

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS PIEDEMONTANAS

Uso de Sistemas de Información Geográfica en Hidrología Superficial

Victor Hugo Burgos

Instituto Nacional del Agua Centro Regional Andino (INA-CRA)
Belgrano (O) 210 . (5500) Mendoza . Tel-fax: 54-261-4288005 – email: vhburgos@yahoo.com.ar

RESUMEN

Este trabajo propone metodologías de aplicación para el cálculo de hidrogramas de crecida de cuencas aluvionales, basados en modernas herramientas de gestión de variables espaciales como son los sistemas de información geográfica (SIG) y los modelos digitales de elevación (MDE).

Como nuevas herramientas propuestas se destaca la utilización de mapas de isocronas generados con SIG, la aplicación del método de Clark, la obtención de parámetros morfométricos en forma automática y el uso de imágenes satelitales para generar mapas distribuidos de CN. Con el fin de estimar los caudales de escorrentía de las cuencas aluvionales se utilizaron los modelos Arhymo y Geo HMS.

Se presentan los resultados de la aplicación en una cuenca aluvional situada dentro del piedemonte en cercanías a la zona urbana del Gran Mendoza, demostrando que el empleo de estas herramientas permiten optimizar el tiempo y los recursos tanto humanos como económicos, en la gestión de acciones de planeación para el manejo y desarrollo sustentable de los recursos naturales de una cuenca hidrográfica.

Este trabajo se desarrolló en el Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino, en el marco del proyecto interno “Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en el Piedemonte”.

Palabras clave: Hidrología superficial, SIG, MDE, isocronas.

INTRODUCCION

En vistas al desarrollo sustentable de una urbanización que avanza hacia el piedemonte, es lógico pensar en una metodología que optimice el análisis de las variables morfométricas y su modelación hidrológica a fin de contar con un apoyo en la toma de decisiones a la hora de planificar.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ocupan hoy en día un lugar prominente entre las herramientas digitales modernas utilizadas para la planificación y la implementación de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) amplían su potencialidad debido a que la topografía juega un papel importante en la distribución y flujo de recursos como el agua dentro del panorama natural. El conocimiento de la forma del terreno y la extracción automatizada de parámetros topográficos desde un MDE es reconocido como una alternativa viable frente a las mediciones tradicionales o al uso de las cartas analógicas con curvas de nivel.

“Los avances tecnológicos alcanzados por los SIG y el aumento en la disponibilidad y calidad de los MDE han producido una gran expansión en los potenciales usos de estas herramientas para la investigación en temas de hidrología, hidráulica y recursos de agua”. (Moore et al, 2001).

Área de Estudio

El área estudiada, se halla ubicada al Oeste del núcleo urbano conocido como Gran Mendoza (Figura 1). Abarca una superficie de 5,42 Km² y está comprendida según la clasificación de cuencas aluvionales (Dirección de Hidráulica, 1979) dentro de la cuenca N° 14 “Aero Club Mendoza”, entre las latitudes 32°56’ S , 32°58’ S y las longitudes 68°54’ W, 68°52’ W.

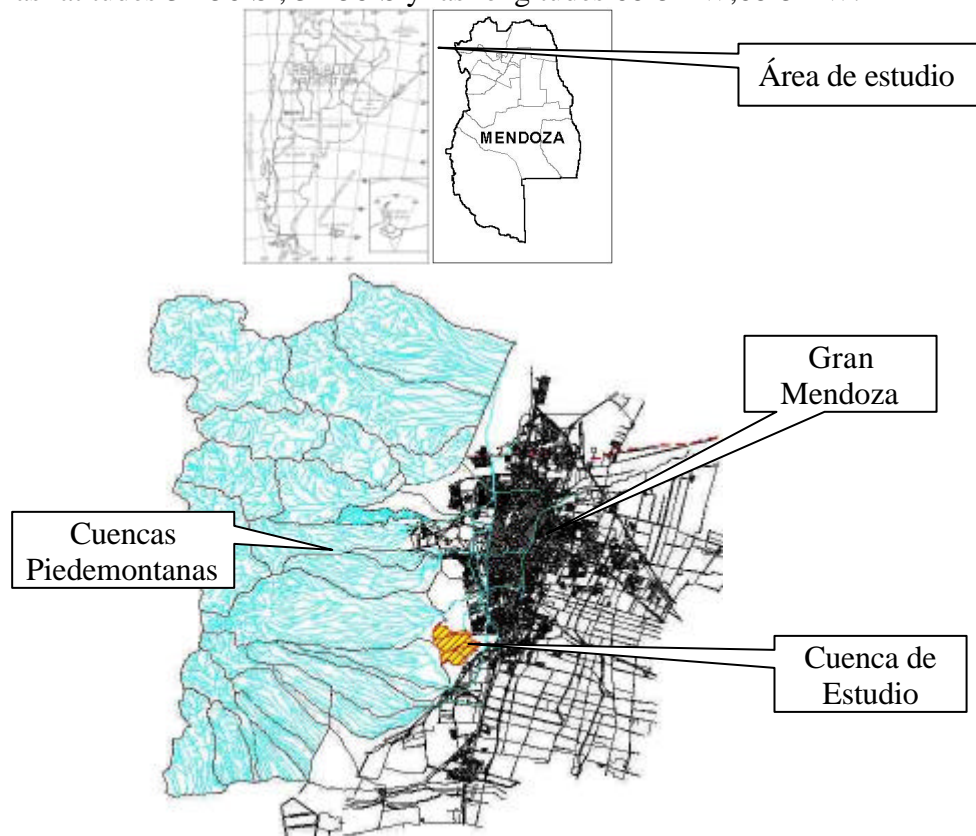


Figura 1. Ubicación relativa

El Gran Mendoza está situado donde el piedemonte se va transformando en planicie, interceptando cauces de diferente importancia que bajan de Oeste a Este. Hoy, esta importante urbe de casi 1.000.000 de habitantes, ha quedado surcada por una serie de canales que han tratado de respetar lo que la naturaleza ha impuesto desde el comienzo; una gran cantidad de esos cauces naturales, han desaparecido y otros se han convertido en calles. Los cauces más importantes se han respetado y hoy son canales que conducen el agua retenida y laminada por los diques aluvionales al colector principal.

El piedemonte constituye una unidad morfoestructural muy importante en la evolución del paisaje pues su levantamiento y basculación ha provocado profundos cambios en el modelado del terreno y en las condiciones de equilibrio del sistema de drenaje. Está formado por un conjunto de pequeños cerros que no sobresalen más de 100 m de la superficie circundante y que se encuentran alineados en dirección Norte-Sur. Hacia el Sur del piedemonte la cerrillada es de mayor altura y sobresalen los cerros Puntilla, Pelotas y Petaca. (Bessone, Robles , 2003).

El estudio se enmarca en las cercanías de aquellos cerros, al sur del piedemonte, donde el relieve es de tipo ondulado con cotas topográficas comprendidas entre los 900 y 1080 msnm. La red de drenaje es jerarquizada con sentido oeste – este y posee pendientes que van desde 2% a 50%, con una media del 7%.

El clima de Mendoza es templado continental seco, con las siguientes características:

- ❑ La temperatura media anual es de 16°C variando las medias diarias mensuales de 8°C en Julio a 24°C en Enero.
- ❑ Las temperaturas máximas medias diarias oscilan de 15°C en Julio a 32°C en Enero y las mínimas medias diarias van de 2°C en Julio a 16°C en Enero.
- ❑ La humedad relativa media es de 52%, oscilando a lo largo del año de 42 a 62% (medias mensuales).

Las precipitaciones medias anuales oscilan los 194 mm, generalmente de tipo convectivas y estivales, de corta duración pero gran intensidad, (105 mm. en 1 hora, el 4 de enero de 1970), habiendo registros de intensidades de hasta 5 mm./min. (Maza et al, 2004).

Esta concentración e intensidad de las lluvias sumada a la existencia de pendientes pronunciadas, escasa vegetación y condiciones edafológicas determinadas, favorecen el escurrimiento superficial de las aguas por medios de torrentes, que en la mayor parte del tiempo permanecen secos, presentando gran dinamismo erosivo, con arrastre de material sólido, causando daños en ciudades y cultivos.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio es obtener una metodología de aplicación para calcular hidrogramas utilizando MDE y aplicando técnicas SIG en conjunto con modelos hidrológicos de transformación lluvia – escurrimiento.

Dentro de los objetivos particulares se encuentran la obtención automática de parámetros morfométricos de la cuenca, el uso de imagen de satélite para generar un mapa distribuido del CN, y la aplicación del método de Clark para calibrar los parámetros del hidrograma unitario generado con el modelo Arhymo.

MATERIALES Y METODOS

Implementación del S.I.G y M.D.E.

En cuencas no aforadas, la determinación de los recursos hídricos y de las avenidas máximas ha de basarse en las características propias de las mismas, como su geomorfología, tipos de suelos, usos y aprovechamientos, etc., y en las variables meteorológicas que las afectan, como la precipitación y la evapotranspiración. El tratamiento de las cuencas no aforadas a partir de los datos mencionados ofrece una nueva dimensión con la aparición comercial de sistemas de adquisición de datos mediante sensores remotos y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) potentes. Los primeros facilitan la adquisición de la información de la zona de estudio, mientras que los segundos ofrecen grandes posibilidades en el manejo de dicha información y en la simulación de los procesos hidrológicos mediante modelos (Maidment, 1996; Leipnik, 1993).

La cartografía temática de cobertura y ocupación de la tierra con información espacial actualizada se ha integrado en ambiente S.I.G. a otras capas de información tales como red hidrográfica y subcuencas hídricas, infraestructura vial y férrea, límites político-administrativos e información topográfica, requeridas para modelado espacial y como base para estudios hidrológicos multi-escenarios. Se ha integrado información vectorial y raster utilizando los sistemas Woditem (Univ. de Padova) y ArcView Gis®.

Mediante la digitalización de curvas de nivel (Figura 2) del relevamiento aerofotogramétrico realizado por la Dirección Provincial de Catastro en el año 1970 de todo el piedemonte mendocino con una equidistancia de 5m en escala 1:5000 y las proporcionadas por una digitalización de una restitución fotogramétrica del año 1999 con equidistancia de 1m a escala 1:2500, se logró confeccionar el modelo digital de elevaciones del área de estudio (Figura 3).

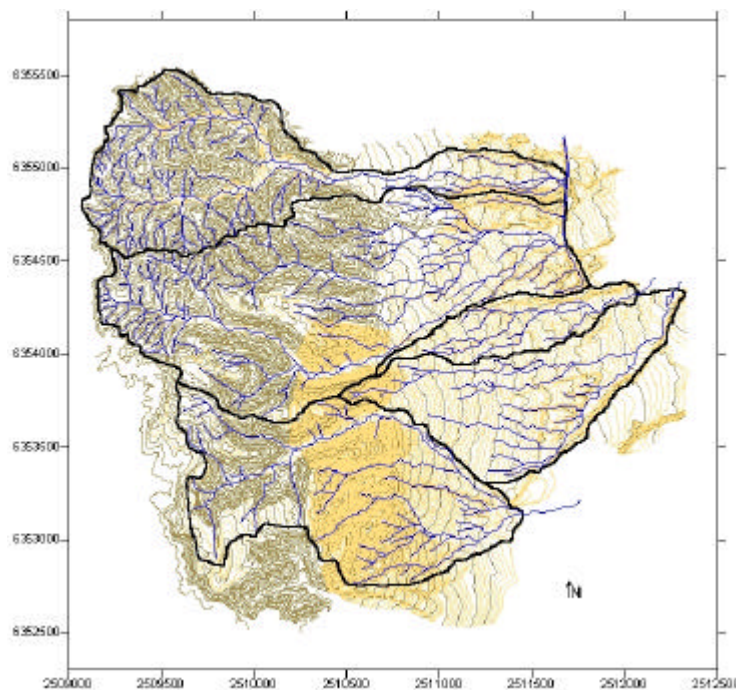


Figura 2. Mapa de curvas de nivel digitalizadas.

