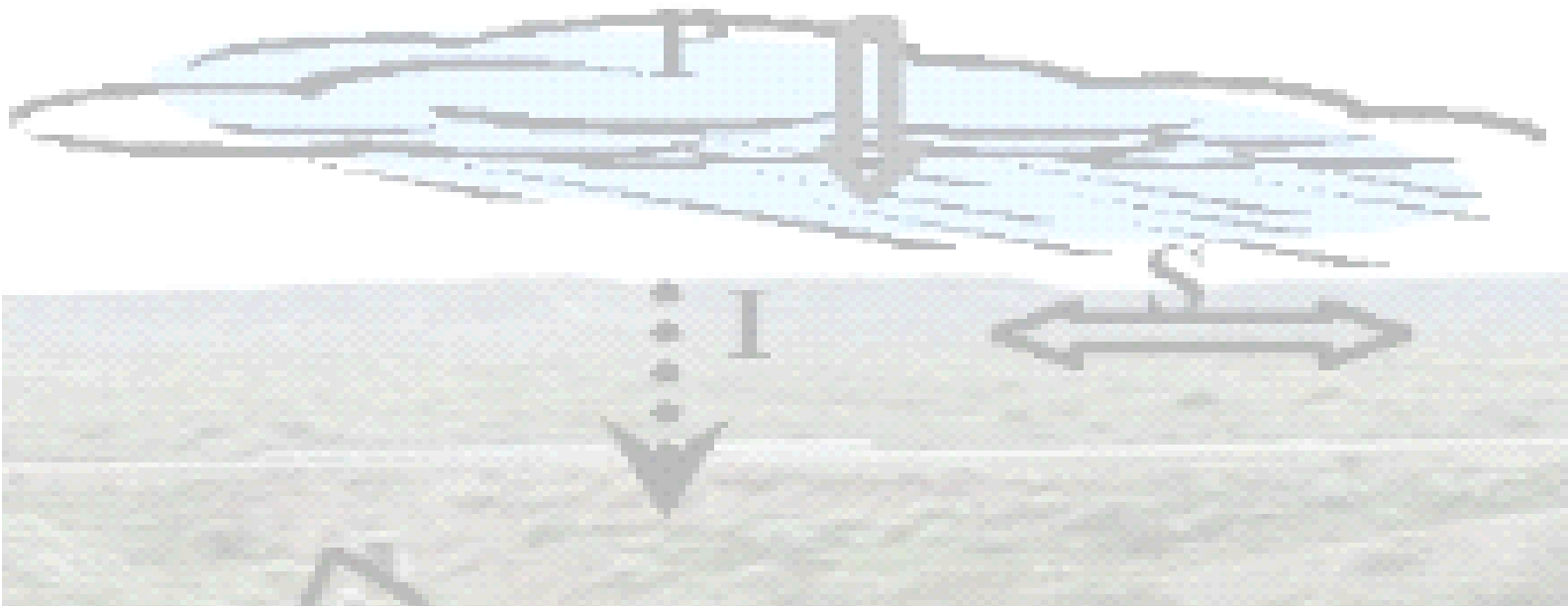




# MHIG, MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN

Simulación de crecidas en pequeños y medianos sistemas hidrológicos torrenciales, orientado al paisaje de meseta

## Guía de modelos y referencias técnicas



MHIG, MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN

# Guía de modelos y referencias técnicas

© Juan J. Serra  
Lezana 1575, PU, CP 9103 Rawson, Pcia. del Chubut, Rca. Argentina  
<http://www.mhig.com.ar> - [jserra@satlink.com](mailto:jserra@satlink.com)  
Teléfono (54) (0) 2965-496571

## Resumen

MHIG (Modelo Hidrológico Gaiman) es un modelo hidrológico de tipo determinístico-agregado y flujo no permanente para la simulación lluvia-caudal, orientado al cálculo de crecidas máximas en pequeños y medianos torrentes. Las experiencias se han dirigido a sistemas hidrológicos en paisaje de meseta (PM).

El simulador permite estimar crecidas máximas en múltiples secciones de control, para una tormenta o una selección de varias tormentas de diferente precipitación, duración y recurrencia conocidas (PDR). Como resultados, se obtienen los hidrogramas de la tormenta, y los parámetros de caudal máximo, escorrentía y coeficiente de escorrentía resumidos en tablas y ábacos para todas las tormentas simuladas.

MHIG 1.06 está desarrollado para su funcionamiento como aplicación bajo sistema operativo Windows de 32 bits, con un entorno de diseño que aprovecha la interfase gráfica del usuario.

En este manual, se presentan los modelos de los distintos procesos y subprocesos y referencias técnicas, así como verificaciones y pruebas simples de la aplicación, basado en la tesis de investigación “*Estimación de crecidas máximas en paisaje de meseta*” (Serra, 2006).

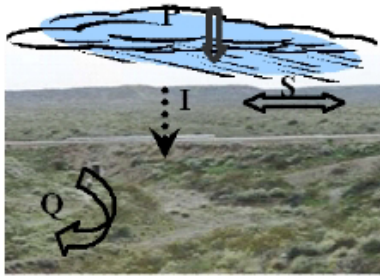
Palabras clave: simulación hidrológica, modelo hidrológico, hidrología, paisaje de meseta, torrentes, torrencial, crecidas.máximas

Juan Serra

<http://www.mhig.com.ar>

# Tabla de contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Presentación .....</b>	<b>2</b>
Reseña Histórica.....	4
Descripción general .....	6
<b>Capacidades de MHIG.....</b>	<b>9</b>
<b>Características físicas, climatológicas y funcionales de la simulación.....</b>	<b>11</b>
Modelos y algoritmos básicos en UEH.....	13
<b>Modelos de Procesos y Sub-Procesos .....</b>	<b>14</b>
Resumen de variables y parámetros utilizados en componentes UEHs, cauces, represas o lagos.....	15
Precipitaciones.....	15
Procesos y subprocesos en UEHs. Modelos .....	16
Cauces. Propagación en cauces .....	24
Represas y estructuras hidráulicas de evacuación .....	28
Componentes lagos / lagunas / mallines.....	33
<b>Calibración - Explotación.....</b>	<b>34</b>
<b>Prueba y Validación .....</b>	<b>36</b>
Prueba de casos simples .....	36
Prueba de un caso real: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. ....	39
Comparación de resultados con otros modelos.....	41

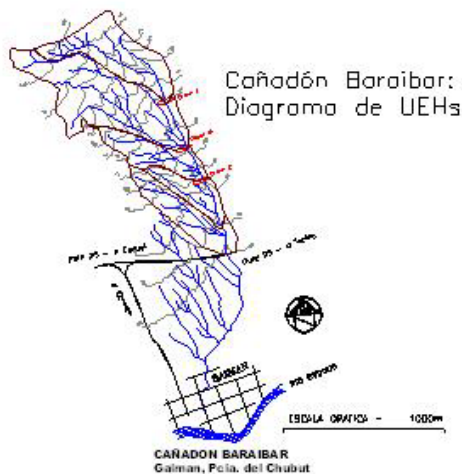


## Presentación

**M**HIG, está integrado por un conjunto de programas computacionales para la

modelación hidrológica lluvia-caudal, orientado al cálculo de crecidas máximas en pequeños y medianos sistemas hidrológicos, de escurrimiento temporario y en paisaje de meseta (PM). De acuerdo a la clasificación de modelos hidrológicos de Chow (1994, *op.cit.*), es un modelo de tipo *determinístico-agregado y flujo no permanente*.

Está conformado por una selección de modelos hidrológicos y métodos básicos conocidos. Estos modelos básicos son combinados con algoritmos y procedimientos computacionales modificados o desarrollados, y resultados experimentales producidos en más de dos décadas de trabajo en la estimación de crecidas máximas. Particularmente, las experiencias se han dirigido a sistemas hidrológicos en terrazas y en pequeñas y medianas cuencas torrenciales.



