte el escurrimiento de la unidad anterior y los fenómenos erosivos se manifiestan en forma ligera a moderada en forma de surcos y zanjas de cierta magnitud, especialmente donde se concentra el escurrimiento en las vías de desagüe y algunos paleocauces. Hacia el Este los gradientes disminuyen próximos a la unidad siguiente.

### **Unidad D:**

Composición: Argiustoles típicos y Haplustoles típicos subordinados.

Esta unidad cartográfica corresponde a pendientes regionales muy suavemente inclinadas hacia el Este con un gradiente estimado entre 0.5 y 1%. Tiene escurrimiento medio que se distribuye homogéneamente o bien en forma de pequeñas escorrentías que forman zanjas o pequeños surcos (erosión ligera a moderada).

Los materiales originarios de los suelos son mixtos preferentemente los del tipo eólico en los haplustoles típicos (ver descripción de la serie Rafael García) y el fluvial con desarrollo de Argiustoles (ver descripción de la serie Los Talas).

Esta unidad esta caracterizada muy particularmente por la presencia de pequeños paleocauces de pocos metros de ancho que se disponen de Oeste a Este en forma de derrames donde dominan los Argiustoles con horizontes superficiales engrosados.

### **Unidad E:**

Composición: Argiustoles típicos y Haplustoles típicos subordinados.

Es un pequeño ambiente del Este que tiene la particularidad de ser mas aplanada que la unidad anterior: las pendientes, hacia el Este también raramente superan el 0.5% y tiene una mayor proporción de Argiustoles (ver descripción de la serie Los Talas).

## **DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES DE SUELOS DE LA CUENCA MONTE GRANDE**

### **Serie Los Cerrillos (tentativa)**

La serie Los Cerrillos es un suelo débilmente desarrollado sobre materiales originarios exclusivamente de origen eólico (loess franco limoso). El relieve dominante es ondulado con gradientes que oscilan entre 0.5 y 3%.

Tiene un horizonte superior (A1 o capa arable) de 23 cm de espesor, color pardo grisáceo muy oscuro, con estructura en bloques subangulares moderados y textura franco limosa. Le sigue un horizonte de transición (AC) que llega hasta los 45 cm. El horizonte C o material originario sigue a continuación. Es franco limoso y presenta calcáreo libre distribuido en la masa del suelo a partir de los 70 cm. Esta serie no tiene álcalis ni sales en ningún horizonte.

#### Descripción del Perfil Típico

El perfil representativo de los suelos de esta serie fue descrito en una loma ondulada en la parte occidental del predio del Sr. Esmoriz bajo cobertura de monte.

A1: 0 - 23 cm: Color en húmedo 10YR3/2, textura franco a franco limosa, estructura en bloques subangulares medios moderados a fuertes, friable en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, pH 6 raíces muy abundantes, límite inferior claro suave.

AC: 23 - 45 cm: Color en húmedo: 10YR3/3; textura franco limosa, estructura en bloques subangulares débiles, tendencia masiva, friable en húmedo, ligeramente plástico, no adhesivo, PH 7.5, raíces abundantes, límite inferior gradual.

C1: 45 - 70 cm: Color en húmedo 7,5 YR4/4, textura franco limosa, estructura masiva (sin estructura), no plástico, no adhesivo, PH 7.7 raíces escasas, límite inferior abrupto ondulado.

C2Ca: 70 cm a más: Color en húmedo 7.5YR4,5/4, textura franco limosa, estructura masiva a suelta, friable en húmedo, no plástico, no adhesivo, pH 8.7, violenta reacción al CIH en la masa del suelo, vestigios de raíces de árboles.

Clasificación taxonómica: Haplustol éntico. Franca gruesa mixto térmica.

Clasificación por capacidad de uso: Illec.

Limitaciones principales:   Clima (moderada)  
  Moderada retención de humedad  
  Susceptibilidad a la erosión hídrica (zanjas y laminar).

Paisaje: Lomas onduladas o pendientes locales dentro de la Pampa Alta.

Material Originario: Loess franco limoso.

Relieve: Normal.

Pendiente: 0.5 a 3%.

Escurrimiento: Medio.

Permeabilidad: Moderada.

Erosión: Ver fases.

Drenaje: Bien drenado a algo excesivo.

Peligro de anegamiento: No presenta.

Fases reconocidas: a) Ligeramente erosionada por agua (H1).

b) Moderadamente erosionada por agua (H2) laminar y surcos.

### **Serie Rafael García (tentativa)**

Es un suelo desarrollado en pendientes regionales suavemente inclinadas de la Pampa Alta sobre materiales originarios eólicos con influencia fluvial.

Presenta un horizonte superior o capa arable de 20 cm de espesor, de color pardo grisáceo muy oscuro. textura franco limosa y estructura en bloques. Le sigue hasta 41 cm un horizonte ligeramente enriquecido en arcilla (horizonte B2 no textural) con estructura en bloques tendencia a prismas. El material originario (C), es franco limoso y comienza a los 58 cm de profundidad. El calcáreo libre aparece a partir de 80 cm. Esta serie no tiene alcalinidad ni salinidad en ninguno de sus horizontes.

#### Descripción del Perfil Típico

El perfil típico de los suelos de esta serie fue descrito en el predio del Sr. Esmoriz, en una pendiente regional con 0.5% de gradiente aproximadamente.

A1: 0 - 20 cm: Color en húmedo 10YR3/2, textura franco limosa, estructura en bloques subangulares medios moderados, friable en húmedo, ligeramente plástico, no adhesivo, pH 7,6 raíces abundantes, límite inferior claro suave.

B2: 20 - 41 cm: Color en húmedo 10YR3/3, franco a franco arcilloso, estructura en bloques subangulares medios tendencia prismática, friable en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. pH 7,4; barnices húmico arcillosos escasos a comunes finos, raíces escasas, límite inferior gradual.

B3: 41 - 58 cm: Color en húmedo 10YR4/4, textura franco a franco limosa, estructura en bloques débiles, friable en húmedo, ligeramente plástico, no adhesivo, pH 7.4; barnices arcillosos escasos a vestigios y finos. raíces escasas, límite inferior gradual.

C1: 58 - 75 cm: Color en húmedo: 7.5YR4/4, textura franco limosa a franca, estructura masiva (sin estructura), friable en húmedo, no plástico, no adhesivo, pH 7.5, vestigios de raíces.

C2Ca a 80 cm a más: Color en húmedo 7.5YR4,5/4, textura franco limosa, estructura masiva, friable en húmedo, no plástico, no adhesivo, pH 8,8 reacción violenta al CLH en la masa del suelo.

Clasificación taxonómica: Haplustol típico. Franca fina mixto térmica.

Capacidad de uso: Ilec (el perfil modal sin erosión).

Limitaciones principales: - Clima. Susceptibilidad a la erosión hídrica en surcos y zanjas.

Paisaje: Pendientes regionales suavemente inclinadas.