Modelo Digital de Elevaciones

El modelo digital de elevaciones (M.D.E.) se preparó a partir de los puntos con coordenadas x,y,z tomados de las curvas de nivel digitalizadas. En total se utilizó para la interpolación cerca de 200.000 puntos y se generó con el variograma de Krigging una grilla de 700 filas por 700 columnas con celdas de 5x5m. Se realizó un análisis de los residuos generados que fueron reducidos al ir ajustando el variograma de interpolación hasta lograr residuos aceptables. Por último se compararon las curvas de nivel cada 5m del M.D.E. con las curvas originales digitalizadas observando una muy alta adyacencia.

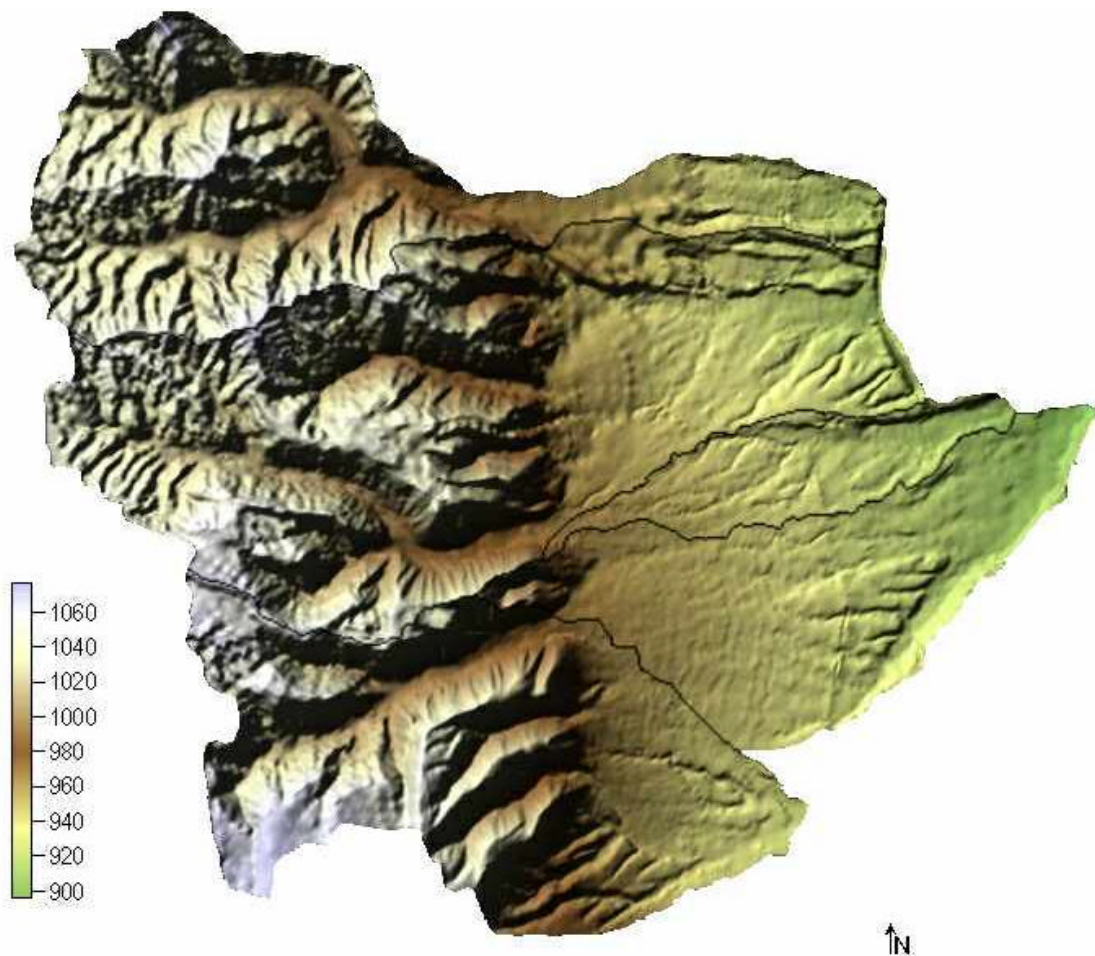


Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Toda la información se almacenó en el SIG, el cual permitió realizar análisis geomorfométricos tales como pendientes, longitudes y jerarquía de cauces, perímetros, diferencias de altura, etc, de forma de confeccionar la tabla de parámetros morfométricos de cada cuenca.

El área total de la cuenca de estudio tiene 5,42 km² y a partir de las curvas de nivel se delimitó manualmente las subcuencas, resultando en una división de 5 subcuencas que oscilan entre los 0,3 km² y 2km² (Figura 4). Esta delimitación manual de los límites de las cuencas, fue luego corroborada por una delimitación automática.

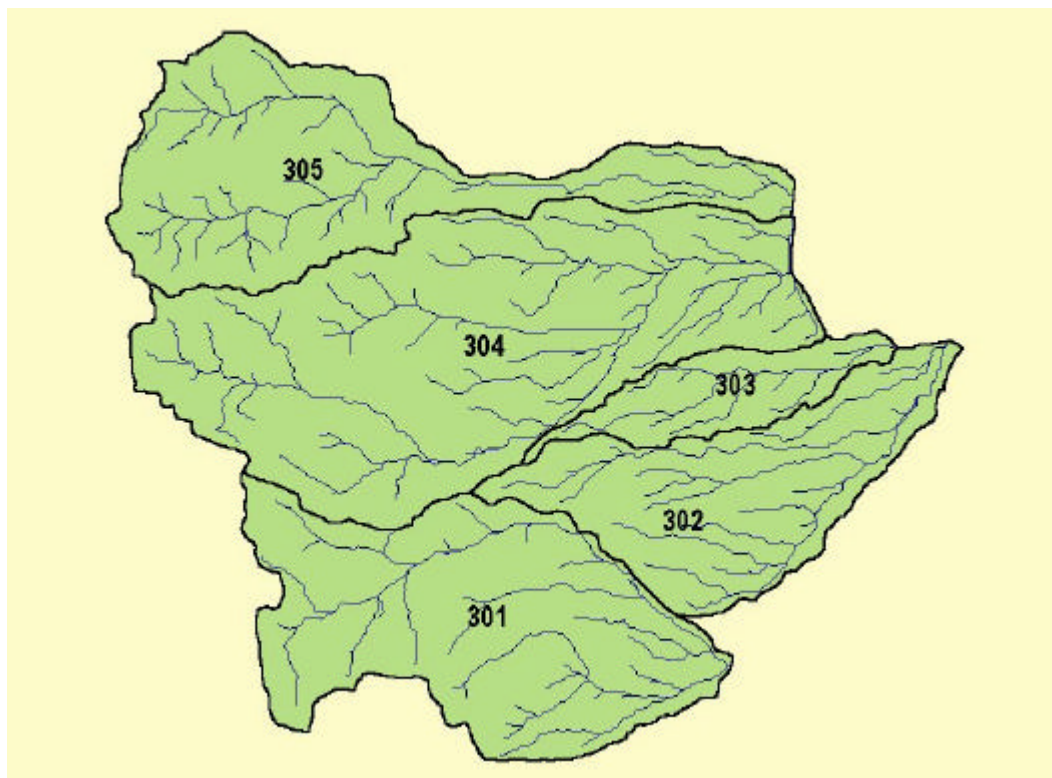


Figura 4. Mapa de Cuencas Rurales

La confección de un SIG permitió la administración y gestión de la información procesada como así también el análisis de los datos espacialmente referenciados. El primer resultado de análisis fue el de los parámetros morfométricos de las cuencas (Tabla 1) que fueron datos de entrada a los modelos hidrológicos.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de las subcuencas

Sub cuenca	Area [Km ²]	Perim. [m]	Long. Cauce [m]	cota max cauce [m]	cota min cauce [m]	cota max cuenca	cota min cuenca	DH [m]	Pend. cauce [m/m]
301	1.263	5753	2449	1070	928	1078	928	142	0.058
302	0.808	4881	2159	1010	896	1035	896	114	0.053
303	0.287	3431	1443	962	903	995	903	59	0.041
304	1.935	7046	3310	1045	911	1075	911	134	0.040
305	1.130	6827	2987	1040	911	1075	911	129	0.043
Total	5.424								

Otra de las determinaciones realizadas fue el de derivar el mapa de elevaciones en un mapa de pendientes (Figura 5).

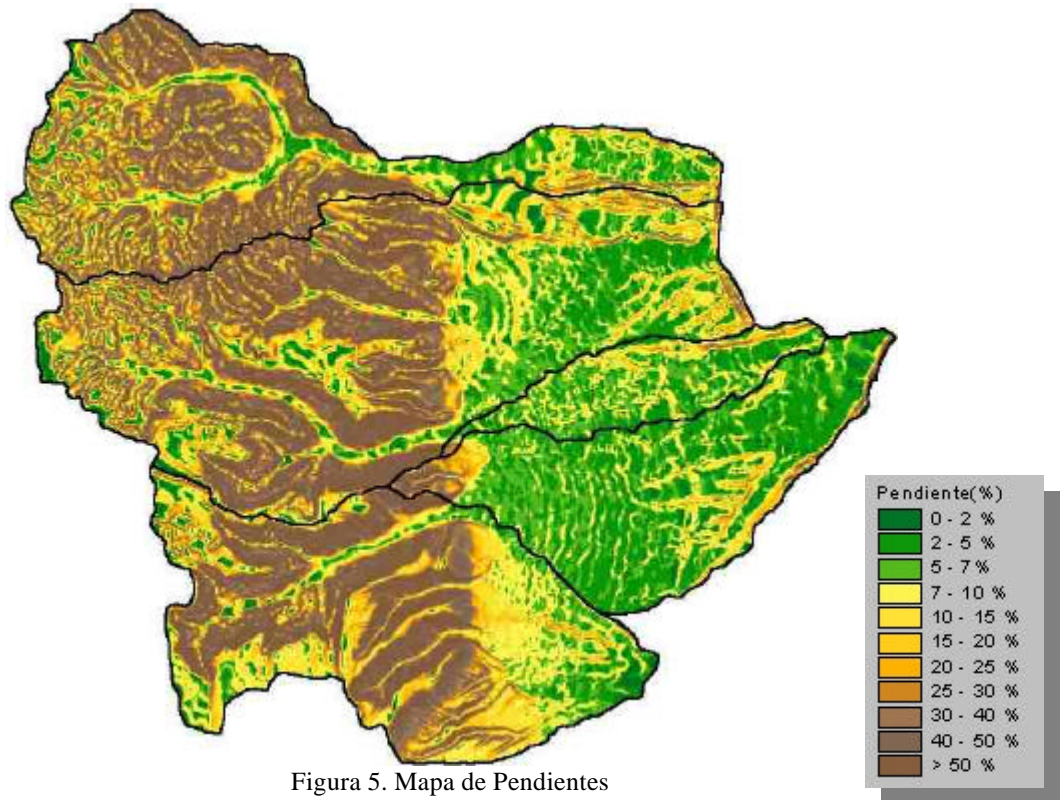


Figura 5. Mapa de Pendientes

También fue de interés el conocimiento de la hipsimetría de la cuenca y por medio de un análisis de las áreas entre bandas altitudinales se logró confeccionar la curva hipsométrica (Figura 6) que muestra la potencialidad erosiva debido a la forma de distribución de sus pendientes, que comparada con curvas patrones límite nos indica que estamos en presencia de una cuenca entre joven y madura con un grado de erosión medio.