MHIG se ha desarrollado para su funcionamiento bajo sistema operativo Windows de 32 bits. Aprovecha la interfase gráfica de usuario (IGU) y la potencialidad de la programación orientada a objetos, logrando un "entorno más amigable" para el diseño, ingreso de datos y presentación de informes de una simulación hidrológica de crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales. Los resultados de simulación pueden ser fácilmente importados en formato texto por aplicaciones de uso común.

MHIG, tiene por precedente la aplicación "Gaiman" (Serra, 2003, *op.cit.*), tomando como base el estado de desarrollo alcanzado en la tesis "Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta, en la región semiárida patagónica (MIEC-PMP)". En esta nueva etapa y versión, el modelo ha sido reformulado por completo, introduciendo modificaciones computacionales sustanciales e incorporando nuevos modelos de procesos hidrológicos, para adaptarlo a las necesidades de este trabajo y su actualización como herramienta informática.

La estructura de simulación utiliza cuatro componentes (o elementos) hidrológicos: UEH, cauces, lagos y represas. Cada uno de estos componentes puede ser editado en un diagrama,

mediante un editor gráfico que permite las operaciones usuales de creación del componente, carga de parámetros, modificación y eliminación.

Las abstracciones son evaluadas a nivel de UEH, con parámetros para las *retenciones superficiales* por *almacenamiento e intercepción y pérdidas por infiltración*. Para las hipótesis señaladas no se requiere evaluar *evaporación o transpiración*.

La propagación de la onda de crecida se efectúa para cada componente; en el caso de UEH se traslada el hidrograma a “pie de ladera o subcuenca”.

Los tramos de “cauces” permiten simular la red de drenajes y diagramar el ruteo de las aguas superficiales, jerarquizando el orden de los mismos. La traslación del hidrograma se realiza por cada tramo, por dos métodos opcionales: *directo o de onda cinemática*.

### COMPONENTES HIDROLÓGICOS





	1) UEHs: Unidades de Estudio Hidrológico, en general, o Subcuencas en SHT en particular)
	2) Cauces y tramos de escurrimiento encausado, temporario o permanente
	3) Lagos, lagunas, mallines
	4) Presas, (con estructuras hidráulicas de evacuación)

Tabla 1

Pueden interponerse presas o lagos, con sus relaciones de altura de agua, almacenamiento, superficie de inundación y caudal erogado; pueden incluirse las funciones de descarga de las estructuras hidráulicas de evacuación.

La traslación del hidrograma en lagos o embalses puede efectuarse por distintos métodos conocidos, de onda cinemática, y resolución de ecuaciones diferenciales por diferencias finitas: *Piscina Nivelada, Muskingum, Runge Kutta* (Chow, 1994, *op.cit.*).

MHIG permite efectuar *corridas* para una tormenta, o para múltiples tormentas. La simulación de una tormenta genera como resultado el hidrograma, en formato gráfico y de tabla, pudiendo modificarse de forma directa las variables y ver sus efectos (hidrograma dinámico). En corridas simultáneas de tormentas múltiples se generan como resultados tablas y ábacos de *caudal máximo, escorrentía y coeficiente de escorrentía*, en función de la *duración y recurrencia* de la tormenta. Los resultados pueden ser exportados en formato texto para su utilización por otras aplicaciones.

Todos los resultados son informados para cada uno de los componentes (UEH, cauce, lago o represa), pudiendo ser requeridos diferentes períodos o *pasos* de cálculo y de salidas.

## Reseña Histórica

El modelo “Gaiman”, tuvo su origen en trabajos hidrológicos inéditos del autor, en documentos internos para la antigua Dirección General de Estudios y Proyectos del Ministerio de Economías Servicios y Obras Públicas de la Provincia del Chubut, producidos entre los años 1983 y 1985.

En su diseño inicial, respondió a un estudio realizado en 1983 para el control aluvional de la cuenca de un pequeño cañadón suburbano, el Cañadón Baraibar (Figura: 1); ubicado en zonas de bardas al norte de la ciudad de Gaiman -a unos 40km al Oeste de la ciudad capital Rawson- que desagua al Río Chubut a través de su casco urbano.

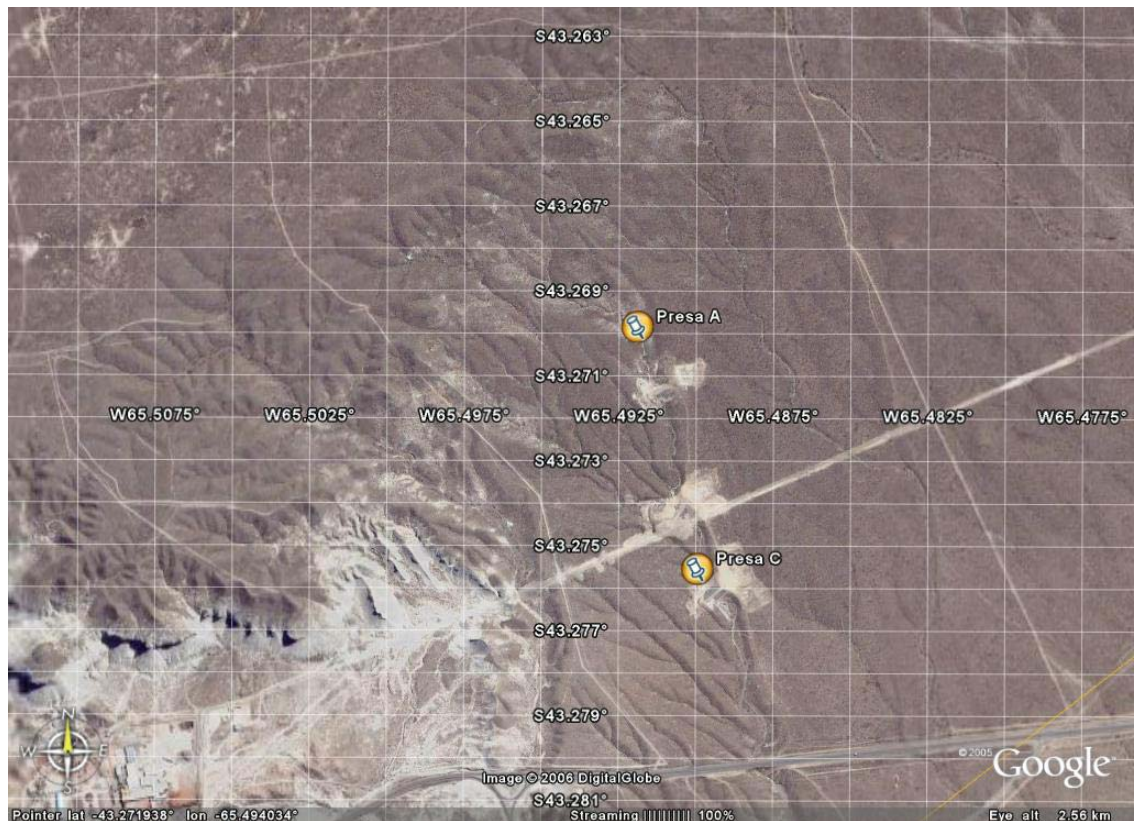


Figura: 1. Vista Google earth para Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut, Rca. Argentina

El cuenco del Cañadón Baraibar tiene una extensión de 170 Has. Por las características geomorfológicas, hidrológicas, su tamaño, y la información disponible, constituyó con el tiempo una cuenca experimental para la obtención de parámetros de calibración y mejora del modelo.