Material originario: Loess con ligera influencia fluvial franco limoso.

Relieve: Normal.

Pendiente: 0.5% dominante.

Escurrimiento: Medio.

Permeabilidad: Moderada.

Erosión: Ver fases.

Drenaje: Bien drenado.

Peligro de anegamiento: No presenta.

Profundidad de la napa: Profunda.

Sales o álcalis: No presenta.

Fases reconocidas: - Ligeramente erosionada por agua (H1) Zanjas.  
-Moderadamente erosionada por agua (H2). Zanjas.  
-Severamente erosionada por agua (H3). Zanjas.  
-Poco inundable (violenta, caudal importante y esporádico de corta duración)

### **Serie Los Talas (tentativa)**

Es un suelo bien desarrollado que tiene una amplia distribución en la Pampa Alta en la Provincia de Córdoba. Se ha desarrollado sobre materiales fluviales finos de textura franco limosa a franca.

Presenta un horizonte superior (capa arable) de 22 cm de espesor, color muy oscuro con estructura en bloques moderados. Le sigue un horizonte enriquecido en arcilla (B2 textural) con muy buena capacidad de retención de humedad; de textura franco arcillosa con agregados prismáticos. El material originario comienza a 70 cm y a 90 cm aparece el material calcáreo pulverulento distribuido en la masa.

#### Descripción del Perfil Típico

El perfil representativo de esta serie fue descrito en una pendiente regional en el predio del Sr. Esmoriz.

A1: 0 - 22 cm: Color en húmedo 10YR3/2, franco limoso, estructura en bloques subangulares medios moderados, friable en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, pH 7,1; raíces muy abundantes, límite inferior claro suave.

B2t: 22 - 50 cm: Color en húmedo 10YR3/2, textura franco arcillosa a franco arcillo limosa, estructura en prismas irregulares medios moderados, friable en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, pH 7,3; barnices medios a finos abundantes en las caras de los agregados, raíces abundantes, límite inferior gradual suave.

B3: 50 - 70 cm: Color en húmedo: 10YR4/4, textura franco limosa, estructura en bloques gruesos débiles a moderados, friable en húmedo, ligeramente plástico, no adhesivo, pH 7,1; barnices arcillosos escasos y finos, raíces comunes, límite inferior gradual suave.

C1: 70 - 90 cm: Color en húmedo 7,5YR4/4, textura franco limosa, masivo, friable en húmedo, no plástico, no adhesivo, pH 7,5, raíces escasas, límite inferior abrupto ondulado.

C2Ca: 90 cm a más: Color en húmedo 7,5YR5/4, franco limoso, masivo, friable en húmedo, no plástico, no adhesivo, pH 8,9; violenta reacción al CIH en la masa del suelo.

Clasificación taxonómica: Argiustol típico. Franca fina mixta térmica.

Capacidad de Uso: Ilec (modal).

Limitaciones principales: Clima. Susceptibilidad a la erosión hídrica (zanjas) especialmente paleocauces y canalículos.

Paisaje: Pendientes regionales suaves.

Materiales originarios: Fluviales franco limosos.

Relieve: Normal o suavemente deprimido con gradiente suave.

Pendiente: 0.5% aproximadamente.

Escurrimiento: Medio.

Permeabilidad: Moderada.

Erosión: ver fases.

Drenaje: Bien drenado.

Peligro de anegamiento: No presenta (salvo la fase).

Profundidad de la napa de agua: Profunda.

Sales o álcalis: No presenta.

Fases reconocidas para la serie:

- Ligeramente erosionada por agua (H1). Zanjas o surcos.
- Moderadamente erosionada por agua (H2). Zanjas o surcos.
- Severamente erosionada por agua (H3). Zanjas o surcos.
- Poco inundable: inundaciones cortas y violentas (a4).
- Engrosada o acumulada: Horizonte superior que puede tener

10 cm aproximadamente.

## ANEXO 2

### PROCESAMIENTO DE LLUVIAS PARA CADA SUBCUENCA

La siguiente planilla es para ejemplificar el procedimiento de dar peso a la precipitación en cada subcuenca de la Cuenca Grande según el área de influencia de cada pluviógrafo (Tabla V.1) y de acuerdo a lo explicado bajo el título "Precipitación ponderada" de pág. 54. Ha sido discontinuada a partir de las 02:30 hs. porque sólo se pretende mostrar el cálculo de los registros como fueron utilizados en el programa Arhymo.

Las láminas de precipitación de las columnas 2 y 3 son ponderadas por la superficie que corresponda según fecha (tercera y cuarta filas) y subcuenca (Figura II.10). En negrita se destaca qué lámina corresponde a cada subcuenca. Para las subcuencas 1 y 2 corresponde utilizar las precipitaciones de las columnas 4 y 5 respectivamente, mientras que para el resto de las subcuencas corresponden los registros del pluviógrafo Este.

Tabla V.1- Ponderación de precipitaciones para el modelo Arhymo

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
			Pluv. Oeste	Pluv. Este		
Sup de c/pluv antes del 28/10/99:			260	610		
Sup de c/pluv después del 28/10/99:			550	320		
Pluviógrafo C Grande en Los Cerrillos					AMC	AMC
Lluvia del 12 - Dic - 97					PG	pch
Para las subcuencas 1 y 2: Lluvia ponderada de Tabla					70.5	55.6
Para todas las demás: pluviógrafo Este (E)						
					AMC pond:	
Tabla 1:					301	67 (III)
Pluviógr	Pluv. Oeste	Pluv. Este	PP Subc 1	PP Subc 2	302	57.9 (III)
Subc 1 (Ha)	245	80	ponderada	ponderada	resto:	55.6 (III)
Subc 2 (Ha)	18	97				
Hora	mm	mm	mm	mm		
00:20	0.5	0	0.4	0.1		
00:30	0.5	0.2	0.4	0.2		
00:40	0.5	0	0.4	0.1		
00:50	0	0	0.0	0.0		
01:00	0	0.2	0.0	0.2		
01:10	0	0	0.0	0.0		
01:20	0	0	0.0	0.0		
01:30	0	0	0.0	0.0		
01:40	0.5	0	0.4	0.1		
01:50	0.5	0.2	0.4	0.2		
02:00	0	0.2	0.0	0.2		
02:10	0.5	0.4	0.5	0.4		
02:20	1	2.8	1.4	2.5		
02:30	1.5	3	1.9	2.8		



## ANEXO 3

### EJEMPLO DE PLANILLA DE CÁLCULO DE NC PONDERADA

Según se explicó en el título “NC ponderada” de pag. 68, en la siguiente tabla (Tabla V.2), en la columna 2 figuran los números de lote presente en una subcuenca. La columna 3 muestra la superficie del lote que corresponde a la subcuenca, ya que hay lotes que pertenecen a más de una subcuenca. El NC de cada lote figura en la columna 4 y en la columna 6, el NC de la subcuenca correspondiente a la condición de humedad AMC II, y debajo los NC correspondientes a las condiciones AMC I y AMC III. En este ejemplo, según los registros pluviográficos, a todas las subcuencas les corresponde AMC III, excepto a la subcuenca 2, que le corresponde AMC II (en negrita).