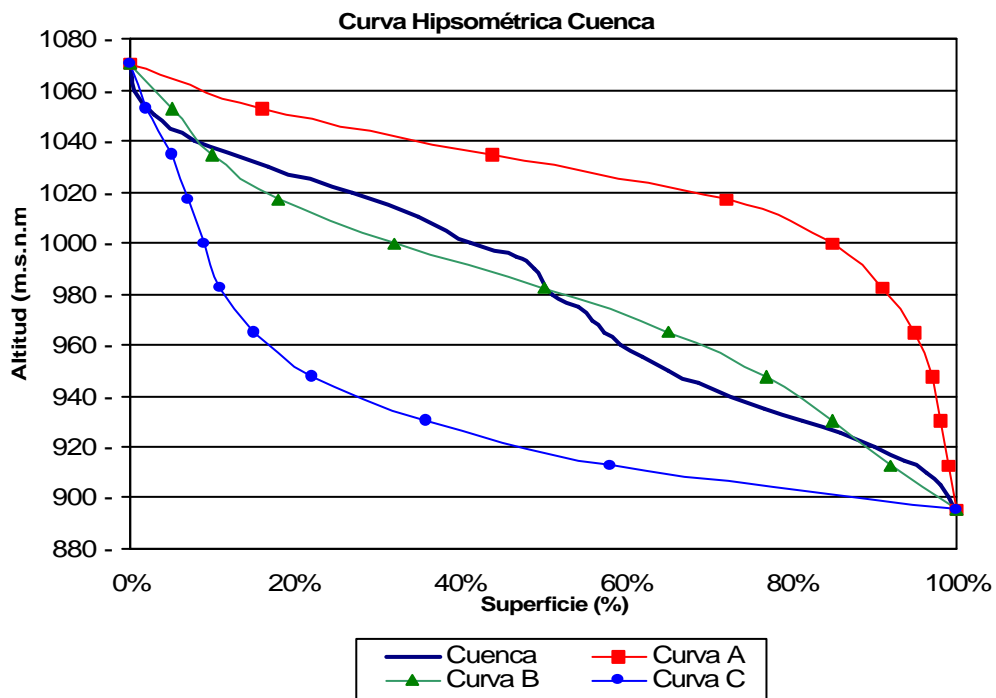


Figura 6. Curva hipsométrica de la cuenca de estudio

La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos:

- curva A: fase de juventud
- curva B: fase de madurez
- curva C: fase de vejez

Red de drenaje

La hidrografía fue digitalizada en una primera instancia para luego ser corroborada por medios automáticos, comparándose ambos métodos mediante análisis geomorfológico. En la Figura 7 se aprecia la alta adyacencia de los cursos obtenidos automáticamente mediante modelación hidrológica con HEC GeoHMS, representados en color azul, con respecto a los digitalizados en color rojo. La diferencia radica en el umbral de área drenada que se tome para considerar el tramo como cauce.

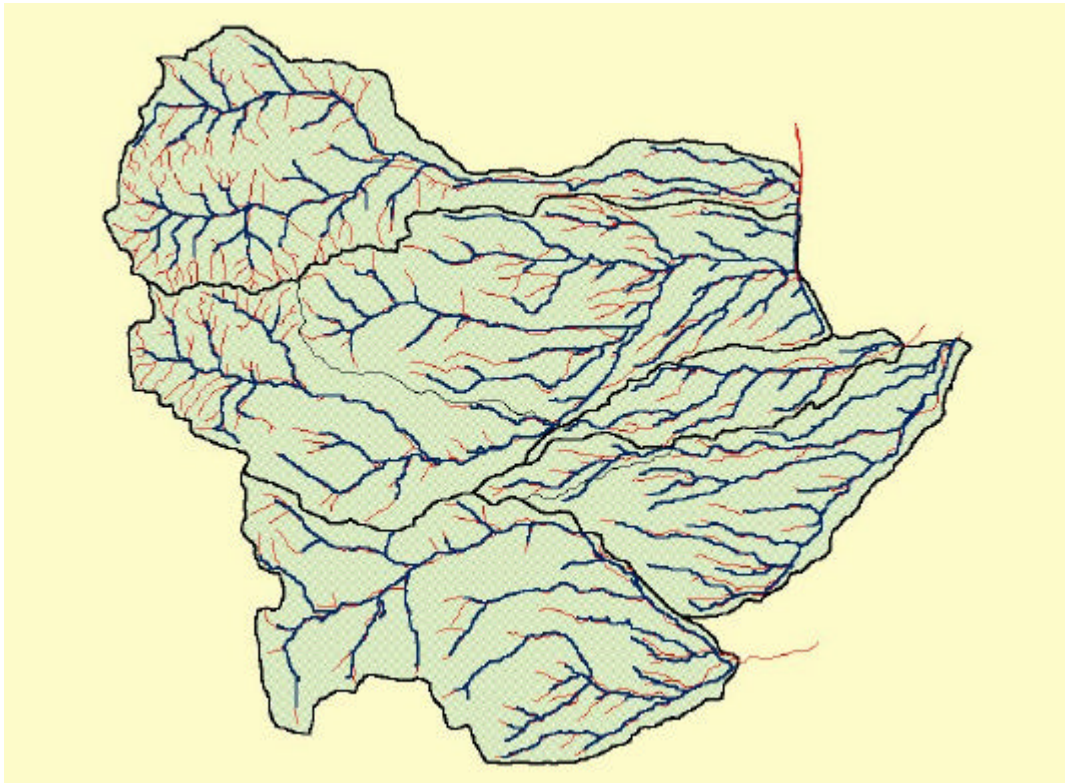


Figura 7. Diferencia entre Cauces digitalizados vs automáticos

Se realizó una comparación de parámetros geomorfológicos como órdenes de Horton, densidad de drenaje (Dd), frecuencia de canales, etc., de manera de validar el método automático de obtención de red hidrográfica (Tabla 2) (Figura 8).

Tabla 2. Tabulación cruzada entre subcuencas y cantidad y distancias de cauces según órdenes de Horton para red sintética y red digitalizada.

	Orden Horton	301		302		303		304		305	
		Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]
Red digitalizada	1	45	6686	22	4414	8	2165	104	13796	100	8633
	2	13	3218	3	2131	2	591	27	4259	29	4014
	3	3	2832	2	1073	1	742	6	3965	8	780
	4	1	437	1	464			2	2186	2	1720
	5							1	297	1	324
	$\Sigma=$	62	13173	28	8082	11	3498	140	24504	140	15471
Red sintética	1	38	4880	22	4457	7	1549	53	9110	47	5325
	2	9	3710	6	3685	2	419	12	4797	9	1053
	3	2	2363	1	1206	1	691	4	1334	2	1908
	4	1	37					1	2085	1	1747
	$\Sigma=$	50	10990	29	9349	10	2659	70	17327	59	10034

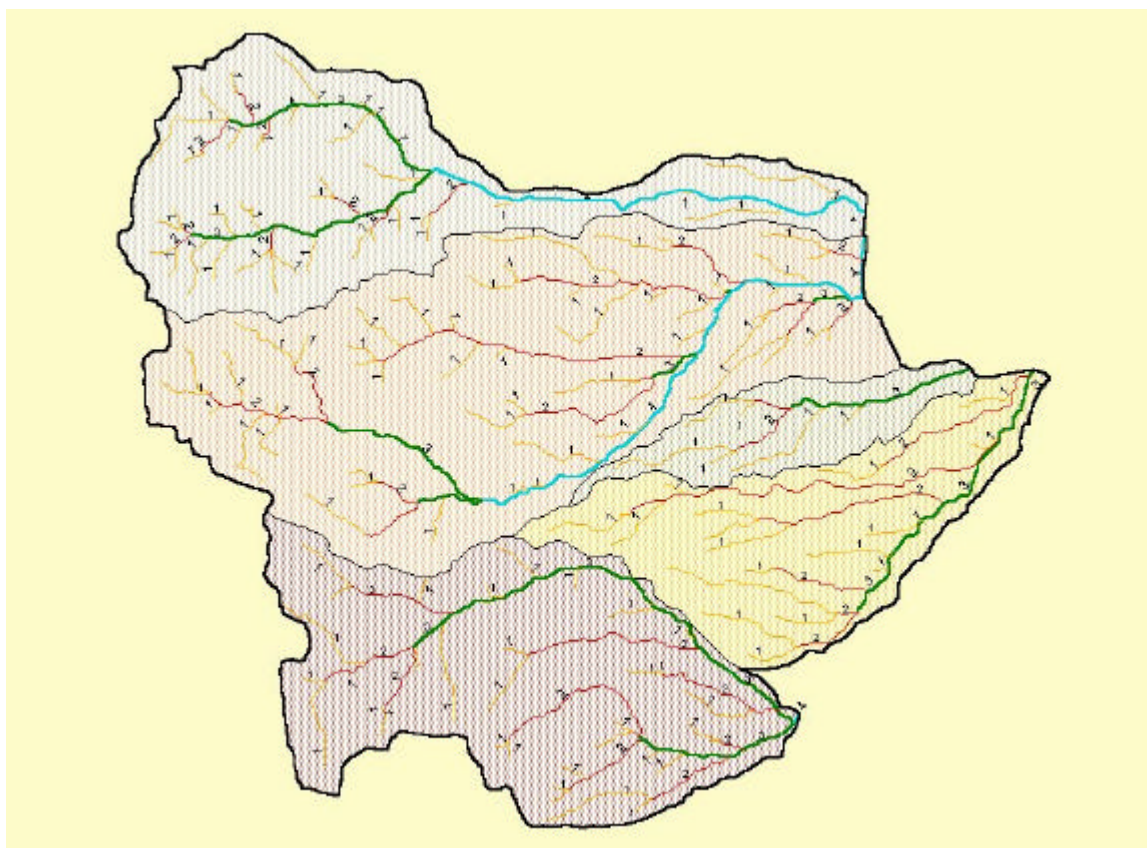


Figura 8. Jerarquización de cauces. Ordenes de Horton

La longitud de canales por unidad de área de la cuenca, definida por Horton (1932) como la relación entre longitud total de los cauces (Lc) y el área de la cuenca (A):

$$D = \frac{L_c}{A} \quad (1)$$

refleja la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red drenaje y el tipo de respuesta ante un evento de precipitación, por lo que condiciona la forma del hidrograma (Tabla 3). A mayor densidad de drenaje es más dominante el flujo en cauce que en ladera que se traduce en menores tiempos de concentración.

La frecuencia de canales (F) refleja en alguna medida, la actividad erosiva de las cuencas y queda representado por el número de cauces con respecto al área de la cuenca.

Tabla 3. Planilla de densidad de drenaje y frecuencia

	Red digitalizada						Red sintética				
	Area [Km ²]	Cant. de cauces	Dist. Total de cauces [m]	Lc1 km	Dd1 [Km/Km ²]	F	Cant. de cauces	Dist. Total de cauces [m]	Lc2 km	Dd2 [Km/Km ²]	F
Cuenca 301	1.263	62	13173	13.17	10.43	49.09	50	10990	10.99	8.70	39.59
Cuenca 302	0.808	28	8082	8.08	10.00	34.64	29	9349	9.35	11.56	35.87
Cuenca 303	0.287	11	3498	3.50	12.19	38.33	10	2659	2.66	9.27	34.85
Cuenca 304	1.935	140	24504	24.50	12.66	72.34	70	17327	17.33	8.95	36.17
Cuenca 305	1.130	140	15471	15.47	13.69	123.8	59	10034	10.03	8.88	52.19

Nota: Lc1, tomada con red de drenaje digitalizada, y Lc2 con red sintética de drenaje (GeoHMS)

Según la clasificación de Smith (1950) y Stralher (1957) todas las cuencas en ambas situaciones se presentan con una red de drenaje fina ($Dd > 13.7 \text{ km/km}^2$), típica de regiones con suelos muy erodables, poco permeables y con lluvias de alta intensidad.

Hidrología

Determinación del CN (metodología del U.S. Soil Conservation Service)

Se ha planteado la generación de modelados cartográficos para la determinación de parámetros hidrológicos tales como el Número de Curva (CN), aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones digitales a los mapas de cobertura vegetal y grupos hidrológicos de suelos, M.D.E. y mapas derivados de pendientes y aspectos. Esta información es requerida para la posterior modelación hidrológica integrando sistemas de información geográfica, interfases geoespaciales y modelos hidrológicos.

La determinación del número de curva (CN) se llevó a cabo de forma distribuida utilizando una tabla de clasificación. El cruzamiento de los mapas de cobertura vegetal (en analogía al uso del suelo) y el del tipo hidrológico de suelos se llevó a cabo dentro del SIG.

Por medio de la interpretación de una imagen Ikonos cedida por el Departamento General de Irrigación (Figura 9), se pudo obtener el estado actual o uso del suelo de la cuenca, por medio de la

cobertura vegetal. Se detectaron tres clases de cobertura vegetal (monte natural de poca y media cobertura herbácea y suelos desnudos o zonas de alta impermeabilidad), por medio de una clasificación no supervisada.