En su primer desarrollo, el modelo se programó en lenguaje Basic para una de las primeras computadoras tipo PC, de oficina, la antigua Olivetti P6060, con soporte en disco flexible de 8". Desde entonces, tuvo una actualización y mejora continua, y la suma de experiencias en campo y laboratorio y aplicación a casos de distintos parámetros de sub-modelos.

Hasta 1985 con esta versión del modelo se calcularon tormentas y caudales de diseño en esa cuenca y en otros sistemas hidrológicos de meseta como el “Cañadón de las Mil Ocho Viviendas” de la ciudad de Comodoro Rivadavia, los “Cuencos Aluvionales uno N° 1 a N° 5 de Puerto Madryn”, o del “Cañadón del Parque Industrial, (PII)” que drena sobre populosos barrios de la ciudad de Trelew.

Con la aparición en el mercado de la “PC-XI” y posteriormente “PC-AT”, el programa fue readaptado a esta nueva generación de ordenadores de oficina.

En 1989, el modelo se presenta por primera vez dentro de un proyecto de investigación de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, aplicado a técnica hídrica en el Valle Inferior del Río Chubut. Se lo adapta para generalizarlo al uso de cuencas torrenciales regionales, de mayor complejidad hidrológica, en lenguaje GWBasic de DOS para IMB-PC. (Serra y Clérico, 1989, inédito).

Posteriormente, es utilizado por distintos proyectos de la misma línea de investigación dirigidos por el autor. En orden sucesivo, los proyectos “PI Nro. 138, Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, “PI Nro. 194, Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique-Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut” y “PI Nro. 274: Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos”.

Con estos dos trabajos, el modelo es readaptado para su funcionamiento bajo control de sistema operativo Windows y programado en Visual Basic para Aplicaciones Excel (VBA). Las modificaciones introducidas permitieron su explotación para el cálculo de máximas crecidas simultáneas en 32 cuencos independientes e interrelacionados en un cuenco de orden mayor cercano a los 1000 km<sup>2</sup> y para más de 100 tormentas sintéticas seleccionadas,

Entre los años 1996 y 1997, el modelo GAIMAN ha sido utilizado por la institución universitaria citada en Convenio con la Corporación de Fomento del Chubut (CORFO), para el estudio y proyecto de “Obras Complementarias de Control de Crecidas en Cuencas Urbanas de Puerto Madryn, Dolavon -y Gaiman”. El informe final, incluyó los proyectos ejecutivos de la Presa de Laminación de Crecidas “Felipe” en el Cañadón Dolavon, de obras de sistematización de cauce y márgenes del tramo inferior de este cañadón y del Baraibar en Gaiman, y de las presas de laminación de crecidas en cuencos 3 y 4, la toma y su conducto entubado en el Parque Industrial Liviano de Puerto Madryn. Finalmente, se destaca la aplicación en un Convenio similar por el “Estudio y proyecto de refacciones y mejoras del sistema de presas del Cañadón del Parque Industrial de Trelew”.

Entre otras aplicaciones importantes se destacan las incluidas en el “Plan de Obras de Emergencia de Control de Crecidas Aluvionales”, Informe de Revisión, Volumen 1 a 8, producido por el Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas (MESOP) y del Instituto Provincial de la Vivienda y Desarrollo Urbano (IPVyDU) de la Provincia del Chubut, en el período Mayo a Octubre de 1992. Este plan, incluyó un conjunto de tres presas de laminación de crecidas en el Cañadón del Parque Industrial de Trelew, una presa en el Cierre “Gasoducto” del Cañadón Dolavon, una presa en el Cuenco Aluvional Nro. 2 de Puerto Madryn, tres presas en el Cañadón Baraibar de Gaiman, y también de canales de drenaje o colectores urbanos en Rawson (Barrio 490 Viviendas y El Sombrerito) y desagüe del Barrio Norte de la ciudad de Trelew. Todas las obras citadas están construidas y en servicio.

En el año 2000, el modelo GAIMAN tuvo su última actualización de versión, incorporando subrutinas y formatos especiales para la carga de variables y parámetros salida de resultados tabulados y en formato gráfico. El trabajo posee derechos de autor, inscripto en el Registro Nacional de Derechos de Autor, propiedad Intelectual como obra inédita de software (Serra, 2004a).

El desarrollo de MHIG comienza en el año 2004. Si bien guarda algunas formas del antiguo modelo “Gaiman” lleva un rediseño completo, con el agregado de nuevos modelos de

procesos, modificación de otros, y un desarrollo en 32 bits con aprovechamiento de la interfase grafica de usuario que mejora sustancialmente la forma de carga de datos. MHIG está inscripto con derecho de autor para obra de software inédita (Serra, 2004b).

### *Descripción general*

En general, se pretende resolver con simulación de MHIG problemas de análisis de crecidas máximas con escasez o ausencia de aforos y datos hidrométricos.

Los modelos de procesos y subprocesos hidrológicos se aplican discretos en tiempo y espacio. La unidad de superficie menor para el cálculo agregado es la *Unidad de Estudio Hidrológico* (UEH), denominada también *Unidad Elemental Hidrológica*. La UEH es la menor unidad de cálculo donde las magnitudes son promediadas en el espacio para cada período de tiempo; se resuelven aquí las abstracciones, balance de aguas, cálculo del hidrograma de escorrentía directa, y la propagación de la onda de crecida hasta el componente siguiente.



Figura: 2. Vista de la zona de estudios, en el Valle Inferior del Río Chubut (región ampliada),. A la izquierda el cuenco aluvional del área Dique Ameghino a Boca Toa (Imagen Google Earth)

La conformación de las múltiples UEHs permite también iterar el proceso de cálculo para un grupo de varias cuencas independientes que aportan hacia un cauce central, a una depresión endorreica, o el mar.