Tabla V.2 - NC ponderada para el evento del 12-12-97

NC DE CADA SUBCUENCA PONDERADA POR LOTES						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
Subcuen	Lote	Superficie	NC AMC II		NC Subc	
1	310	46.33	83			
	310	48.99	83			
	360	23.69	78			
	370	93.20	78			
	320	70.49	78			
	221 c	18.72	78	ANC II:	79	
	211	20.92	78	AMC I:	62	
		322.33	25618	AMC III:	<b>91</b>	
2	370	2.20	78			
	320	11.11	78			
	331	40.31	91			
	41	2.86	91			
	332	9.12	58			
	340	6.98	55			
	221 a	26.51	84			
	213	3.60	78	AMC II:	<b>81</b>	
	310	7.92	78	AMC I:	65	
		111	9005	AMC III:	92	
3	41	2.69	91			
	230	28.78	78			
	221 b	33.59	78			
	213	3.64	78			
	222	3.30	78			
	42	38.72	91			
	52	11.58	78			
	332	1.68	58	AMC II:	77	
	340	29.33	55	AMC I:	59	
		153	11788	AMC III:	<b>90</b>	

NC DE CADA SUBCUENCA PONDERADA POR LOTES (cont)					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Subcuen	Lote	Superficie	NC AMC II		NC Subc
4	213	5.19	78		
	212	31.38	78		
	113	30.80	60		
	112	9.52	73	AMC II:	70
	exced 110	3.70	73	AMC I:	50
		80.58	5665	AMC III:	<b>86</b>
5	101	42.70	73		
	102	42.00	73		
	103	41.90	73	AMC II:	73
	104	21.68	73	AMC I:	54
		148.28	10824	AMC III:	87
Subcuen	Lote	Superficie	NC AMC II		NC Subc
6	108	6.33	58	AMC II:	70
	109	25.59	73	AMC I:	50
		31.92	2235	AMC III:	<b>86</b>
				AMC II:	91
7 y 8	110	9.30	91	AMC I:	81
		9.30	846.3	AMC III:	<b>97</b>
				AMC II:	73
9	110 b	18.40	73	AMC I:	54
		18.40	1343.2	AMC III:	<b>87</b>
		874.73			
NC PONDERADA POR SUBCUENCAS					
El AMC es el que le corresponde a cada subcuenca.					
	SUBCUE	AREA	NC		
		Km <sup>2</sup>			
	1	3.22	91.1		
	2	1.11	81.4		
	3	1.53	89.7		
	4	0.81	85.9		
	5	1.48	87.5		
	6	0.32	85.7		
	7	0.09	96.8		
	9	0.18	87.5		
	Sup Tot=	8.748			
		NC Pond=	<b>88.3</b>		

## ANEXO 4

La presente planilla (Tabla V.3) muestra el cálculo de la lámina escurrida para un evento, según se tratara bajo el título "Esguerrimiento observado" de pág. 69. Los registros de la columna 2 son transformados a caudales según la tabla (que no se presenta) que diera origen a la curva Altura Caudal de la Figura II.22 de pág. 57. Estos caudales figuran en la columna 3. En la columna 5 figuran los volúmenes escurridos para cada intervalo de los tiempos de la columna 1. Al final de la tabla se muestra la lámina escurrida, como cociente entre el volumen escurrido y la superficie de la cuenca. Los caudales máximos también se obtienen de esta tabla.

### EJEMPLO DE PLANILLA DE CÁLCULO DE CAUDALES Y LÁMINA

Tabla V.3- Planilla de cálculo de caudales y lám resultante para la cuenca grande

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hora	LG (m)	Q (m3/s)	t en seg/dia	m3/inter de t	
****	****	****	****	****	
0:15	0.054	0.027	692100	8	
0:20	0.052	0.023	692400	7	
0:30	0.049	0.019	693000	13	
0:40	0.046	0.015	693600	10	
0:50	0.043	0.012	694200	8	
1:00	0.040	0.009	694800	6	
1:10	0.172	0.558	695400	170	
1:15	0.176	0.590	695700	172	
2:00	0.172	0.558	698400	1550	
2:20	0.165	0.503	699600	636	
3:00	0.151	0.404	702000	1089	
3:05	0.149	0.391	702300	119	
3:10	0.147	0.378	702600	115	
3:15	0.145	0.366	702900	112	
3:20	0.143	0.354	703200	108	
3:25	0.141	0.342	703500	104	
3:30	0.139	0.330	703800	101	
3:35	0.137	0.318	704100	97	
3:40	0.135	0.307	704400	94	
3:45	0.133	0.296	704700	90	
3:50	0.131	0.285	705000	87	
3:55	0.129	0.274	705300	84	
****	****	****	****	****	
				9810	m3 totales
				1.13	lam (mm)

## **ANEXO 5**

### **MÉTODO DEL NC – SCS**

Se trata de un método empírico, adecuado para estimar el escurrimiento en cuencas reducidas de hasta aproximadamente 800 ha. Estima tanto lámina escurrida como picos de descarga.

Resume las condiciones de la cuenca para la producción de escurrimiento en un Número de Curva (NC) que se determina en función de los siguientes parámetros:

Uso del suelo.

Discrimina entre diferentes formas de aprovechamiento: monte, pastizal, distintos tipos de cultivos, etc.

Tratamiento o prácticas de manejo.

Considera la presencia de diferentes prácticas conservacionistas.

Condición hidrológica.

Características del suelo referidas a su capacidad de infiltración y producción de escurrimiento.

Humedad antecedente.

Tipo de tormenta.

Pendiente.

Estos dos últimos ítems, para el cálculo de caudales máximos, cuyo cómputo puede efectuarse mediante el uso de nomogramas o de programas computacionales (TR 55).

#### **Características del suelo referidas a su capacidad de infiltración y producción de escurrimiento**

Considera cuatro clases hidrológicas de suelos: A, B, C y D en orden decreciente de permeabilidad, según puede observarse en la Tabla V.4.

Tabla V.4- Clases hidrológicas de suelos y sus características

Grupo Hidrológico	Características del escurrimiento e infiltración	Características del perfil
A	Bajo potencial de escurrimiento Alta infiltración	Suelos profundos, bien o excesivamente drenados; usualmente con gravas, gravillas, mantos de arena, etc.
B	Potencial medio de escurrimiento Infiltración moderada a buena	Suelos moderadamente profundos; sin barreras físicas importantes; materiales más finos que arenas.
C	Potencial moderado alto de escurrimiento Infiltración baja	Poseen capas u horizontes que restringen la infiltración y transmisión hídrica.
D	Alto potencial de escurrimiento	Suelos someros; o con tabla de agua alta; o presencia de materiales pesados o impermeables que transmiten mal el agua.