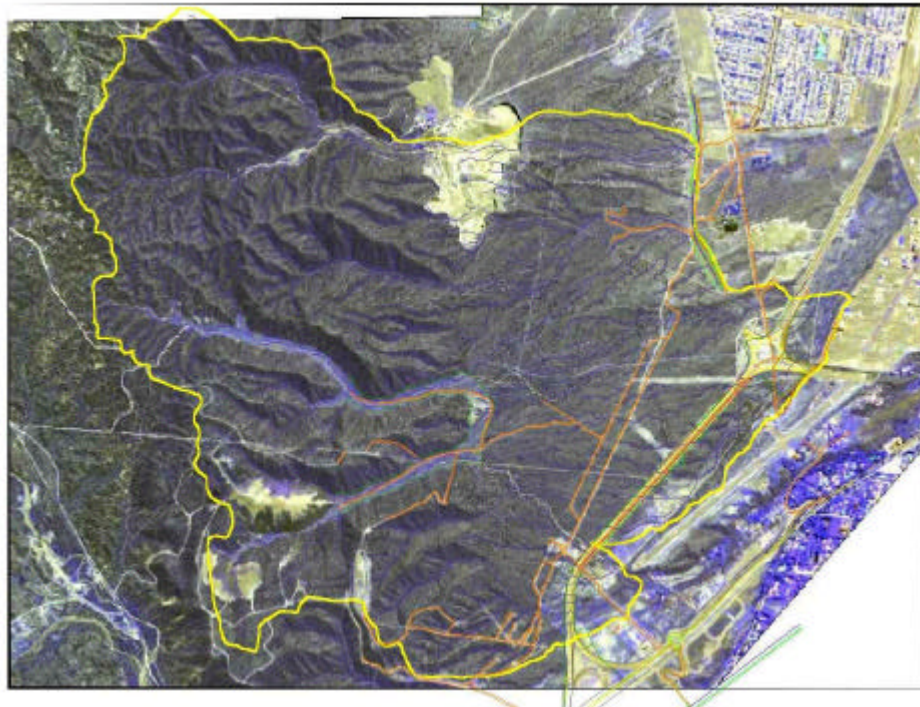


Figura 9. Imagen IKONOS (R:3 G:2 B:1)

El procesamiento digital de la imagen satelital se llevó a cabo dentro del mismo SIG, con la extensión Image Analysis del paquete ArcView GIS ®. Luego de rectificar la imagen se obtuvo una clasificación no supervisada de tres categorías utilizando como máscara el borde de cuenca y la imagen en composición falso color.

Las características de la imagen utilizada son:

- ✓ Nivel de procesamiento: Estándar Corregido Geométricamente (GEO)
- ✓ Tipo : PAN / MSI
- ✓ Resolución : 4m remuestada a 1m con banda pancromática
- ✓ Combinación Falso Color: R:Banda 3 (Visible-verde); G: Banda 2 (Visible3 rojo); B: Banda 1 (IR cercano)

El resultado obtenido fue un mapa de cobertura vegetal que fue luego contrastado en terreno(Figura 10) y utilizado como uso de suelo para el cálculo del CN distribuido.

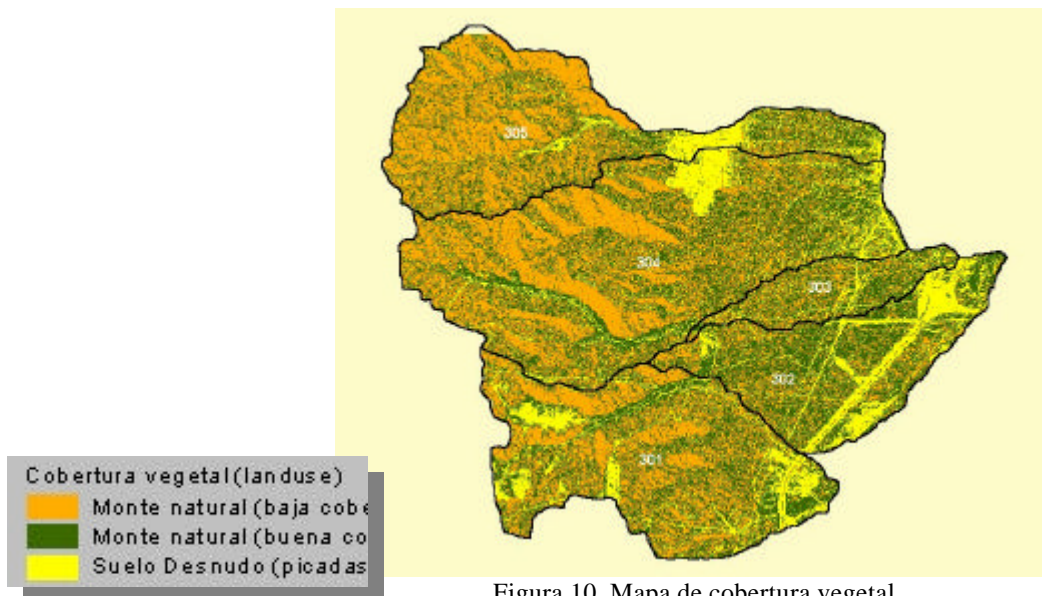


Figura 10. Mapa de cobertura vegetal

Al no existir un mapa de los grupos hidrológicos del suelo en el área en estudio, se decidió generarlo a partir de un cruzamiento espacial entre los mapas de pendientes, y el tipo de suelo, logrando un mapa que sigue la siguiente tabla:

Tabla 4. Grupos hidrológicos de suelo (de USDA-SCS, 1964)

Grupo hidrológico del suelo	Potencial de escorrentía	Pendiente	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Cobertura Vegetal	Suelos típicos
A	Escaso	0 a 3%	Alta	Monte natural (buena cobertura vegetal)	Arenas y grava excesivamente drenadas
B	Moderado	3 a 10%	Moderada	Monte natural (baja cobertura vegetal)	Texturas medias
C	Medio	>10%	Lenta	Suelo Desnudo	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo
D	Elevado	-	Muy lenta	Impermeable	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables

El resultado obtenido se muestra en la Figura 11.

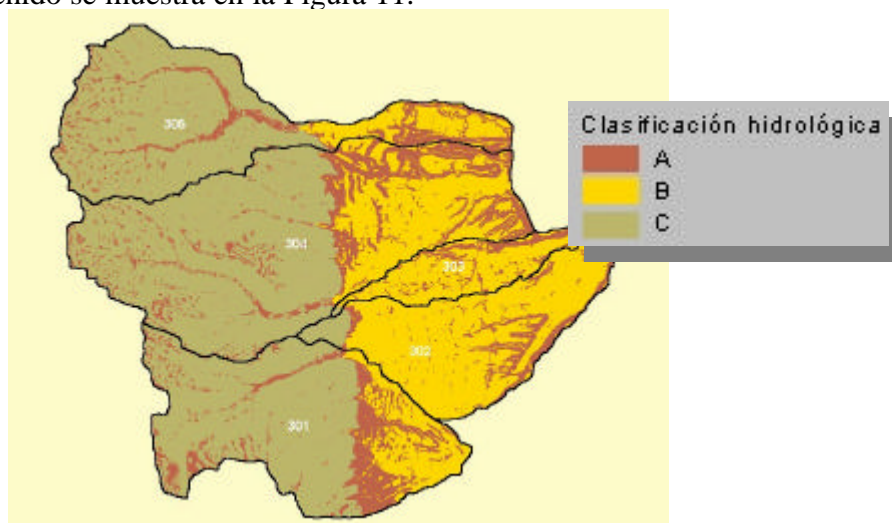


Figura 11. Mapa de Clasificación hidrológica de suelos.

La tabulación cruzada para la obtención del CN se llevó a cabo con la siguiente tabla:

Tabla 5. Código de Clasificación para el cálculo del CN

Código	Cobertura Vegetal	CN			
		Clasificación Hidrológica de Suelos (SCS)			
		A	B	C	D
1000	Externo	0	0	0	0
2000	Monte Natural (1) (20% de cob. vegetal)	66	76	83	87
3000	Monte Natural (2) (60% de cob. vegetal)	49	68	78	82
4000	Suelo Desnudo (Picadas, urbanizac.)	72	82	87	90

(1): *Estepa arbustiva con bajo nivel de cobertura vegetal*

(2): *Estepa arbustiva con cobertura herbácea media*

Las operaciones realizadas para determinar el CN se podrían representar y explicar mediante el diagrama de flujo de la Figura 12.

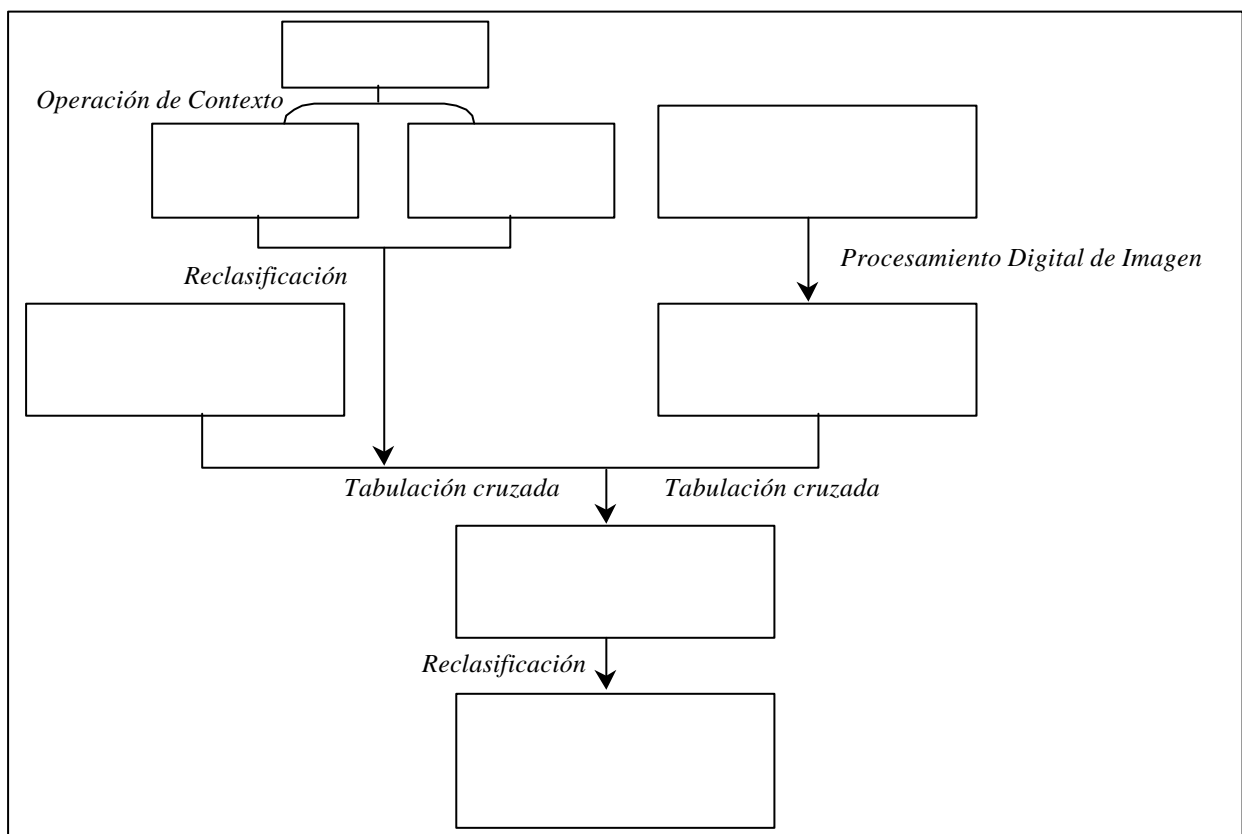


Figura 12. Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN

El mapa de valores distribuido de CN se muestra en Figura 13 y los valores medios por cuenca en la Tabla 6.