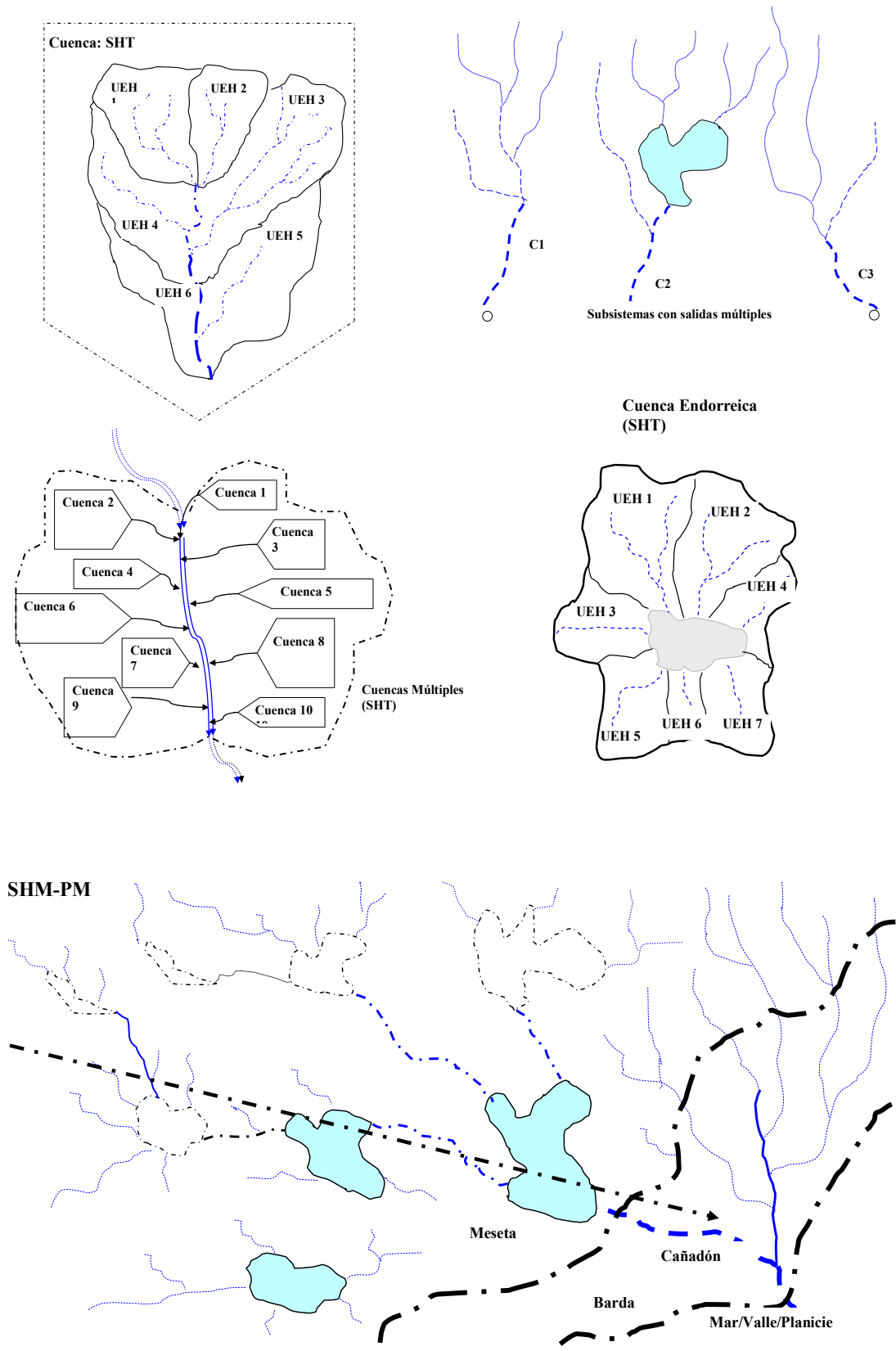


Figura: 3. Ejemplo de conformaciones de Cuencas y UEHs para sistemas hidrológicos típicos (SHT), y sistemas hidrológicos mixtos, tipo complejos, en mesetas (SHM-PM),

Un ejemplo de este esquema de agrupamiento es el Cuenco Aluvional del área comprendida entre el Dique Florentino Ameghino y “Boca Toma”, en el VIRCh, Chubut, (Figura: 2), donde se identifican 32 unidades hidrológicas en dos grupos de 16 para cada margen del Río, todas ellas con sus respectivas subcuencas.

Pueden también conformarse unidades abiertas con salidas múltiples (sistemas múltiples), características muy comunes en unidades hidrológicas de mesetas, y particularmente para tormentas donde no se logra el desarrollo completo de la crecida.

Las características morfo-hidrológicas descriptas para los PMP definen las condiciones de borde del modelo. Con algunas limitaciones, puede aplicarse a diversos casos de SHM y a SHT en general.

La Figura: 3 muestra distintas configuraciones posibles, como cuencas o sistemas hidrológicos típicos, abiertos o cerrados, y de sistemas hidrológicos mixtos de tipo complejo, en paisaje de terrazas y bardas, con salidas simples o múltiples.

## Capacidades de MHIG

- **Herramientas de Diseño:**
  - Diseño modular de sistemas hidrológicos simples y complejos (sistemas independientes múltiples)
  - Diseño gráfico (Figura: 4) del sistema hidrológico y de sus componentes (diagrama y jerarquización):
    - Subcuencas o Unidades de Estudio Hidrológico(UHE);
    - Cauces;
    - Represas;
    - Lagos/Lagunas;
  - Imagen de fondo (opcional) para apoyar el diagrama;
  - Escala de dibujo (opcional), estimador de superficies y longitudes.
- **Carga de parámetros y variables:**
  - Formularios para la carga de parámetros por cada componente (UHE, cauce, represa, lago/laguna);
  - Tablas de visualización y de edición para acceso directo a datos;
  - Edición avanzada (acceso directo a archivos de texto);
  - Formularios de opciones de carga de datos de precipitación:
    - Lluvia hipotética, distribución espacial y temporal;
    - Lluvia real;
    - Serie de tormentas PDR: Precipitación-Duración-Recurrencia); distribución temporal.
- **Opciones de Explotación o Proceso**
  - Corrida, para una tormenta;
  - Corrida, para una serie o conjunto de tormentas PDR (corridas anidadas);
- **Salidas**
  - Hidrograma, por componente, (para una tormenta);
  - Tabla resumen, por componente, (para una tormenta);
  - Tabla detallada de proceso de cálculo, por componente, (para una tormenta);
  - Ábaco y Tabla resumen, por componente, (para una serie o conjunto de tormentas PDR):
    - Caudales máximos, duración, recurrencia (QpDR);
    - Escorrentía, duración, recurrencia, (EDR);
    - Coeficientes de Escorrentía, duración, recurrencia (CDR);
- **Misceláneas**
  - Cálculo rápido de tiempo de concentración y caudal máximo por fórmulas empíricas;
  - Pantalla de Opciones de Configuración de proyecto;

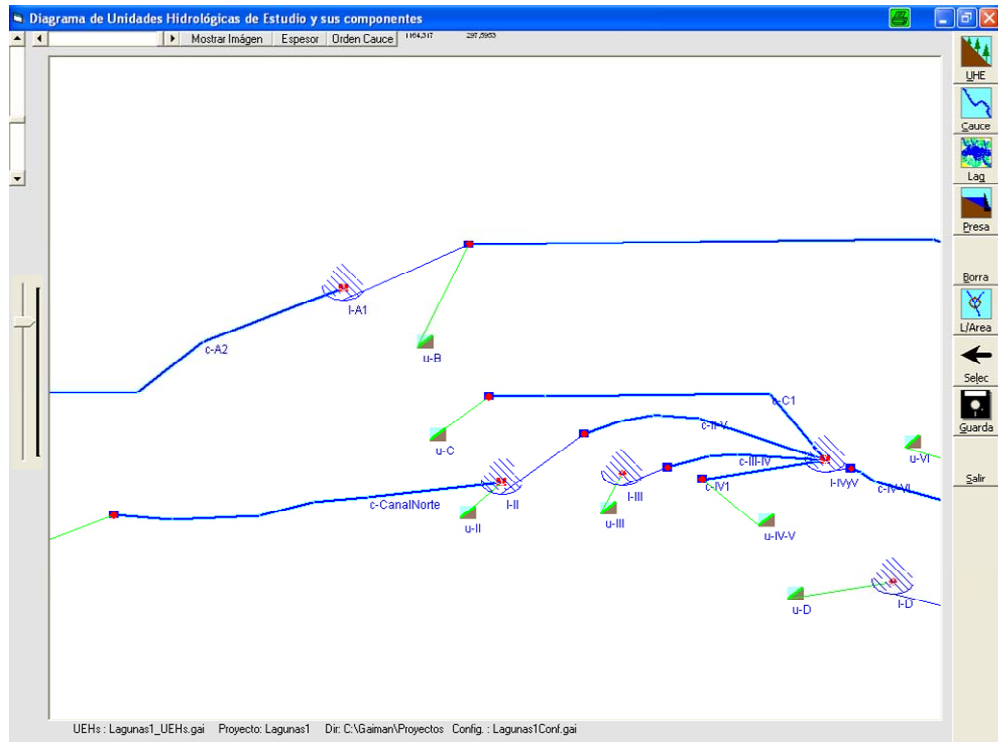
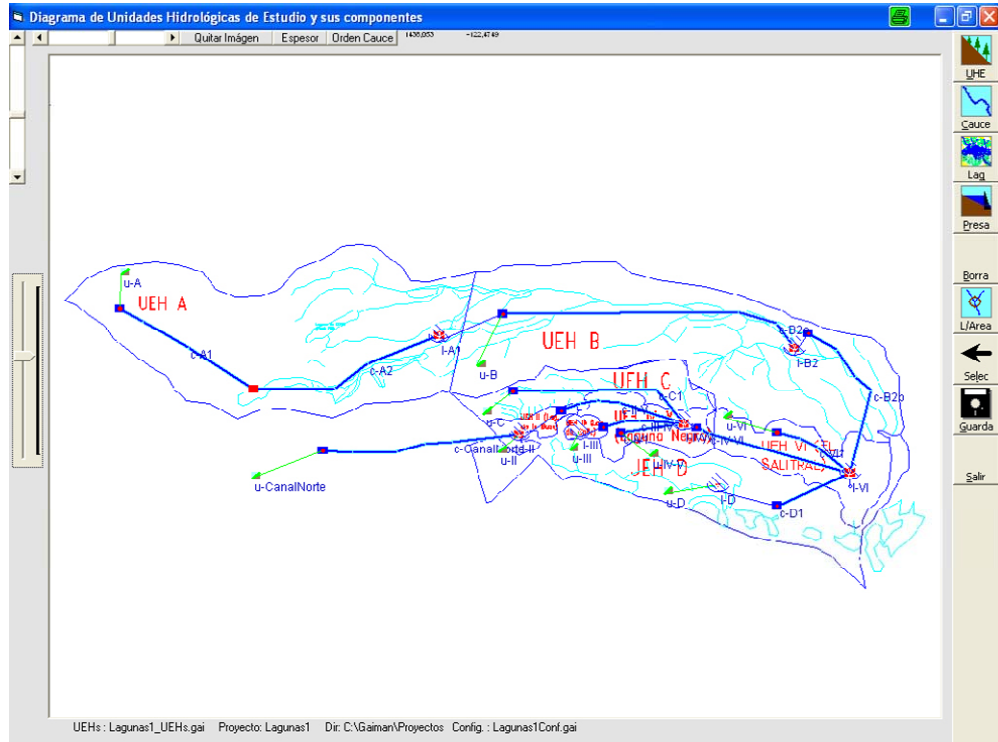