### Humedad antecedente

Los cuatro anteriores parámetros se utilizan para determinar el NC en una condición media de humedad antecedente (AMC II).

Según las precipitaciones acumuladas en los cinco días anteriores al evento considerado, se asume que el suelo está en condición de humedad antecedente seca, media o húmeda (AMC I, AMC II ó AMC III). Los límites de precipitación acumulada entre estas tres condiciones varían según que sea estación de crecimiento o período de latencia del cultivo, según se muestra en la Tabla V.5.

Tabla V.5 - Condición de humedad antecedente según precipitaciones anteriores

Precipitación (mm) acumulada durante los 5 días anteriores al evento		Condición de AMC
Estación de crecimiento de la vegetación	Temporada de reposo o latencia	
Menos de 35.5	Menos de 12.7	AMC I
Entre 35.5 y 53.4	Entre 12.7 y 28	AMC II
Más de 53.4	Más de 28	AMC III

Fórmula de cálculos

Para el cálculo de la lámina escurrida el SCS utiliza la fórmula:

$$Lám = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Ec 0.1}$$

donde:

Lám : Lámina escurrida

P: precipitación considerada

I<sub>a</sub>: Retención inicial del escurrimiento. Incluye la retención superficial + intercepción por la vegetación + infiltración en el terreno previa a la iniciación del escurrimiento.

S: Máxima retención potencial de agua por el terreno.

El método supone que:

$$I_a = 0.2 S \quad \text{Ec 0.2}$$

Es decir que la retención superficial + intercepción por la vegetación + infiltración previa a la iniciación del escurrimiento es considerada como el 20 % de la capacidad máxima de retención de agua por el terreno.

Reemplazando V.2 en V.1 se tiene:

$$Lám = \frac{(P - 0.2S)}{(P - 0.2S) + S} \quad \text{Ec 0.3}$$

De donde:

$$Lám \equiv \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec 0.4}$$

De esta expresión se destaca la importancia de S. Este coeficiente depende de:

La AMC, es decir el estado de humedad del terreno.  
El grupo hidrológico de suelo.  
El uso y manejo de la tierra.

Su valor varía entre cero (nula retención y máximo escurrimiento) e infinito (situación inversa) y está relacionado con el NC de AMC II, según la siguiente expresión:

$$NC = \frac{25400}{254 + S} \quad \text{Ec 0.5}$$

Si S vale cero, NC es igual a 100, máximo valor que puede tomar para el cálculo del escurrimiento.

## ANEXO 6

### CORRIDA DE ARHYMO

Las diferencias que se observan en las precipitaciones introducidas (Comando RURHIDRO) se deben a la ponderación por área de influencia de los dos pluviógrafos según fuera explicado.

C arhymo\cuenca\6-3-00.txt  
C Lluvia del 06/03/2000 (72 mm medidos con est.met.chica y 58 mm  
C pluv c. grande distribuido en las subcuencas según Thiessen)  
INICIA 0 HS  
RURHIDRO HID=302 DT=10 MIN A=1.15 Km NC=55 IA=-1 HT=33 M L=2.4 KM  
NPREC=1 0 10.5 21 16 6.5 2.5 0.5 0.5 0.0 0.0 0.5 \*  
Escorrentía = 1.2 mm .001 Hm3  
Caudal pico = .352 m3/s  
Tiempo al pico = 1.21 horas

RURHIDRO HID=303 DT=10 MIN A=1.40 Km NC=52 IA=-1 HT=35 M L=2.4 KM  
NPREC=1 0 10.5 21 16 6.5 2.5 0.5 0.5 0.0 0.0 0.5 \*  
Escorrentía = .5 mm .001 Hm3  
Caudal pico = .168 m3/s  
Tiempo al pico = 1.30 horas

SUMHIDRO HID=103 HID=302 + HID=303 \*  
HIDROGRAMA PARCIAL 103  
Escorrentía = .8 mm .002 Hm3  
Caudal pico = .508 m3/s  
Tiempo al pico = 1.21 horas

CALCH-Q ID=1 NS=3 NSEG=3 ELMIN=0.0 ELMAX=1 SC=0.01 SP=0.01

C Todo bajo siembra directa, con menos de 0.6 Tn/ha de rastrojo en  
C superficie,

C lo que arroja un valor de  $n=0.04$  (Morgan, 1997)

N DISTANCIA

0.04 5

-0.04 15

0.04 20

DISTANCIA ELEVACIÓN

0 0.7

2 0.12

4 0.09

6 0.05

8 0.02

10 0

12 0.02

14 0.05

16 0.09

18 0.12

20 0.7 \*

CURVA DE CAUDALES DE LA SECCIÓN 3



0	ELEVAC SUPERF AGUA (m)	ANCHO SUPERF (m)	ÁREA HIDRAUL (m2)	CAUDAL EN (m3/s)	FROUDE
	.00	.00	.000	.000	
	.05	8.26	241	.058	45
	.11	14.04	.819	.339	55
	.16	16.26	1.651	.947	.57
	----	----	----	----	----
	.89	20.00	15.375	32.397	.77
	.95	20.00	16.427	36.136	.77
	1.00	20.00	17.480	40.039	.78

TIEMTRAN HID=3 TC=1 NSECC=1 L=1244 ST=0.01

TABLA DE TIEMPO DE TRASLADO TRAMO 1

TIRANTE metros	CAUDAL m3/s	TIEMPO horas
.05	.058	1.443
.11	.339	.836
.16	.947	.603
.21	1.836	.474
----	----	----
.84	28.826	.172
.89	32.397	.164
.95	36.136	.157
1.00	40.039	.151