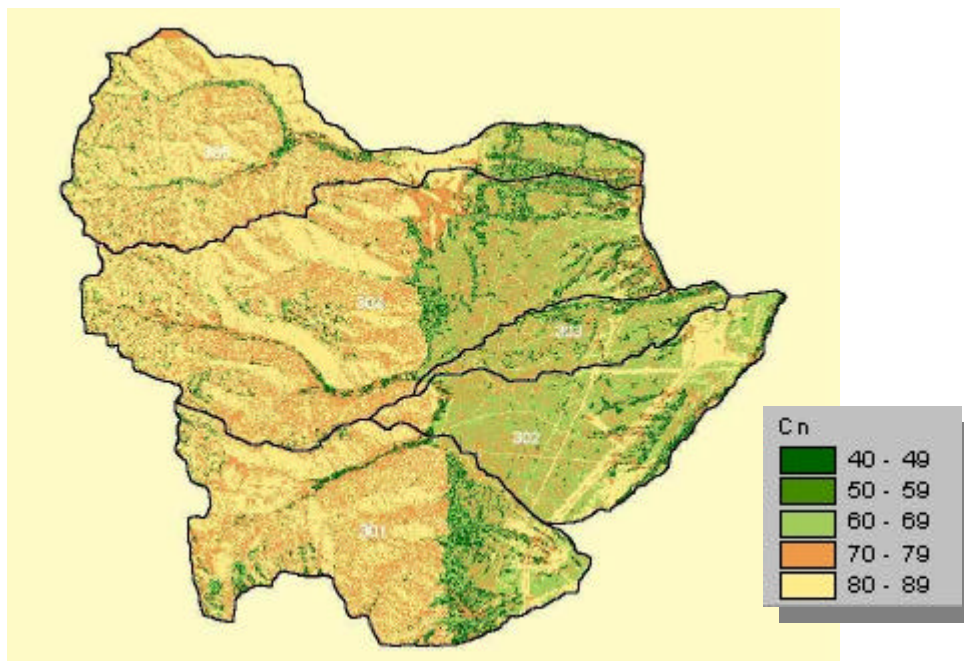


Figura 13. Mapa de CN distribuido

Tabla 6. Valores de CN medios por cuenca

Sub cuenca	Area [Km ²]	CN
301	1.263	76.0
302	0.808	71.8
303	0.287	69.7
304	1.935	75.6
305	1.130	77.5
Total	5.424	75.2

Tormenta de Diseño

Se aplicó para el modelado hidrológico la tormenta de diseño para Mendoza, desarrollada por el Instituto Nacional del Agua-Centro Regional Andino, (INA-CRA), para los tiempos de recurrencia 2, 5 y 10 años.

Las láminas de precipitación, sin decaimiento areal, utilizadas en todas las modelaciones hidrológicas fueron las siguientes:

Tabla 7. Láminas de precipitación

Duracion [min]	LAMINA (mm)		
	TR2	TR 5	TR 10
5	1.8	2.5	2.9
10	1.0	1.4	1.7
15	3.7	5.2	6.1
20	6.6	9.2	10.8
25	9.0	12.5	14.7
30	12.4	17.3	20.2
35	5.1	7.1	8.4
40	2.4	3.3	3.9
45	0.7	1	1.1
50	0.2	0.3	0.4
55	0.0	0.1	0.1
60	0.0	0.1	0.1
$\Sigma=$	43.0	60.0	70.4

Modelación con HEC GeoHMS

Una vez introducidos los mapas temáticos dentro del SIG, con la extensión del HEC GeoHMS, se procedió a realizar el preprocesamiento del terreno consistente en el llenado de vacíos, dirección de flujo, hidrografía y delimitación automática de subcuencas, caracterización morfométrica y topología.

El llenado de vacíos se realiza para que la cuenca tenga continuidad y salida única sin zonas de depresión que implique un estancamiento del flujo. Este paso consiste en corregir la cota del M.D.E. en las zonas donde en un grupo de 3x3 celdas, la central posea cota menor que las 8 restantes, lo que produciría un corte en las líneas de flujo.

Del mapa de dirección de flujo junto con el mapa de flujo acumulado deriva la hidrografía y la delimitación de subcuencas al ir definiendo salidas.

Una vez completado el preprocesamiento, se obtuvieron los parámetros morfométricos de las cuencas y su topología (Figura 14), como las distancias de cauces, pendientes, máximos recorridos, centroides de cuenca, áreas y perímetros.

La modelación hidrológica se llevó a cabo usando como entrada los hietogramas para TR 2, 5 y 10 años afectados por la reducción areal en función del área de las cuencas. Para las pérdidas y el modelo de transformación lluvia-escorrentía se utilizó el método del SCS.

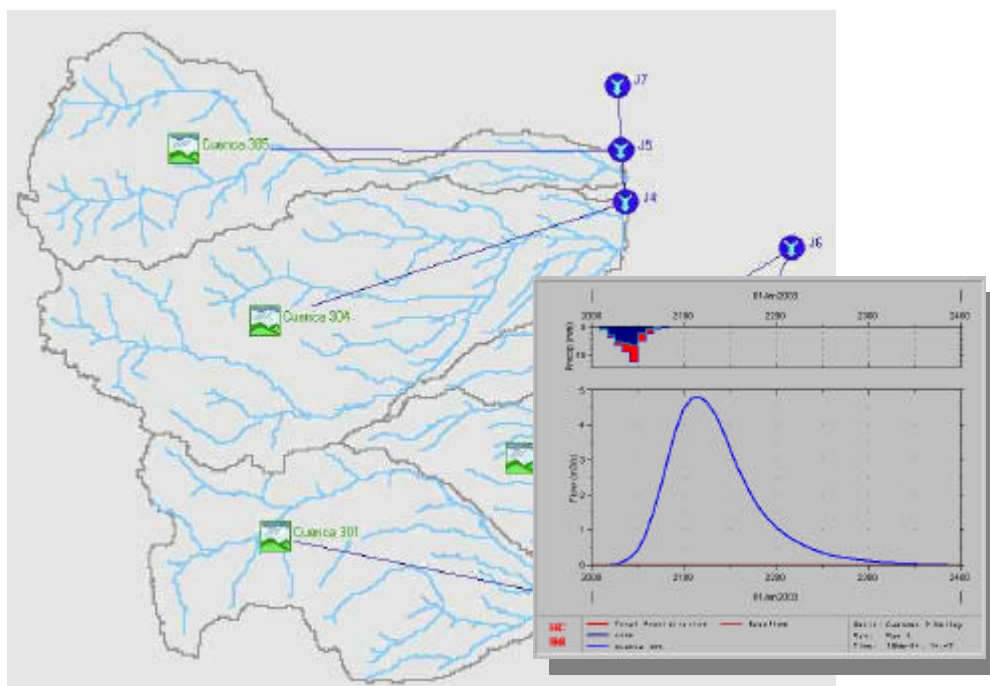


Figura 14. Topología de cálculo e hidrograma de salida en HEC- HMS para la cuenca R305

Los resultados de la aplicación de HEC-HMS se visualizan en la Tabla 8

Tabla 8. Resultados modelación hidrológica con HEC HMS

Cuenca	TR= 2 años			TR= 5 años			TR= 10 años		
	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)
301	4.99	0.018	14.2	8.65	0.031	24.5	11.03	0.039	31.2
302	4.36	0.014	17.1	7.11	0.022	27.8	8.89	0.028	34.7
303	1.52	0.004	12.3	2.69	0.006	21.4	3.47	0.008	27.6
304	5.07	0.022	11.5	9.15	0.040	20.8	11.86	0.052	26.9
305	4.09	0.015	13.3	7.31	0.027	23.7	9.49	0.035	30.8

Modelación con ARHYMO

El modelo ARHYMO es un modelo determinístico de parámetros concentrados que fue ampliamente utilizado en Argentina desde 1993 (Maza, J. et al., 1993). En este proyecto se hizo uso de la nueva versión en entorno Windows (Fornero, L. et al., 2002).

El diagrama topológico está formado por las 5 cuencas rurales (Figura 15) y como datos de entrada se utilizó la planilla de parámetros morfométricos (Tabla 1), la planilla de los valores de CN medios por cuenca (Tabla 6) y los hietogramas de precipitación de la tormenta de proyecto (Tabla 7) afectados por la reducción areal en función del área de las cuencas. En la Tabla 9 y en la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de ARHYMO.

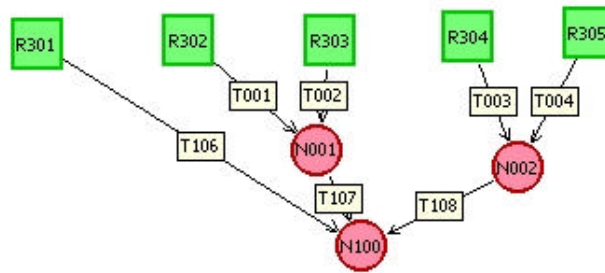


Figura 15. Topología de modelación en ARHYMO

Tabla 9. Resultados obtenidos con modelación en ARHYMO

Cuenca	TR= 2 años			TR= 5 años			TR= 10 años		
	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)
R301	3.51	0.011	8.5	7.19	0.022	17.5	9.66	0.030	23.6
R302	2.14	0.006	7.4	4.40	0.012	15.3	6.01	0.017	21.0
R303	1.05	0.002	8.3	1.75	0.004	13.9	2.42	0.006	19.2
R304	4.39	0.014	7.5	8.34	0.031	15.8	11.36	0.042	21.5
R305	3.33	0.011	9.5	6.67	0.022	19.1	8.98	0.029	25.7
Salida (N100)	13.49	0.044	8.1	27.49	0.091	16.7	42.20	0.140	25.7

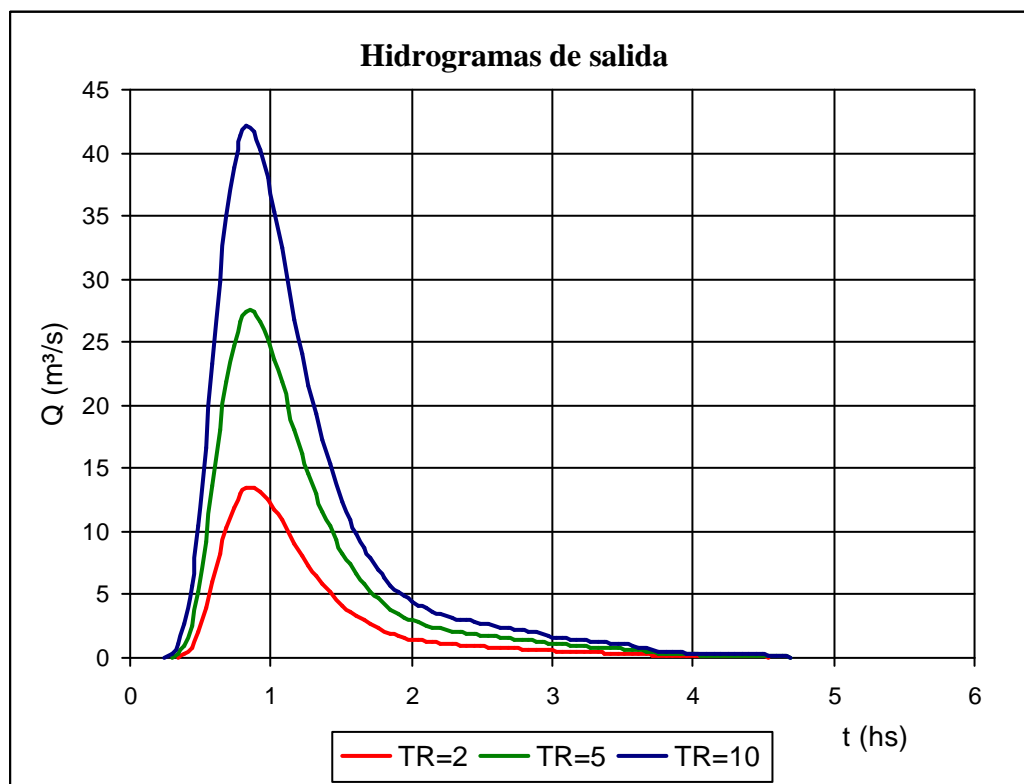


Figura 16. Hidrogramas de salida en ARHYMO para el nodo N100 para TR= 2, 5 y 10 años

Modelación con método de Clark

Aprovechando el desarrollo existente de software que vincula las características geomorfológicas de las cuencas con sus respuestas hidrológicas y la facilidad de obtener tales parámetros geomorfológicos con el S.I.G. y M.D.E., es que se decidió implementar el método de Clark.

El método de Clark consiste en convolucionar un hidrograma unitario instantáneo (HUI) calculado a partir de las curvas isocronas (curvas que unen puntos de la cuenca con igual tiempo de desagüe) de cada cuenca.

Para la determinación de estas isocronas se utilizó la extensión HyGrid 2k2 del S.I.G. Woditem, desarrollado en Udine.