Figura: 4. MHIG: Diagrama en el Editor Gráfico de Componentes: UEHs, Cauces, Lagos o Represas. El editor admite una imagen auxiliar de fondo (satelital, foto aérea, diagrama o plano). Ejemplo para caso de "Laguna Negra", Trelew, Pcia. del Chubut

## **Características físicas, climatológicas y funcionales de la simulación**

Los modelos de procesos y subprocesos hidrológicos han sido seleccionados de métodos y procedimientos conocidos, introduciendo modificaciones para adaptarlo a la discretización areal y temporal, y para interrelacionar con los algoritmos y procedimientos computacionales específicamente desarrollados.

La simulación privilegia procesos y subprocesos para la modelación hidrológica de sistemas torrenciales en las condiciones que se resumen para sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de meseta. En general, la incorporación de nuevas funciones o mejoras en los distintos procesos han respetado la evolución en la disponibilidad de datos de campo para la resolución del problema, o particularidades de nuevos cuencos sometidos a estudio que son agregadas como opciones en los mismos.

Aspectos físicos de UEHs
UEH pequeñas a medianas. Escaso desarrollo del cauce principal, tiempos de concentración reducidos.
Vegetación de tipo esteparia o arbustiva, a suelos desnudos. Intercepción reducida.
Faldeos o laderas de taludes bien conformados, con escasas depresiones. Retención superficial reducida a moderada.
Suelos superficiales variados, aunque predominan los suelos de matriz arcillosa, de reducida infiltración.
El flujo subterráneo inicial es reducido, sin desarrollo durante la crecida con impacto relevante en la conformación del hidrograma de crecida superficial (flujo de base nulo o reducido).
Red de drenaje bien conformada, generalmente activa solo durante crecidas por lluvias.

Aspectos climáticos
Clima árido a semiárido. Precipitación anual y media mensual reducida, con chubascos y eventos meteorológicos torrenciales extremos.
Pocas tormentas de importancia durante el año hidrológico, dispersas espacialmente, y temporalmente concentradas. Presencia de tormentas extraordinarias y excepcionales producidas generalmente por centros estacionarios de baja presión en la zona costera del Océano Atlántico Sur, de escasa frecuencia de ocurrencia.
Nieve: Escaso a nulo impacto en la determinación del hidrograma de crecidas máximas (Las crecidas máximas quedan determinadas solo por lluvias).
Hipótesis de lluvias agregadas (supuesta uniforme en toda la UEH).
Disponibilidad de las ecuaciones de precipitación/intensidad, duración y recurrencia de tormenta que caracterizan el área de estudio (PDR / IDR).

Depresiones y cuerpos de aguas
Lagos, lagunas, humedales, embalses artificiales, con o sin estructuras de regulación, abiertas, endorreicas o cuasi-endorreicas.

Aspectos funcionales
Integración (anidamiento) de UEHs y sus componentes, jerárquicas y ordenadas o bien independientes con descarga a un curso central.
Lluvia pseudo-distribuida por discretización areal y temporal.
Distribución areal de parámetros físicos en Cuenca principal (a un punto de síntesis único), Cuencas independientes y Subcuencas o Unidades de Estudio Hidrológico (UEHs).
Propagación cinemática de onda de crecida en cauce principal por cuenca y en cauce central.
Anidamiento de tormentas (matriz PDR / IDR) para la obtención de QpDR / EDR / CDR (matrices de Caudales pico, escorrentías, coeficientes de escorrentía simulados).
Entorno de soporte de la aplicación de simple importación y exportación de datos

Tabla 2 Características principales del simulador MHIG

## Modelos y algoritmos básicos en UEH

Los modelos de procesos y subprocesos interactúan entre las entradas y salidas conforme el diagrama de bloques que se muestra en la Figura: 5.

Seguidamente, se desarrollan los modelos y algoritmos de los principales modelos de procesos y subprocesos..