TRANSHID HID=3 HID=103 DT=0

IMPHIDRO HID=103 COD=0 DT=0

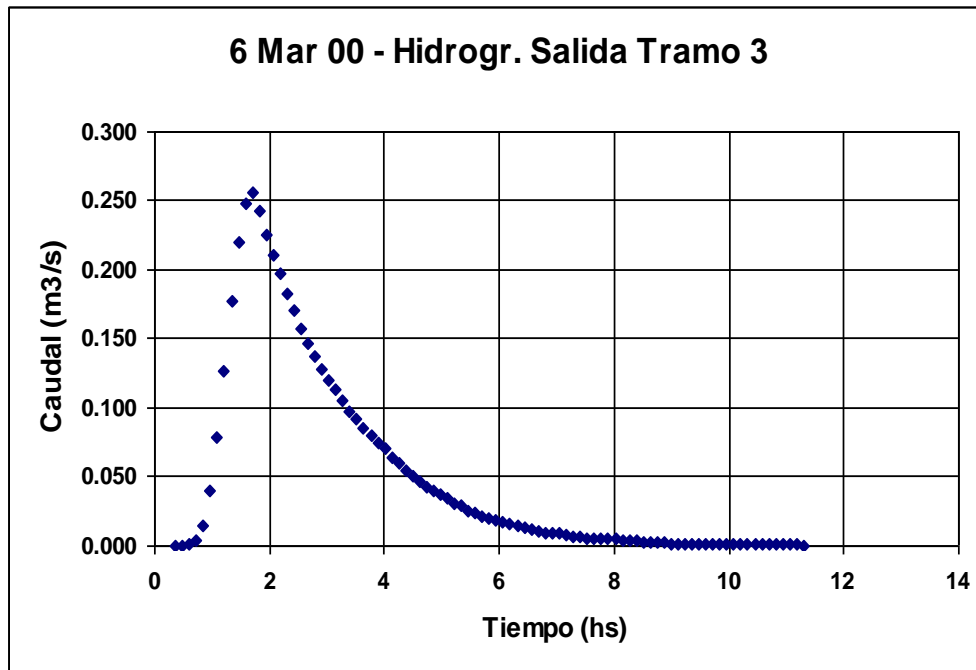
HIDROGRAMA PARCIAL 103

TIEM	CAUD	TIEM	CAUD	TIEM	CAUD	TIEM	CAUD	TIEM	CAUD
.36	.000	1.34	.501	2.31	.111	3.28	.031	4.25	.006
.49	.001	1.46	.446	2.43	.090	3.40	.028	4.37	.004
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1.09	.451	2.06	.168	3.04	.040	4.01	.011		
1.21	.508	2.19	.138	3.16	.035	4.13	.008		

Escorrentía = .8 mm .002 Hm3  
Caudal pico = .508 m3/s  
Tiempo al pico = 1.21 horas

HIDROGRAMA SALIDA DEL TRAMO 3  
Escorrentía = .8 mm .002 Hm3  
Caudal pico = .256 m3/s  
Tiempo al pico = 1.70 horas

GRAFHID HID=3 \*



RURHIDRO HID=307 DT=10 MIN A=0.093 Km NC=79.6 IA=-1 HT=6 M L=0.585 KM

NPREC=1 0 3.2 23 20.2 15.2 6 2.4 1.4 0.2 0.2 0 0.2 0 \*

Escorrentía = 28.0 mm .003 Hm3

Caudal pico = .792 m3/s

Tiempo al pico = .80 horas

TRANSEMB HID=507 HID=307 V=0

C El volmen en Hm3

caudal	volumen
0	0
0.011	0.0000267
0.033	0.0001471
0.065	0.0004449
0.139	0.000981
0.259	0.001777 *

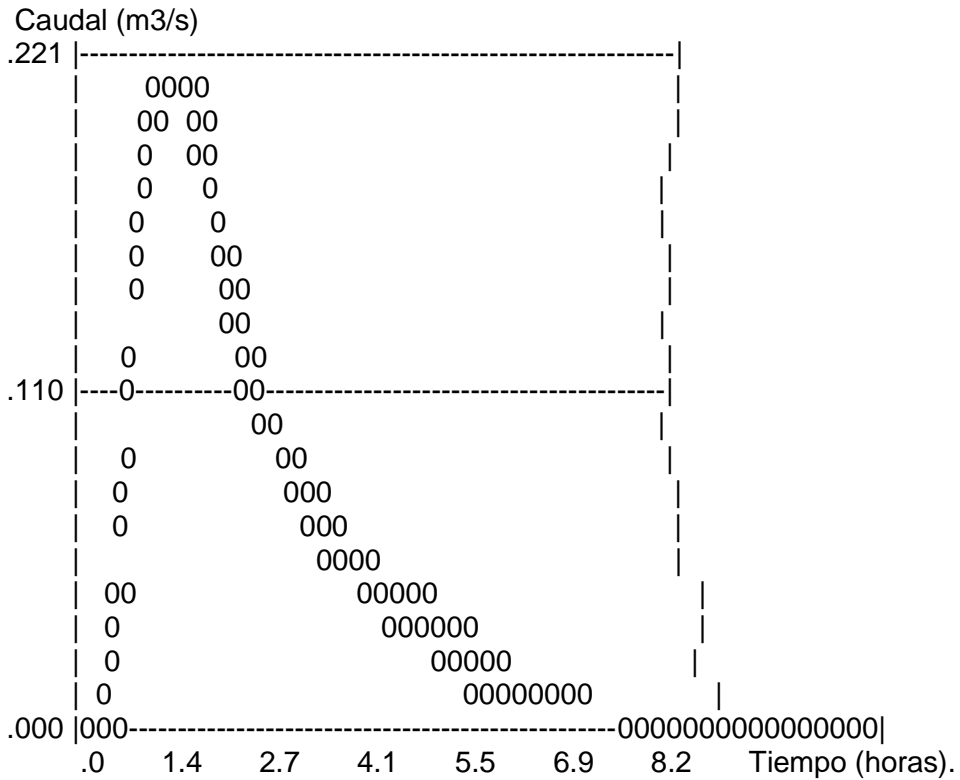
Escorrentía = 27.8 mm .003 Hm3

Caudal pico = .221 m3/s

Tiempo al pico = 1.46 horas

GRAFHID HID=507 \*

O= Hidrograma rea 507

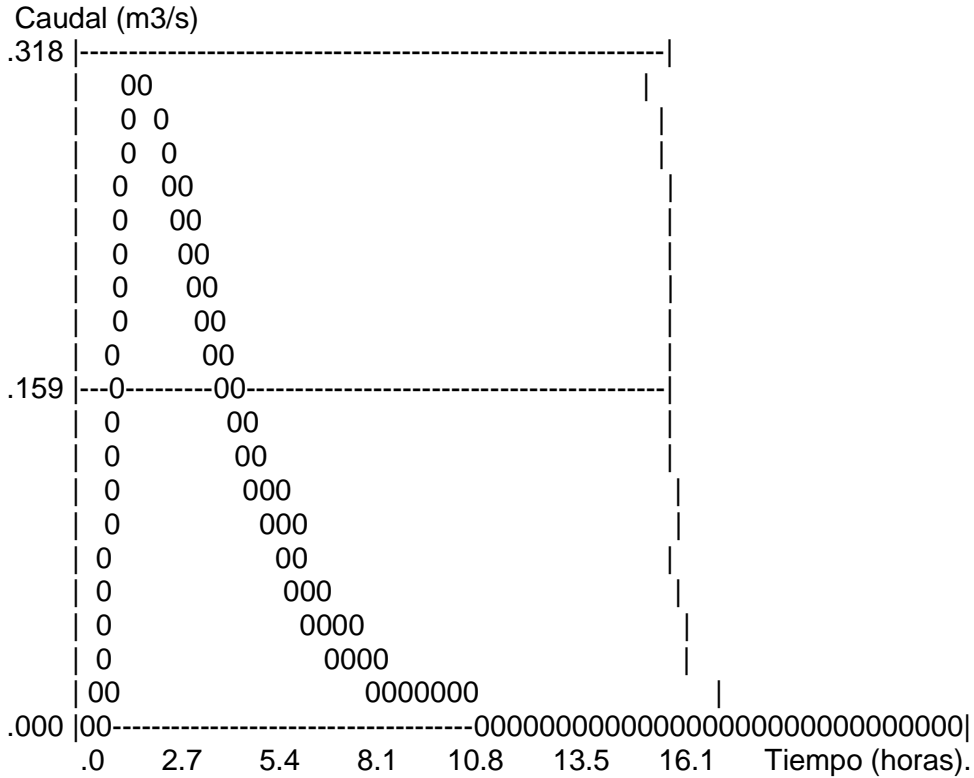


C Comienzo de la microcuenca sistematizada.  
 RURHIDRO HID=309 DT=10 MIN A=0.184 Km NC=51 IA=-1 HT=6.3 M L=0.611  
 KM