Como punto de partida una vez obtenido el M.D.E., se procede a corregir cualquier depresión que impida el libre flujo hasta la salida de la cuenca.

La metodología del cálculo de las curvas isocronas se puede explicar mediante el diagrama de flujo de la Figura 17.

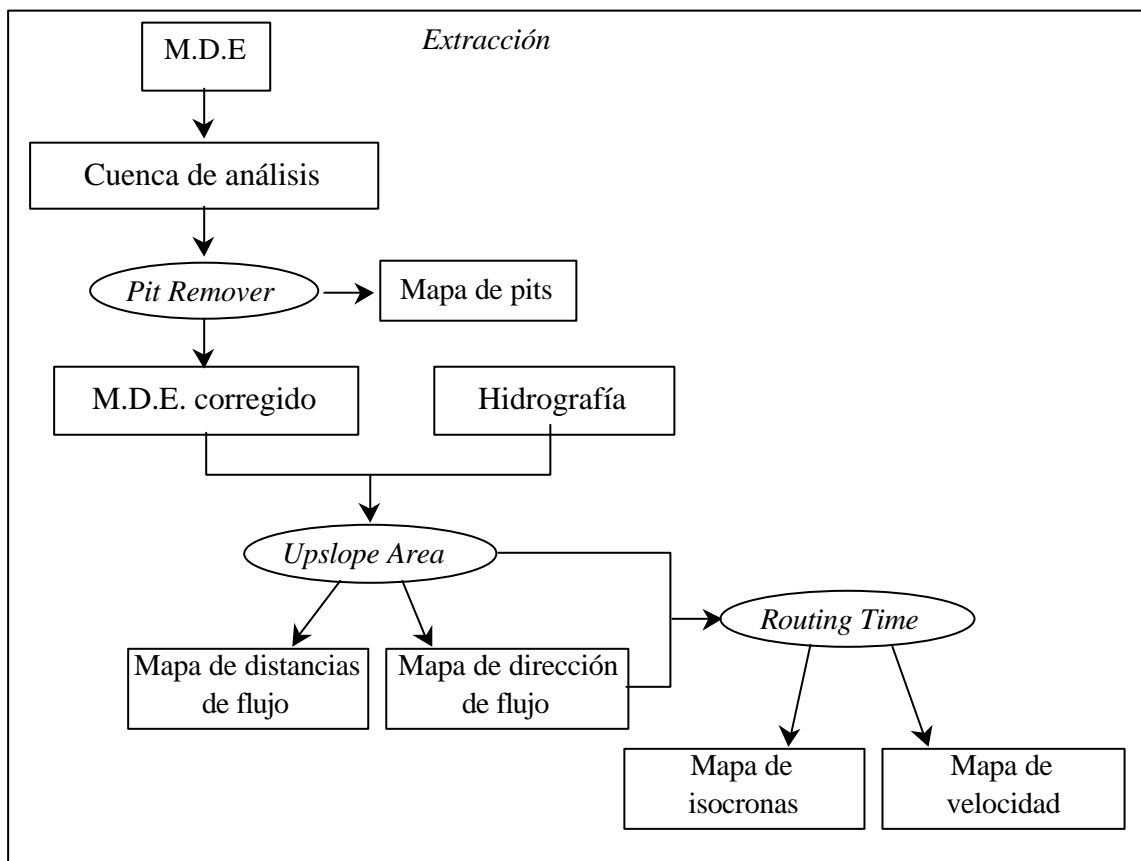


Figura 17. Diagrama de flujo para el cálculo de las isocronas de una cuenca

El mapa de área drenada (Upslope Area) es un raster en el cual cada celda indica la cantidad de celdas que drenan a ésta. Junto con el mapa de dirección de flujo, que puede ser calculado con distintos métodos (D8 clásico o facetado, D infinito, o Flujo múltiple) y mediante la rutina “Routing Time” se generan los dos mapas finales, el de velocidades y las isocronas.

El cálculo de la velocidad de propagación del flujo está dividida en tres bloques según que el área drenada esté por encima, debajo o dentro de ciertos umbrales expresados en número de celdas.

$$si[area_drenada] > 40000 \rightarrow v = 1.6 \left(\frac{area_drenada}{40000} \right)^{0.07} \quad (2)$$

$$si 40000 > [area_drenada] > 40 \rightarrow v = 1.6 m/s \quad (3)$$

$$si [area_drenada] < 40 \rightarrow v = 0.5 m/s \quad (4)$$

La ecuación (2) expresa que si el área drenada supera el umbral de 40000 celdas (10 Ha) la velocidad está en función del área drenada con un mínimo de 1,6 m/s. La ecuación (3) expresa la velocidad en cauce ($v=1.6m/s$) cuando el área se encuentra entre el mínimo y el máximo umbral. Por último se define la velocidad en ladera (overlandflow) cuando el área drenada no supere las 40 celdas ($1000m^2$).

El primer resultado de las operaciones realizadas con los mapas de dirección de flujo, isodistancias, y área drenada es el mapa de velocidades distribuidas. En el mapa de velocidades de la cuenca R304 (Figura 18) se observa la distribución de velocidades tanto en cauces como en laderas.

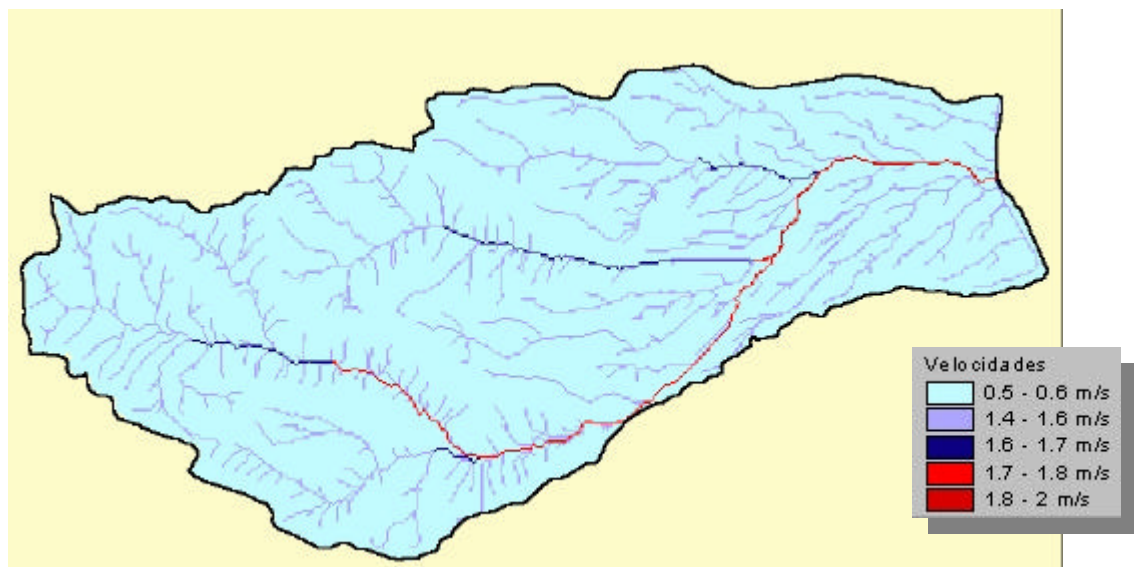


Figura 18. Mapa de Isovelocidades de flujo para cuenca R304

Los mapas derivados del primer análisis con la rutina Upslope Area son : el mapa de dirección de flujo (Figura 19) que representa el ángulo de escurrimiento de cada celda y el mapa de isodistancias de flujo (Figura 20) que representa los recorridos de los escurrimientos expresados en longitudes a través de la red hidrográfica sintética.

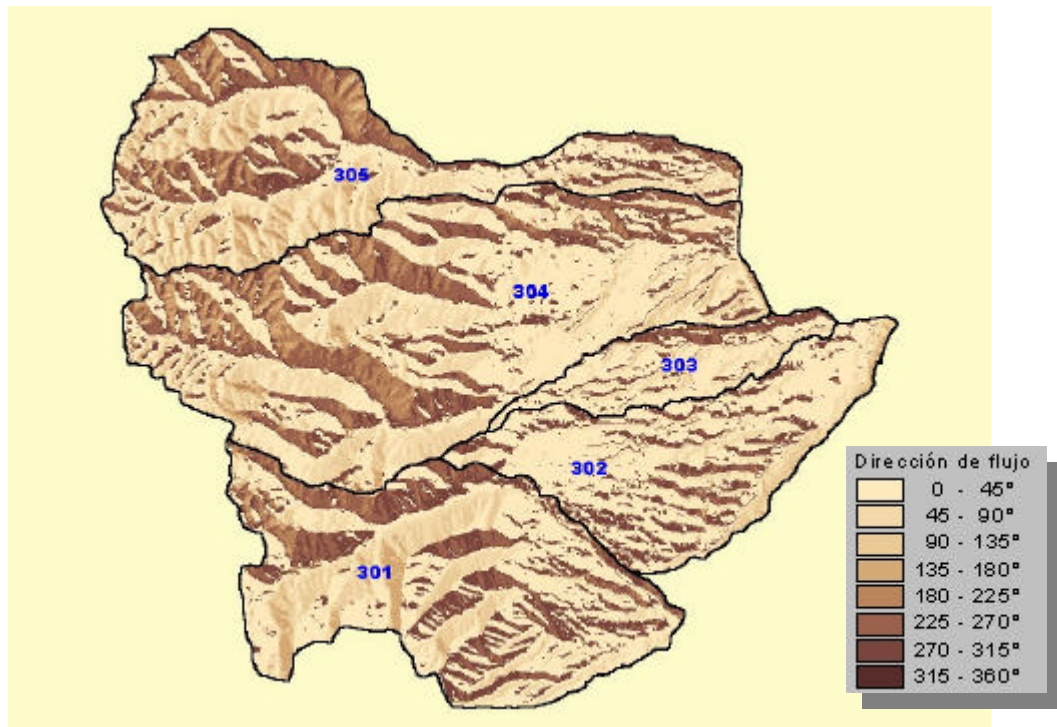


Figura 19. Mapa de Dirección de flujo

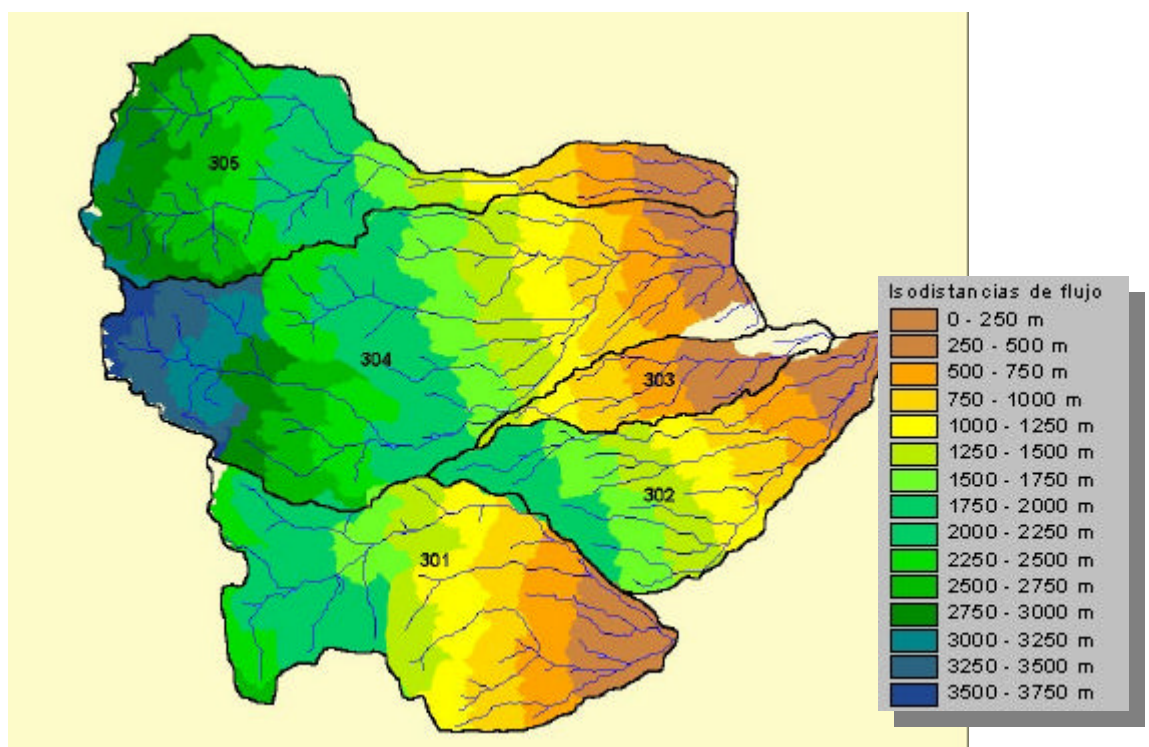


Figura 20. Mapa de Isodistancias de flujo

Por último con la rutina *Routing Time* se obtuvo el mapa de isocronas. (Figura 21)