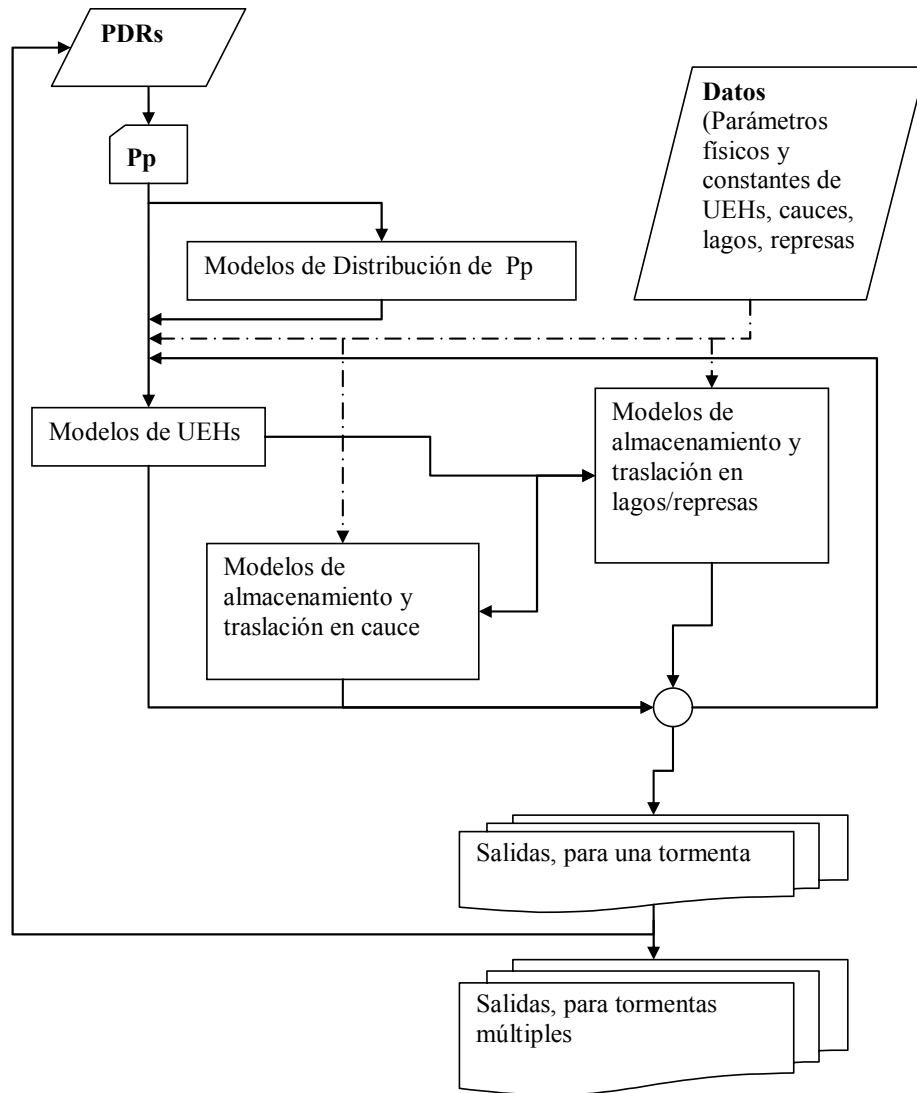


Figura: 5. Diagrama de bloques de interacción entre los macroprocesos de modelos para UEHs, traslación en cauces y represas

## Modelos de Procesos y Sub-Procesos

**S**e resumen a continuación, a modo de listado jerárquico, los modelos de de procesos y sub-procesos hidrológicos de MHIG para la simulación hidrológica de crecidas máximas:

- **Modelo de Retención Superficial (intercepción y almacenamiento superficial)**
  - Método Directo o de tasa de retención superficial (Boldakov);
- **Modelo de infiltración (If)**
  - Modelo de Kostiakov;
- **Modelo de Escorrentía Directa**
  - Balance de aguas superficiales en UHE;
  - Propagación directa o método de los paralelogramos de escorrentía;
- **Modelo de Escurrimiento Subterráneo (abatimiento o recesión)**
  - Modelo de Singh y Stall;
- **Modelos de Propagación en cauce**
  - Método de los paralelogramos de escorrentía o directo
  - Método de Muskingum;
- **Modelos de propagación en embalses, lagos y lagunas**
  - Método de Piscina Nivelada;
  - Método de Muskingum;
  - Runge Kutta;
- **Modelos de Precipitación**
  - Lluvia sintética o hipotética (Precipitación, Duración y Recurrencia, PDR)
  - Modelos teóricos de distribución temporal de tormenta;
  - Modelos experimentales regionales de distribución temporal de tormenta en Meseta Patagónica (Zona del Valle Inferior del Río Chubut ;
  - Lluvias reales;
  - Series hipotéticas de tormentas (Tablas PDR)
- **Otros Modelos y funciones**
  - Ruteo y jerarquización de componentes (gráfico analítico);
  - Funciones teóricas de descarga de vertederos. Tablas de relaciones altura-caudal (vertederos) y altura, superficie, volumen almacenamiento (embalses, lagos y lagunas).



## Resumen de variables y parámetros utilizados en componentes UEHs, cauces, represas o lagos

Las variables y parámetros adicionales a las ya expuestas para UEHs, con las unidades utilizadas en los distintos métodos de propagación en cauce o en embalses se muestran en la Tabla 4.

### *Precipitaciones*

$P_p$  es la parte de la lluvia o precipitación equivalente producida durante el intervalo de tiempo de cálculo definido por el *paso* del modelo.

La precipitación total “P” caída durante la tormenta admite la subdivisión en intervalos iguales e independientes del paso de cálculo del modelo, que representan la distribución temporal de la tormenta.

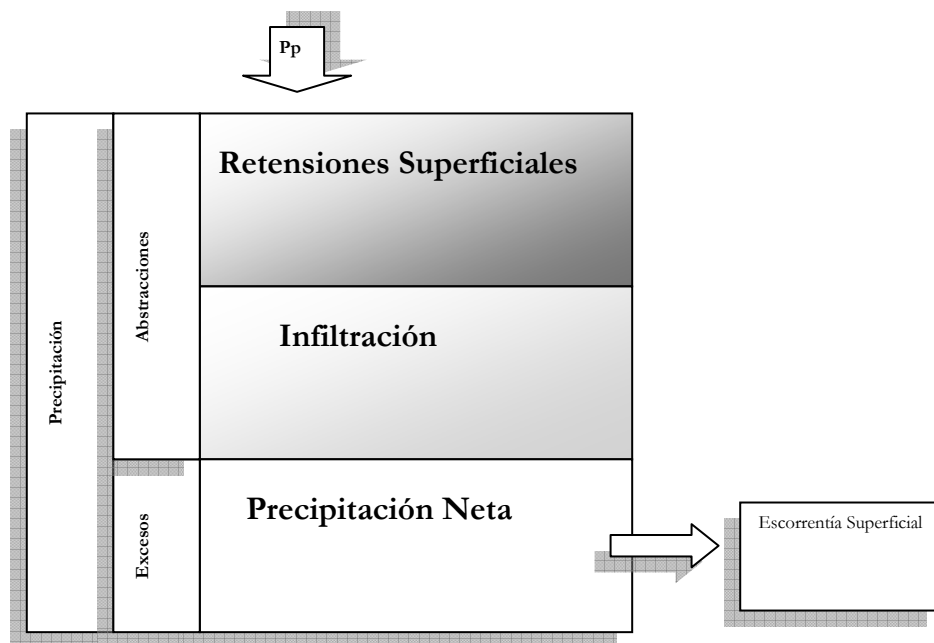


Figura: 6. Diagrama de lluvia, abstracciones y excesos en UEH

En la búsqueda de caudales máximos, esta distribución puede asumir valores teóricos propuestos por distintos autores o bien medidos en tormentas extremas en el PMP.

Una distribución de lluvias con intensidades menores al principio y mayores al final genera como respuesta un mayor caudal pico y escorrentía que su inversa.

El modelo dispone para su opción de distintas distribuciones y tormentas tipo (Tabla 3).

**DISTRIBUCION TEMPORAL DE LA LLUVIA**

---

Distribución lineal o uniforme

---

Distribución de López Cádenas (López Cádenas, 1982, *op.cit.*)

---

Distribuciones de tormentas extraordinarias en el VIRCh (tormenta de Mayo de 1992, tormenta de Abril de 1998).  
(Figura: 7)

---

Distribuciones Personalizadas

---

Tormentas Reales

---

Tabla 3

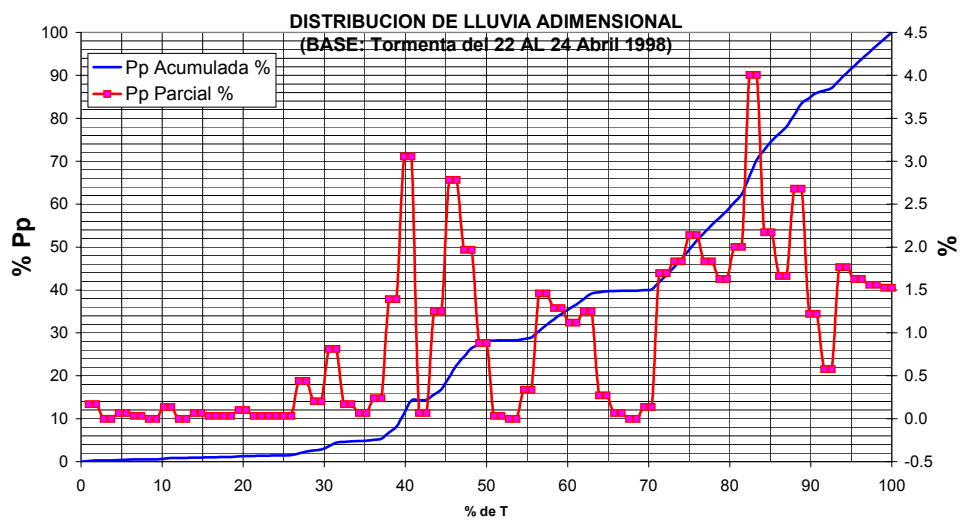


Figura: 7. Ejemplo de distribución de Tormenta en el Valle Inferior del Río Chubut, (Mayo 1998, adimensional)

La tormenta extraordinaria de Abril de 1998, se concentró en la región costera, constituyendo la máxima tormenta histórica registrada. Totalizó un registro en la ciudad de Trelew de 230,1mm en 63 horas de lluvia, superando en más del doble a la máxima tormenta diaria registrada hasta la fecha.