NPREC=1 0 3.2 23 20.2 15.2 6 2.4 1.4 0.2 0.2 0 0.2 \*  
 Escorrentía = 2.0 mm .000 Hm3  
 Caudal pico = .097 m3/s  
 Tiempo al pico = 1.11 horas

SUMHIDRO HID=109 HID=4 + HID=507 + HID=309 \*  
 HIDROGRAMA PARCIAL 109  
 Escorrentía = 1.5 mm .005 Hm3  
 Caudal pico = .318 m3/s  
 Tiempo al pico = 2.07 horas

GRAFHID HID=9 \*  
 O= Hidrograma rea 9



-----

C Comienzo de la parte norte:  
 RURHIDRO HID=301 DT=10 MIN A=3.25 Km NC=56 IA=-1 HT=50 M L=5.6 KM  
 C Lluvia ponderada por sup. (ver cuengra/eventos/pp-lam-vol.xls):  
 NPREC=1 0 9.49 21.28 16.58 7.70 2.98 0.76 0.62 0.03 0.03 0.43 0.03 \*

-----

SUMHIDRO HID=105 HID=1 + HID=305 \*  
 HIDROGRAMA PARCIAL 105  
 Escorrentía = 1.9 mm .009 Hm3  
 Caudal pico = .858 m3/s  
 Tiempo al pico = 1.85 horas

C Suma de las partes Norte y Sur:  
 SUMHIDRO HID=111 HID=110 + HID=105 \*  
 HIDROGRAMA PARCIAL 111  
 Escorrentía = 1.7 mm .015 Hm3  
 Caudal pico = 1.206 m3/s  
 Tiempo al pico = 1.84 horas

CALCH-Q ID=1 NS=11 NSEG=3 ELMIN=0.0 ELMAX=1 SC=0.0115 SP=0.0115

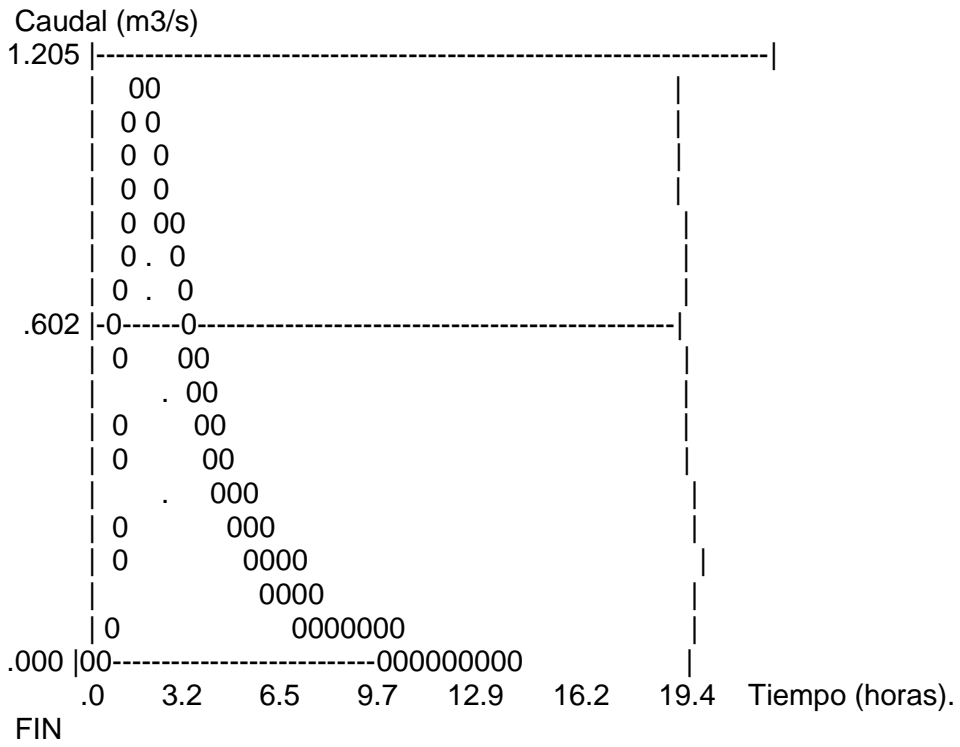
N	DISTANCIA
0.04	5
-0.04	15
0.04	20

DISTANCIA	ELEVACIòN
0	0.7
2	0.12
4	0.09

6	0.05
8	0.02
10	0
12	0.02
14	0.05
16	0.09
18	0.12
20	0.7 *

Escorrentía = 1.7 mm .015 Hm3  
 Caudal pico = 1.205 m3/s  
 Tiempo al pico = 1.84 horas

GRAFHID HID=11 \*  
 O= Hidrograma rea 11



## ANEXO 7

Las siguientes planillas son ejemplos de las observaciones periódicas de los lotes de la cuenca (Figura V.1), según se indicara bajo el título “Planillas de uso del suelo” de pág. 67.