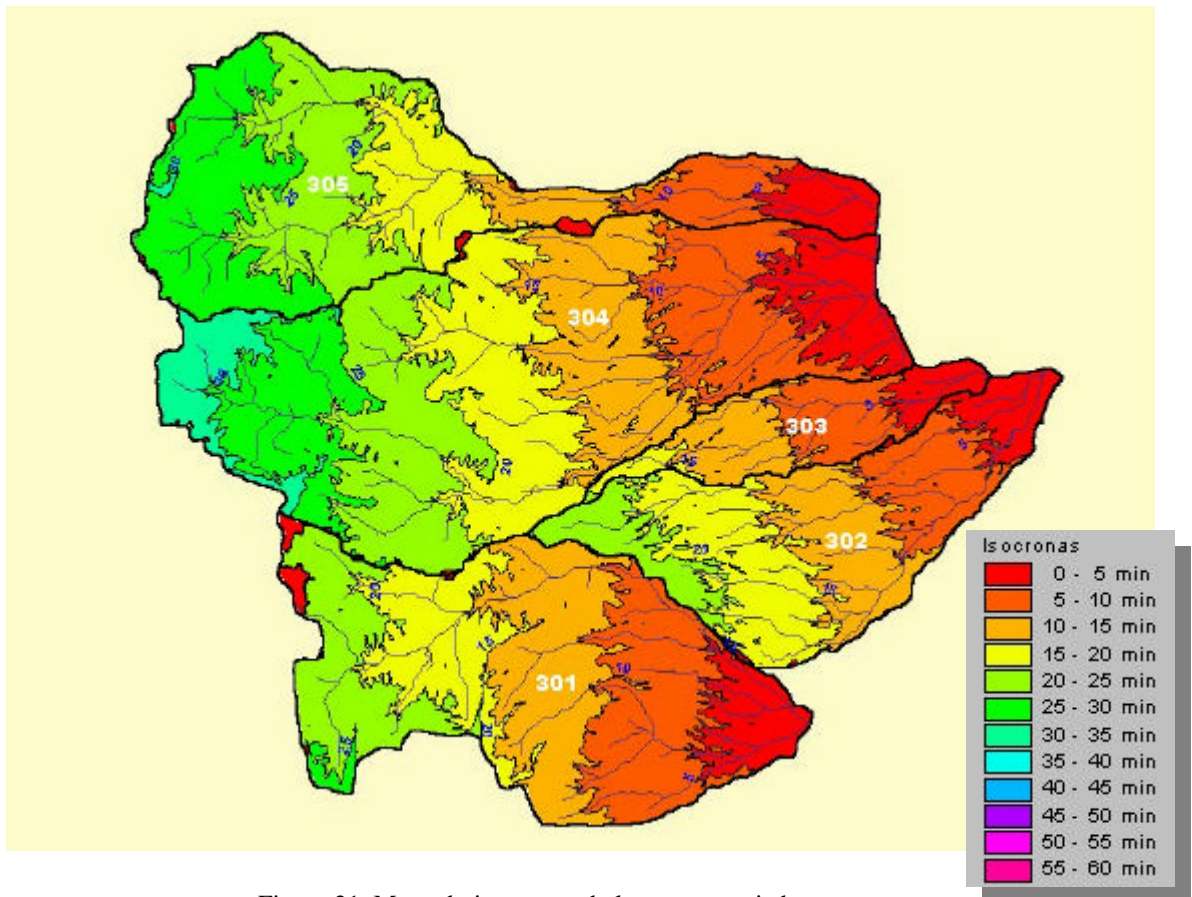


Figura 21. Mapa de isocronas de las cuencas piedemontanas

Una vez obtenido el mapa de isocronas de cada cuenca, se determinan las curvas área-tiempo utilizando los histogramas de frecuencias (Tabla 10 y Figura 22).

Tabla 10. Histograma de frecuencias para Curva Tiempo – Área de la cuenca 304

Intervalos de Tiempo (min)		Frecuencia	Area (km2)	Suma	Media	Min	Max	Area acum
0	5	6935	0.173	379.930	0.055	0.001	0.083	0.173
5	10	11365	0.284	1425.552	0.125	0.083	0.167	0.458
10	15	14061	0.352	2962.713	0.211	0.167	0.250	0.809
15	20	15460	0.387	4498.623	0.291	0.250	0.333	1.196
20	25	15004	0.375	5579.178	0.372	0.333	0.417	1.571
25	30	9811	0.245	4532.245	0.462	0.417	0.500	1.816
30	35	5034	0.126	2626.529	0.522	0.500	0.572	1.942
		77670	1.942	22004.770	0.283	0.001	0.572	

Curvas Tiempo Area

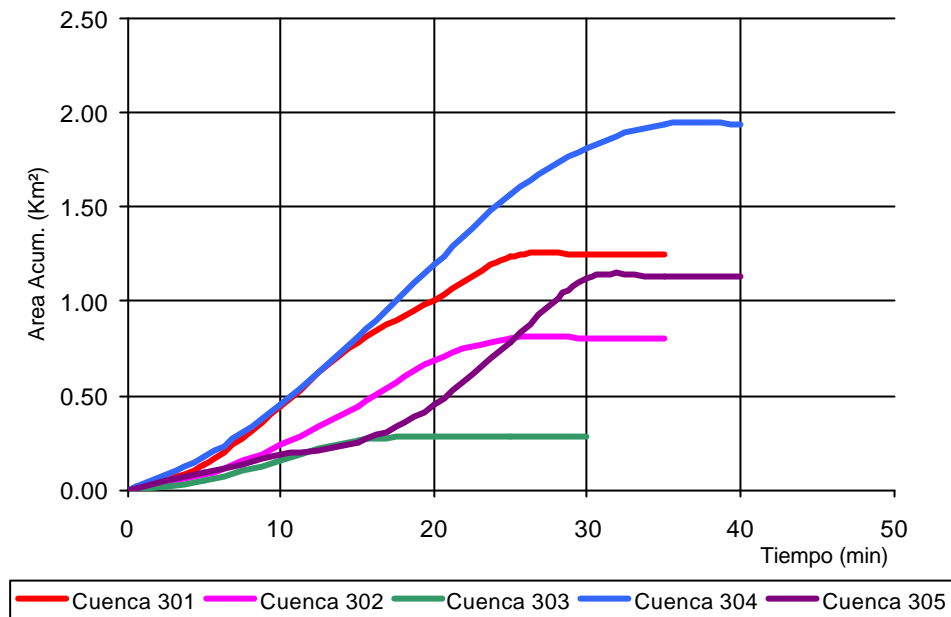


Figura 22. Curvas Tiempo – Area

El hidrograma unitario instantáneo (HUI) del método de Clark se determinó mediante planilla de cálculo utilizando las ecuaciones (5) a la (8) y parámetros que se ejemplifican con el caso de la cuenca 304, (Tabla 11):

El tiempo de concentración (t_c), de cada cuenca, se obtuvo con el mapa de isocronas generado.

$$C_0 = \Delta T / (k + 0.5 \Delta T) \quad (5)$$

$$C_2 = (k - 0.5 \Delta T) / (k + 0.5 \Delta T) \quad (6)$$

$$k = t_c / 2 \quad (7)$$

$$F = P_{ef} (m) \times \text{Area Cuenca} (m^2) / \Delta T (seg) / 100 \quad (8)$$

$$t_c = 0.572 \text{ hr}$$

$$k = t_c / 2 = 0.286 \text{ hr}$$

$$C_0 = \Delta T / (k + 0.5 \Delta T) = 0.254$$

$$C_2 = (k - 0.5 \Delta T) / (k + 0.5 \Delta T) = 0.746$$

$$C_0 + C_2 = 1$$

$$F = P_{ef} (m) \times \text{Area Cuenca} (m^2) / \Delta T (seg) / 100 = 0.065$$

$$P_{ef} = 0.001 \text{ m}$$

$$\text{Area Cuenca} = 1935177 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 300 \text{ seg}$$

Tabla 11. Cálculo de Hidrograma Unitario de Clark

0	1	2	3	4	5	6
Tiempo (hr)	Frecuencia	Area (%)	C0 x (2)	C2 x (5) ⁱ⁻¹	(3)+(4)	(5) x F
						HUI (m ³ /s mm)
0.000	0	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.083	6935	8.93	2.272	0.000	2.272	0.147
0.167	11365	14.63	3.723	1.694	5.417	0.349
0.250	14061	18.10	4.606	4.039	8.645	0.558
0.333	15460	19.90	5.065	6.445	11.510	0.742
0.417	15004	19.32	4.915	8.581	13.496	0.871
0.500	9811	12.63	3.214	10.062	13.276	0.856
0.583	5034	6.48	1.649	9.898	11.547	0.745
0.667		0.00	0.000	8.609	8.609	0.555
0.750		0.00	0.000	6.419	6.419	0.414
0.833		0.00	0.000	4.786	4.786	0.309
0.917		0.00	0.000	3.568	3.568	0.230
1.000		0.00	0.000	2.660	2.660	0.172
1.083		0.00	0.000	1.983	1.983	0.128
1.167		0.00	0.000	1.479	1.479	0.095
1.250		0.00	0.000	1.102	1.102	0.071
1.333		0.00	0.000	0.822	0.822	0.053
1.417		0.00	0.000	0.613	0.613	0.040
1.500		0.00	0.000	0.457	0.457	0.029
1.583		0.00	0.000	0.341	0.341	0.022
1.667		0.00	0.000	0.254	0.254	0.016
1.750		0.00	0.000	0.189	0.189	0.012
1.833		0.00	0.000	0.141	0.141	0.009
1.917		0.00	0.000	0.105	0.105	0.007
2.000		0.00	0.000	0.078	0.078	0.005
2.08		0.00	0.000	0.059	0.059	0.004
2.17		0.00	0.000	0.044	0.044	0.003
2.25		0.00	0.000	0.033	0.033	0.002
2.33		0.00	0.000	0.024	0.024	0.002
2.42		0.00	0.000	0.018	0.018	0.001
2.50		0.00	0.000	0.013	0.013	0.001
2.58		0.00	0.000	0.010	0.010	0.001
2.67		0.00	0.000	0.007	0.007	0.000

Luego para cada una de las cuencas se convolucionó el HUI con las precipitaciones efectivas correspondientes a los eventos de TR= 2, 5 y 10 años obteniendo así los hidrogramas de escurrimiento (Figura 23 y Tabla 12).