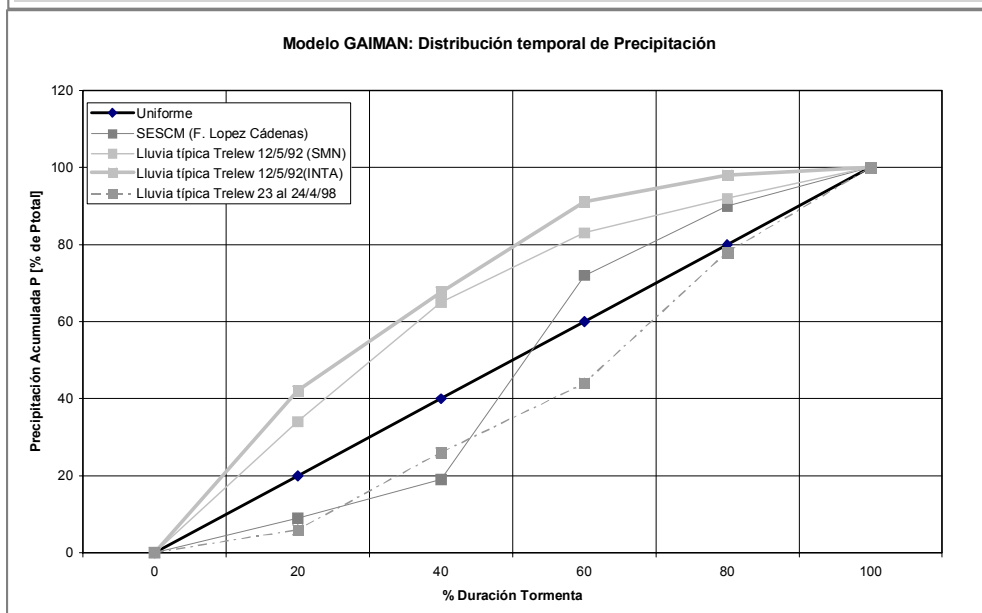
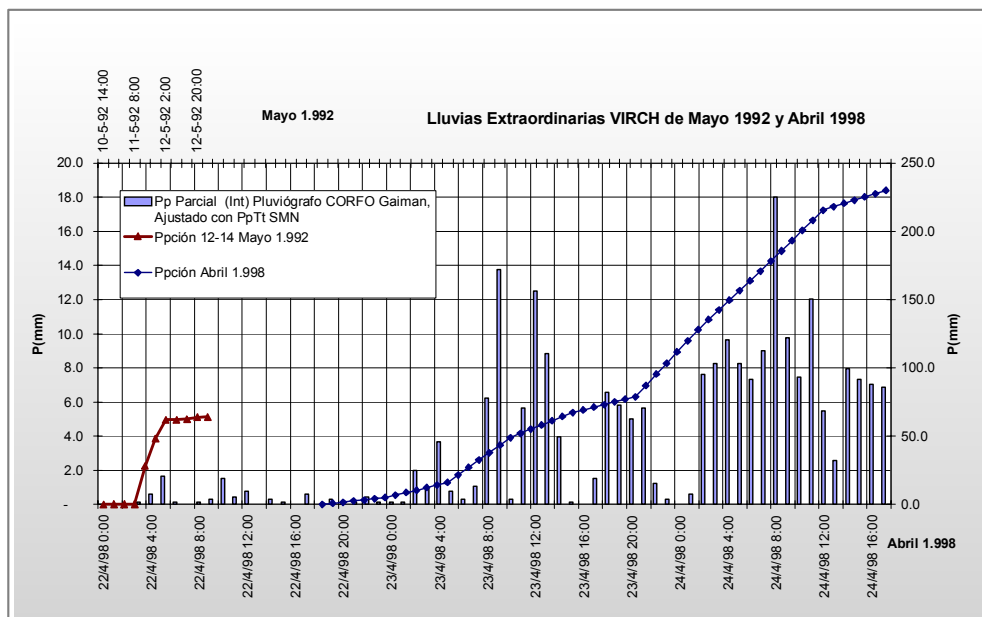
*Procesos y subprocesos en UEHs. Modelos*

Se considera Unidad de Estudio Hidrológico, o Unidad Elemental Hidrológica, (UEH), la unidad elemental de proceso donde todos los fenómenos hidrológicos que se miden y procesan son ponderados en su espacio y para el período de tiempo de cálculo. En SHT las UEHs se tratan como Subcuencas. Es decir, para una UEH, todas las variables y parámetros son constantes a lo largo de un período de cálculo.

La Tabla 4 muestra un detalle de las variables y parámetros que intervienen en los procesos y subprocesos de cálculo de componentes hidrológicos.

Variable/ Parámetro	Denominación	Unidad	Notas
<b>En Componentes UEHs, o en general</b>			
P, Pp	Precipitación total	mm	Variable. Total para la tormenta
P <sub>k</sub>	Precipitación en el período	mm/período	Medida en el período k
P <sub>kt</sub>	Precipitación acumulada	mm	Precipitación acumulada al final del período de cálculo k
D	Duración de la tormenta	minutos	Variable. Total para la tormenta.
R	Retorno	años	Recurrencia o período de retorno asociado para la tormenta
I <sub>p</sub>	Intensidad de Precipitación	mm/minutos	
A	Area	Has	Area tributaria (superficial)
Lc	Longitud máxima de escorrentía superficial	m	Parámetro de drenaje. Longitud máxima de escorrentía en ladera y/o cauce primario al pie de la UEH
Vm	Velocidad media de la "gota de agua"	m/s	Parámetro de ajuste, estimado en base a la velocidad media de escurrimiento en la UEH.
Z	Retenciones Superficiales	mm	Almacenamiento e Intercepción (total). Parámetro de estimación y ajuste.
z <sub>k</sub>	Retención superficial en el período k		
a b	Parámetros de Infiltración de Kostiakov	mm/min Adim., para 't' en minutos	Parámetros de estimación y ajuste
t <sub>inicial</sub>	Parámetro de humedad inicial	minutos	Equivalente al tiempo en minutos necesario para humectar la UEH, a carga constante y suficiente. Parámetro de estimación y ajuste.
Q <sub>inicial</sub> K <sub>inicial</sub>			Condiciones iniciales del flujo al pie de UEH. Parámetros de Singh y Stall (estimación y ajuste)
Drena a	Selector indicador		Indicador de componente hidrológico receptor
T	Período o paso de cálculo	minutos	Paso del modelo
Ts	Paso de salidas	minutos	Se utiliza en el formato de salidas de los hidrogramas
k	Contador de períodos		
t <sub>i</sub> , t <sub>f</sub>	Tiempo inicial y final	minutos	Referido al período de cálculo
I <sub>f</sub>	Tasa de Infiltración	mm/min	
F <sub>k</sub>	Lámina infiltrada en el período k		
<b>En componentes con embalses:</b>			
A	Area	Has	Referida a la superficie de agua en el embalse a la altura 'h'
h	Altura de agua en el embalse	m	
S	Almacenamiento	m <sup>3</sup>	Almacenamiento de agua en el embalse, a la altura 'h'
Q <sub>e</sub>	Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /s	Referido al embalse
Q <sub>s</sub>	Caudal de salida	m <sup>3</sup> /s	Referido al embalse
T, Δt	Período de tiempo o paso de cálculo	minutos	
k	Contador de pasos de cálculo		
C1, C2, C3	Coefficientes		Coefficientes de Muskingum
K		Minutos	Parámetro de Muskingum, (proporcionalidad)
Lc	Longitud del tramo de cauce	M	Parámetro de drenaje. Longitud máxima de escorrentía en ladera y/o cauce primario al pie de la UEH