### PLANILLAS DE USO DEL SUELO

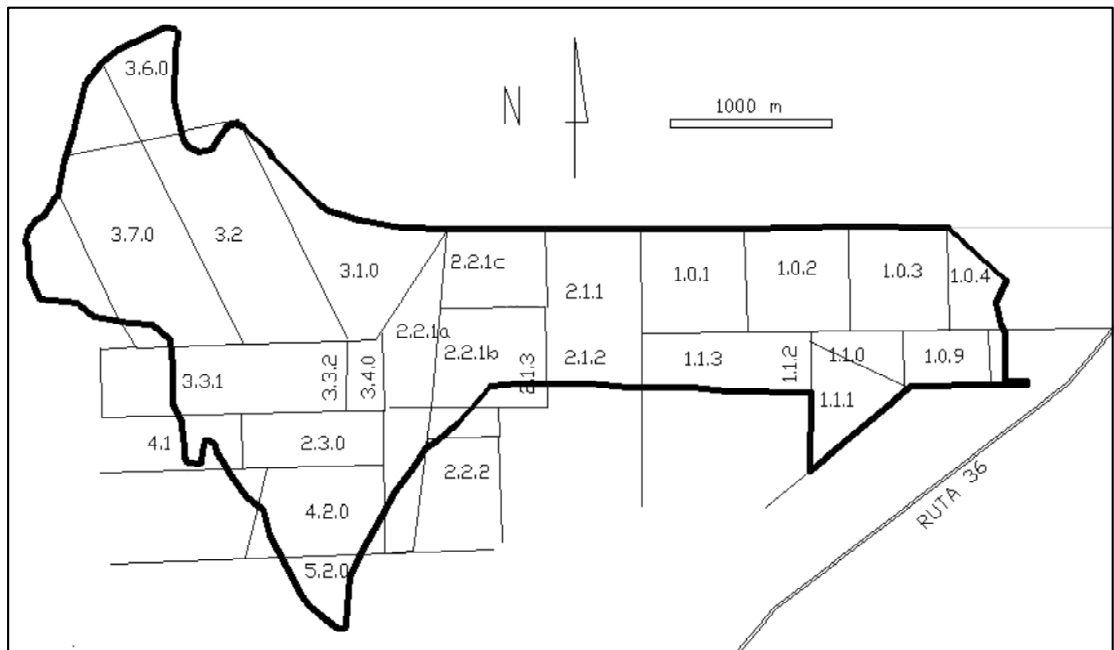


Figura 0.1- Lotes de la cuenca.

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 04\01\2000															
LOTE	1.0.1	1.0.2	1.0.3	1.0.4	1.0.8	1.0.9	1.1.0	1.1.1	1.1.2	1.1.3	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1a	2.2.1b
Secuencia Cultivo	Sj/Mz 28/11/ 99	Mz/Sj 10/11	Sj/Sj 12/11	Sj/Sj 26/11	Av/Sj	Sj/Mz 4/12	Sj/Sj 24/11	Sj/Mz 30/11	Mz/Sj 27/11	Monte	Mlz/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12
Altura cultivo		60	60	40		30	40	30	40	-	7	7	7	7	7
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	SD	LC	SD	SD	-	SD	SD	SD	SD	SD
Dirección siembra	TRZ	TRZ	TRZ	TRZ		TRZ		TRZ	TRZ	-	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52	52	52	52	52	52		52	52	-	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5
% cobertura		90	90	70		30	70	30	70	100	50	50	50	50	50
Tipo de suelo	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT – HT 40 - 60	AT – HT 50 - 50

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional

TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste

AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza ; Ver: verdeo

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN OBSERVADA AL DIA 04\01\2000 (CONTINUACIÓN)														
LOTE	2.2.1c	2.2.2	2.3.0	3.1.0	3.2.0	3.3.1	3.3.2	3.4.0	3.6.0	3.7.0	4.1.0	4.2.0	5.2.0	4.5.0
Secuencia Cultivo	Sj	Sj	Sj	Sj	Sj	Sj	Mlz	Monte		Sj	Sj	Mz	Sj	Mz
Altura Cultivo	0.08	0.15	0.10	0.20	0.40	0.55	-	-		0.70	0.45	2.20	0.60	2.00
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	LC	-	-	LM?	SD	SD	SD	SD	SD
Dirección siembra	280°	E-W	N-S	N-S	E-W	E-W	-	-		E-W	E-W	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52	52	52	52	52	70	-	-		52	52	52	52	52
% cobertura	40	55	55	100	70	65 (0	100	100		95 (50 rast)	90	85	100	100
Tipo de suelo	AT	HT	HT	AT-HT- HE	AT-HT- HE	HT	HT	HT	AT	AT-HE- HT	HT	HT	HT	

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional

TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste

AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza ; Ver: verdeo



PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 10-11-97															
LOTE	1.0.1	1.0.2	1.0.3	1.0.4	1.0.8	1.0.9	1.1.0	1.1.1	1.1.2	1.1.3	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1a	2.2.1b
Secuencia Cultivo	R Mz	R Sj	R Sj	R Sj	Pastiz.	R Sj	R Sj	R Sg	R Mz	Monte	Av	Av	Av	Barb	Av
Altura Cultivo	-	-	-	-	-	-	-		-	-				-	
Labranza	SD	SD	SD	SD	-	SD	LC	SD	SD	-	SD	SD	SD	LC	SD
Dirección siembra	TRZ	TRZ	TRZ	TRZ	-	TRZ	N-S	TRZ	TRZ	-	N-S	N-S	N-S	160°	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	-	52,5	70	52,5	52,5	-	52,5	52,5	52,5	70	52,5
% cobertura	35	25	25	25	-	35	15	35	35	-	80	80	80	5	70

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional  
 TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste  
 AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico  
 Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 10-11-97 (CONTINUACIÓN)														
LOTE	2.2.1c	2.2.2	2.3.0	3.1.0	3.2.0	3.3.1	3.3.2	3.4.0	3.6.0	3.7.0	4.1.0	4.2.0	5.2.0	6.9.0
Secuencia Cultivo	Tr	Av	Tr	Tr	R Sj	Barb	Mlza	Monte	R Mz	R Mz	Barb	Barb	Tr	Tr
Altura Cultivo					-	-	100	-	-	-				
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	LC	-	-	Lm	Lm	LC	LC	SD	SD
Dirección siembra	E-W	130°	300°		E-W	E-W	-	-	E-W	E-W	N-S	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	70	-	-	70	70	70	70	52,5	52,5
% cobertura	70	70	80	70	80	0	100	100	40	40	0	0	80	80

Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza  
SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional  
TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste  
AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 09-12-97															
LOTE	1.0.1	1.0.2	1.0.3	1.0.4	1.0.8	1.0.9	1.1.0	1.1.1	1.1.2	1.1.3	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1a	2.2.1b
Secuencia Cultivo	Mz/Sj	Sj/Sj	R Sj	Sj/Mz	Pastiz	Sj/Sj	R Sj	Sg/Sj	Mz/Sj	Monte	Av/Sj	Av/Sj	Av/Sj	Sj	Av/Sj
Altura Cultivo	4	15	-	20	-	25	-	15	15	-	10	10	15	10	10
Labranza	SD	SD	SD	SD	-	SD	LC	SD	SD	-	SD	SD	SD	LC	SD
Dirección siembra	TRZ	TRZ	TRZ	TRZ	-	TRZ	N-S	TRZ	TRZ	-	N-S	N-S	N-S	160°	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	-	52,5	70	52,5	52,5	-	52,5	52,5	52,5	70	52,5
% cobertura	30	20	20	20	-	30	10	30	30	-	80	80	80	10	70
Tipo de suelo	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT - HT 40 - 60	AT - HT 50 - 50