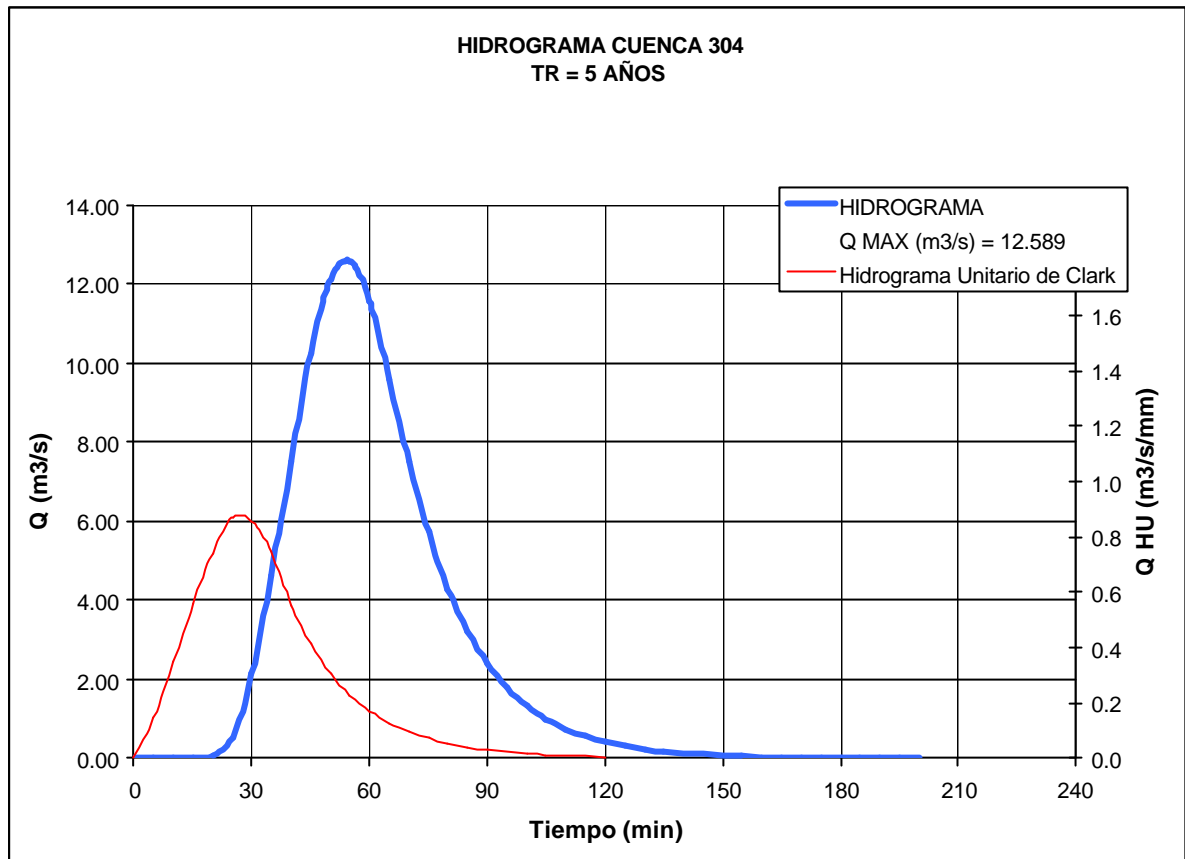


Figura 23. Hidrograma de salida cuenca 304 para TR= 5 años

Tabla 12. Caudales pico por cuenca con el HUI de Clark

	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 10 años
Cuenca	Qp (m³/s)	Qp (m³/s)	Qp (m³/s)
301	5.46	11.02	14.76
302	3.14	6.59	8.96
303	1.13	2.50	3.47
304	6.04	12.59	17.05
305	5.18	10.41	13.91

Calibración y Ajuste de Parámetros

Para el procesamiento de las cuencas rurales, el modelo ARHYMO convolucionaba el hidrograma de precipitación efectiva con un HUI sintético. Este HUI 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 el final por dos ecuaciones exponenciales de recesión.

Los parámetros K (constante de recesión del HUI) y TPU (tiempo al pico del HUI) son parámetros de calibración o ajuste.

Como dato de entrada al modelo (Figura 24) se pueden ingresar:

- los valores correspondientes a la morfometría (diferencia de elevación y longitud del cauce más largo) ya que el modelo posee ecuaciones que calculan los parámetros K y TPU en función de tales valores; ó
- los parámetros K y TPU directamente

Figura 24. Pantalla de ingreso de datos para una cuenca rural en el modelo ARHYMO

Debido a la poca aplicabilidad de las ecuaciones de Arhymo para áreas muy pequeñas, (estamos analizando el extremo inferior del rango), se decidió ajustar los hidrogramas generados por ARHYMO con los resultantes de la aplicación del método de Clark por medio de la modificación del parámetro K, verificando por comparación de hidrogramas, el caudal pico y tiempo al pico. El parámetro TPU no se calibró debido a que los hidrogramas simulados por ambos métodos no fueron sensibles en la variación de tal parámetro.

Este ajuste se realizó en forma manual en 10 cuencas rurales logrando un conjunto de datos que permitieron efectuar una correlación entre las variables área, longitud de cauce, diferencia de altitud y K de cada cuenca ajustada, de manera de obtener una ecuación que se pudiera generalizar para los otros casos.

La ecuación del parámetro K ajustado para las cuencas de estudio es:

$$K_{ajust} = 0.036 \cdot A^{-0.2} \cdot Lc^{1.1} \cdot \Delta H^{0.15} \quad (R^2 = 0.716) \quad (9)$$

mientras que la que posee ARHYMO (Maza, J. et al, 1993) para HT/L >2.45% es:

$$K_{ARHYMO} = 0.48 \cdot A^{0.2} \cdot Lc^{0.3} \cdot \Delta H^{-0.1} \quad (10)$$

$$TP = 1,51 \cdot A^{0,3} \cdot Lc^{0,5} \cdot \Delta H^{-0,4}$$

donde:

K_{ajust} = constante de recesión del HUI en horas.

TP = tiempo al pico del HUI en horas.

A = área de la cuenca en km^2 .

L = longitud de la cuenca en km, medida sobre el cauce de mayor longitud.

ΔH = diferencia de altitud en metros, en la cuenca, entre la altura máxima en cabecera y la mínima a la salida de la cuenca.

Se hace notar que al trabajar con cuencas con áreas que oscilan entre 0,1 y 1,9 Km^2 , los exponentes de las variables A y ΔH muestran signos opuestos a lo esperado, así como la discusión siguiente muestra la importancia de usar los coeficientes K y Tpu corregidos en Arhymo para cuencas muy pequeñas.

Con la ecuación de calibración obtenida se simularon las 5 subcuencas rurales (Figura 15) ingresando en lugar de los parámetros morfométricos, los valores de K y TPU, verificando en los hidrogramas de salida el ajuste con respecto al hidrograma calculado por método de Clark (Figura 25). Se puede apreciar también en la Tabla 13 los buenos resultados de la calibración en el caso del Nodo 100 y los tiempos de recurrencia empleados.

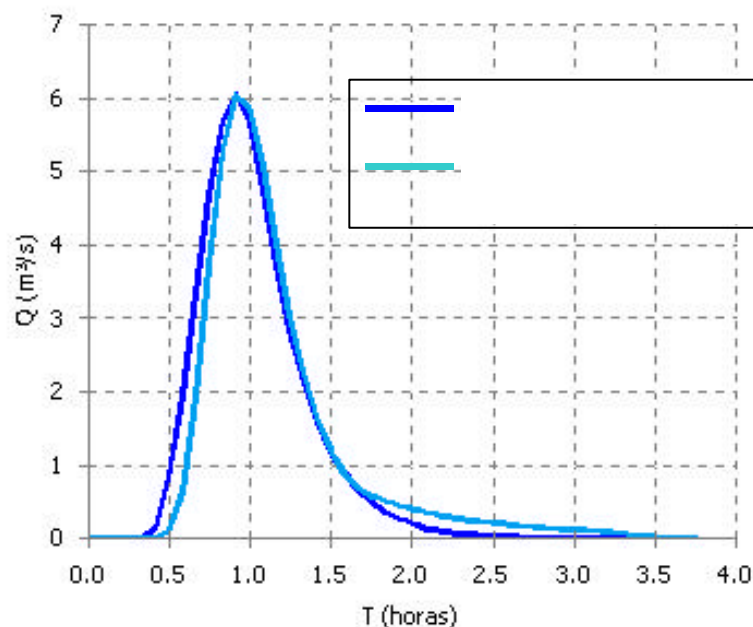


Figura 25. Calibración y ajuste de hidrograma de cuenca rural 304 para TR=2 años

Tabla 13. Resultados de la aplicación del método de Clark y el modelo ARHYMO

		Clark	ARHYMO
TR=2	Qp (m ³ /s)	19.29	18.89
	Tp (hs)	0.83	0.85
	V (Hm ³)	0.043	0.044
TR=5	Qp (m ³ /s)	40.28	40.10
	Tp (hs)	0.83	0.84
	V (Hm ³)	0.090	0.091
TR=10	Qp (m ³ /s)	54.61	55.32
	Tp (hs)	0.83	0.84
	V (Hm ³)	0.123	0.140

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro del desarrollo de acciones de planeación para el manejo y desarrollo sustentable de una cuenca piedemontana no aforada, la metodología propuesta ha permitido optimizar el tiempo y los recursos, tanto humanos como económicos, permitiendo la caracterización morfológica e hidrológica de la misma.

El uso de modelos digitales de elevación conlleva a la automatización de mapas derivados utilizados como datos de entrada en un modelo hidrológico. La captura de la información hipsométrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del MDE. Se trata de una fase de gran trascendencia porque la calidad de los datos es el principal factor limitante para los tratamientos que se realicen posteriormente. Por lo tanto, el problema radica en la generación y calidad del MDE. En el caso de estudio presentado, se recurrió a la digitalización de curvas de nivel, obtenidas por vuelos aerofotogramétricos, método tedioso y todavía lento, pero alto en su nivel de detalle (grilla de 5 x 5m).

En la actualidad existen métodos semiautomáticos de extracción de elevaciones por medio de sensores remotos, ya sea por radar, como la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) que generó un modelo global de elevaciones con una resolución de 90m por pixel, o por estereoscopia usando las bandas 3B y 3N del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) logrando una resolución de 30m. La ventaja que conlleva el uso de estos métodos se reduce al necesitar una red de puntos de control geodésico para ajustar las elevaciones al geoide local.

Se ha comprobado que la extracción automática de parámetros morfométricos tiene alta similitud con los extraídos por medios manuales que, aún siendo digitales, conllevan mucho tiempo en su realización.

La aplicación del método de Clark, permitió calibrar los parámetros de ajuste del modelo Arhymo, pero la correlación efectuada, solo tuvo en consideración parámetros de 10 subcuencas para distintas recurrencias (2, 5 y 10 años), no contemplando una gran fluctuación en el área de la cuenca, implicando que la ecuación de ajuste lograda, sólo se debería aplicar en cuencas con áreas menores a 2 km².

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al grupo interdisciplinario del INA CRA que brindó apoyo logístico, y en especial al Ing. Jorge Maza en carácter de Consejero de mi beca de perfeccionamiento profesional y técnico.

BIBLIOGRAFÍA ANTECEDENTE Y DE CONSULTA

- Bosque S. J., Escobar F.J., García E., Salado M.J.**, (1994) *Sistemas de Información Geográfica: Prácticas con ARC/INFO e IDRISI*, Addison-Wesley Iberoamericana.
- Brena Zepeda, J.E. y González Verdugo, J.A** (2002) “*Manejo digital de información geográfica para el apoyo a planeación de los recursos en cuencas hidrográficas*” Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2000).
- Cazorzi, Federico** (2002) *Woditem HyGrid2k2 – Guida de riferimento* . Università degli studi di Udine.
- Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Domínguez Cortazar et al.**, (1999) “*Los sistemas de información geográfica y su utilización en la modelación hidrológica*” Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Felicísimo, Angel Manuel**, (1997) “*Descripción y análisis del relieve*” “*Simulación de procesos: cuencas hidrológicas y cuencas visuales*”.
- Felicísimo, Angel Manuel**, (1994) *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones, Oviedo.
- Fornero, Luis**, Aldo Pavese, Jorge Maza, Diego Vega, (2002) “*Actualización del modelo hidrológico ARHYMO*”. Congreso Nacional del Agua, Carlos Paz, Córdoba.
- Gómez Garzón, Alfredo**, (1999) “*Caracterización del medio físico de la cuenca del río Tembembe empleando Sistemas de Información Geográfica*” Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje.
- Hydrologic Engineering Center** (2000) *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual* U.S. Army Corps of Engineers. U.S.A.
- Jansle Vieira Rocha** , (2000) “*El sistema de informaciones Geográficas (SIG) en los contextos de planificación del medio físico y de las cuencas hidrográficas*” Trabajo presentado en el II curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental , Cap. 7 pag 102-113.
- Maza, Jorge; L. Fornero; C. Litwin y P. Fernández**, (1993) *ARHYMO. Manual del Usuario*. INCyTH-CRA. Mendoza
- Maza J.A., V. Burgos, P. López, V. Benegas**. (2004) “*Sustentabilidad hidrológica de urbanizaciones en pedemonte*”. Informe Técnico IT N° 51-CRA. INA, Mendoza.
- UTN-Fac. Reg. Mendoza** , (1998) “*Estudio de Impacto Ambiental PALMARES VALLEY*”.