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional  
 TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste  
 AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico  
 Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 09-12-97 (CONTINUACIÓN)														
LOTE	2.2.1c	2.2.2	2.3.0	3.1.0	3.2.0	3.3.1	3.3.2	3.4.0	3.6.0	3.7.0	4.1.0	4.2.0	5.2.0	6.9.0
Secuencia Cultivo	Tr/Sj	Av/Sj	Tr/Sj	Srg	Sj/Sj	Sj	Mlza	Monte	Mz/Mz	Mz/Mz	Sj	Sj	Tr/Sj	Tr/Sj
Altura Cultivo	15	60	15	Siembra	20	25	100	-	25	20	4	4	15	15
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	LC	-	-	Lm	Lm	LC	LC	SD	SD
Dirección siembra	E-W	130°	300°	340°	E-W	E-W	-	-	E-W	E-W	N-S	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	70	-	-	70	70	70	70	52,5	52,5
% cobertura	70	70	80	70	80	10	100	100	40	40	10	10	80	80
Tipo de suelo	AT	HT	HT	AT-HT-HE 20 - 50 -	AT-HT-HE 30 - 35 -	HT	HT	HT	AT	AT-HE-HT 80 - 15 - 5	HT	HT	HT	AT

Mz: maíz ; Srg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlza: maleza  
SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional  
TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste  
AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 07\02\2000															
LOTE	1.0.1	1.0.2	1.0.3	1.0.4	1.0.8	1.0.9	1.1.0	1.1.1	1.1.2	1.1.3	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1a	2.2.1b
Sec Cult Fecha siemb	Sj/Mz 28/11/ 00	Mz/Sj 10/11	Sj/Sj 12/11	Sj/Sj 26/11	Av/Sj	Sj/Mz 4/12	Sj/Sj 24/11	Sj/Mz 30/11	Mz/Sj 27/11	Monte	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12	Tr/Sj 24/12
Altura cultivo							87			-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	SD	LC	SD	SD	-	SD	SD	SD	SD	SD
Dirección siembra	TRZ	TRZ	TRZ	TRZ		TRZ		TRZ	TRZ	-	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52	52	52	52	52	52		52	52	-	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5
% cobertura		100	100	100	100		100		100	100	85	85	85	85	85
Tipo de suelo	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT - HT 40 - 60	AT - HT 50 - 50

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional

TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste

AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza ; Ver: verdeo

PLANILLA DE USO DEL SUELO  
CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 07\02\2000 (CONTINUACIÓN)

LOTE	2.2.1c	2.2.2	2.3.0	3.1.0	3.2.0	3.3.1	3.3.2	3.4.0	3.6.0	3.7.0	4.1.0	4.2.0	5.2.0	4.5.0
Secuencia Cultivo	Sj	Sj	Sj	Sj	Sj	Sj	Mlz	Monte		Sj	Sj	Mz	Sj	Mz
Altura Cultivo	0.5	0.55	0.55	0.70	0.87	0.95				0.95	0.90	2.20	0.95	2.00
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	LC				SD	SD	SD	SD	SD
Dirección siembra	280°	E-W	N-S	N-S	E-W	E-W				E-W	E-W	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52	52	52	52	52	70				52	52	52	52	52
% cobertura	85	87	87	100	100	100 (0	100			100 (50 rast)	100	85	100	100
Tipo de suelo	AT	HT	HT	AT-HT-HE 20 - 50 -	AT-HT-HE 30 - 35 -	HT	HT	HT	AT	AT-HE- HT	HT	HT	HT	

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional

TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste

AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

Mz: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza ; Ver: verdeo

PLANILLA DE USO DEL SUELO  
CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 09-12-97

LOTE	1.0.1	1.0.2	1.0.3	1.0.4	1.0.8	1.0.9	1.1.0	1.1.1	1.1.2	1.1.3	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1a	2.2.1b
Secuencia Cultivo	Mz/Sj	Sj/Sj	R Sj	Sj/Mz	Pastiz	Sj/Sj	R Sj	Sg/Sj 5/D/9	Mz/Sj	Monte	Av/Sj	Av/Sj	Av/Sj	Sj	Av/Sj
Altura Cultivo	4	15	-	20	-	25	-	15	15	-	10	10	15	10	10
Labranza	SD	SD	SD	SD	-	SD	LC	SD	SD	-	SD	SD	SD	LC	SD
Dirección siembra	TRZ	TRZ	TRZ	TRZ	-	TRZ	N-S	TRZ	TRZ	-	N-S	N-S	N-S	160°	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	-	52,5	70	52,5	52,5	-	52,5	52,5	52,5	70	52,5
% cobertura	30	20	20	20	-	30	10	30	30	-	80	80	80	10	70
Tipo de suelo	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT – HT 40 - 60	AT – HT 50 - 50
Clase hidrológica	B	B	B	B	B	B	C	B	B	B	B	B	B	C	B
Superficie	39,8	41,2	44,3	19,3	3,2	22,3	9,3	23,3	14,1	40,1	37	33,5	12,75	26,3	22
CN (AMC I)	60	63	63	63	62	63	65	60	60	35	60	60	60	75	60

SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional

TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste

AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico

MZ: maíz ; Sg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza

PLANILLA DE USO DEL SUELO CONDICIÓN ESTIMADA AL DIA 09-12-97 (CONTINUACIÓN)														
LOTE	2.2.1c	2.2.2	2.3.0	3.1.0	3.2.0	3.3.1	3.3.2	3.4.0	3.6.0	3.7.0	4.1.0	4.2.0	5.2.0	6.9.0
Secuencia Cultivo	Tr/Sj	Av/Sj	Tr/Sj	Srg	Sj/Sj	Sj	Mlza	Monte	Mz/Mz	Mz/Mz	Sj	Sj	Tr/Sj	Tr/Sj
Altura Cultivo	15	60	15	Siembra	20	25	100	-	25	20	4	4	15	15
Labranza	SD	SD	SD	SD	SD	LC	-	-	Lm	Lm	LC	LC	SD	SD
Dirección siembra	E-W	130°	300°	340°	E-W	E-W	-	-	E-W	E-W	N-S	N-S	N-S	N-S
Distancia surcos	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	70	-	-	70	70	70	70	52,5	52,5
% cobertura	70	70	80	70	80	10	100	100	40	40	10	10	80	80
Tipo de suelo	AT	HT	HT	AT-HT-HE	AT-HT-HE	HT	HT	HT	AT	AT-HE-HT	HT	HT	HT	AT
Clase hidrológica	B	B	B	B	B	C	B	B	B	B	C	C	B	B
Superficie	18,7	5	38	164	80	38,5	13	7,2	32	108,8	9	38,8	11,2	27,6
CN (AMC I)	60	60	60	60	60	75	38	35	63	63	75	75	60	60

MZ: maíz ; Srg: sorgo ; Sj: soja ; Av: avena ; Tr: trigo ; R: rastrojo ; Mlz: maleza  
SD: siembra directa ; LC: labr. Convencional TRZ: terrazas ; N-S: norte-sur ; E-W: este-oeste  
AT: complejo argiustol típico / Haplustol típico ; HT: hapl. Típ. ; HE: hapl. éntico