Tabla 4 Detalle de las variables y parámetros que intervienen en los procesos y subprocesos de cálculo de componentes hidrológicos



Modelo GAIMAN: Distribución de temporal de lluvia [%]							
Tipo de Distribución	Período	Intervalo de lluvia					
		1	2	3	4	5	6
Uniforme	Parcial	20	20	20	20	20	0
	Acumulada	0	20	40	60	80	100
SESCM (F. Lopez Cadenas)	Parcial	9	10	53	18	10	0
	Acumulada	0	9	19	72	90	100
Lluvia típica Trelew 12/5/92 (SMN)	Parcial	34	31	18	9	8	0
	Acumulada	0	34	65	83	92	100
Lluvia típica Trelew 12/5/92 (INTA)	Parcial	42	26	23	7	2	0
	Acumulada	0	42	68	91	98	100
Lluvia típica Trelew 23 al 24/4/98	Parcial	6	20	18	34	22	0
	Acumulada	0	6	26	44	78	100

Figura 8. MHIG: Distribución temporal de precipitaciones

*Abstracciones y balance de agua superficial, en el período*

La Figura: 6 muestra un esquema para la determinación de la Precipitación Neta de una tormenta a partir de las abstracciones, y la escorrentía producida. En un período de cálculo, el esquema se reduce a analizar retenciones producidas por intercepción, almacenamiento superficial (retenciones superficiales) y la infiltración.

Para un período de cálculo dado, "T", en el período 'k', será:

$$(I) \quad t_f = kT \quad ; \quad t_i = t_f - T$$

$$(II) \quad P_{kt} = \sum_{k=1}^k p_k \quad P = \sum_{k=1}^{k=n} p_k \quad ; \text{ n nro. de períodos de lluvia}$$

P y D, en el período T, es determinada según el formato de entrada de datos de la tormenta. Si la tormenta es 'real', el dato es directo, si es una lluvia sintética, se aplica una de las funciones de distribución detalladas.

Las retenciones superficiales (Tabla 5) en el período son evaluadas por el método directo o de tasa (Boldakov, citado por Heras y Soba Baro

$$(III) \quad \begin{aligned} & \text{Si } P_{kt} \geq Z \rightarrow z_k = 0 \\ & \text{Si } P_{kt} < Z \wedge p_k < Z - P_{kt} \rightarrow z_k = p_k \\ & \text{Si } P_{kt} < Z \wedge p_k \geq Z - P_{kt} \rightarrow z_k = Z - P_{kt} \end{aligned}$$

Para evaluar las retenciones por infiltración, que no aportan al flujo superficial, se aplica el modelo de Kostiakov para la capacidad de infiltración, con parámetros medios en la UEH, según la expresión:

$$(IV) \quad I_f = a t^b \quad ; \text{ Ecuación de Kostiakov}$$

Se evalúa la tasa al inicio y al final del período de cálculo,

$$(V) \quad F_k = a \left[ (k_f T + K_{inicial})^b - (k_f T + K_{inicial} - T)^b \right] \quad ; \text{ donde } k_f \text{ es un}$$

contador de períodos en que la infiltración no es nula.

Análogamente a la expresión de Retención Superficial (III) , se evalúa la disponibilidad de agua superficial para la infiltración, según la intensidad de la lluvia. Si la intensidad de precipitación satisface la capacidad de infiltración, la lámina infiltrada se evalúa con la expresión anterior. Si la lluvia es nula o la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración, la lámina de infiltración en el período se asigna nula, o a lo sumo igual al agua disponible, respectivamente.

*Precipitación Neta, en el período*

La Precipitación Neta (pN) que genera escorrentía superficial en el período se evalúa como:

$$(VI) \quad p_N = p_k - z_k - F_k \quad ;$$

$$(VII) \quad I_p = p_N / T \quad ; \text{ intensidad media de la lluvia neta, en el período } k$$

*Escorrentía superficial, en el período*

$$(VIII) \quad q_k = 0,166667 I_p A \quad ; \text{ donde } 0,16667 \text{ es un factor de conversión de unidades para expresar } q_k \text{ en } m^3/s$$

*Propagación, a "pie de UEH"*

La propagación, o traslación del hidrograma unitario obtenido para la UEH y el período de cálculo  $k$  considerados, al "pie de la UEH", se efectúa por el método directo (traslación temporal sin deformación de la onda), mediante los parámetros estimador de la velocidad media del agua en laderas y la longitud máxima al pie de UEH. El tiempo de retardo ( $T_r$ ) para la traslación al pie de UEH queda determinado por la expresión:

$$(IX) \quad T_r = V_m / L_c \quad ;$$

*Escorrentía superficial de la tormenta*

La escorrentía superficial total de la tormenta para la UEH, queda determinada por la suma de escorrentías de cada período:

$$(X) \quad E_{UEH} = NT \sum_{k=1}^{k=N} q_k \quad ; \text{ donde } N \gg n,$$

La escorrentía total para todos los componentes UEH que definen entradas por lluvias, queda determinada por la expresión:

$$(XI) \quad E = \sum_{UEH=1}^{nUEHs} \left[ NT \sum_{k=1}^{k=N} q_k^{UEH} \right] \quad ; \text{ donde } nUEHs \text{ es el número total de UEHs de}$$

la simulación hidrológica.

Los parámetros de *retención superficial*, *infiltración*, y *velocidad media* se estiman en base a determinaciones de campo, ajustadas por medio de tablas experimentales conforme se ha visto detalladamente en la tesis MIEC-PMP.

Descripción		Boldakov	
Terreno liso, sin vegetación; roca		1	
Terreno liso, débilmente enyerbado		2	
Terreno con microdepressiones en Superficie; terreno débilmente enyerbado, con escasos matorrales		3-5	
Terreno bien enyerbado; terreno con matorrales; bosque poco denso		6-10	
Bosque medianamente espeso, pastizales en muy buen estado		10-15	
Bosque adulto y espeso, con sotobosque y horizonte A desarrollado		10-15	
<b>PMP: valores de Z experimentados en cuencas del VIRCh y Puerto Madryn</b>			
Cobertura vegetal/Superficial		Morfología	
		Pendientes débiles Microdepressiones	Pendientes moderadas a fuertes
Tipo	Densidad	Z[mm]	Z[mm]
Suelos desnudos		1-6	1-2
Estepa	Pobre	2-8	2-3
	Alta	4-10	3-5
Monte bajo, matorrales altos	Pobre	4-8	3-6
	Alta	5-10	4-8
Pasturas naturales	Alta	>12	7-12

Tabla 5 Parámetro Z – Intercepción y Retención Superficial. Tabla de valores recomendados por Boldakov, y experiencias en modelación de pequeñas cuencas en PHMP

El parámetro Z evalúa las retenciones superficiales y la intercepción. En cuencas de topografía bien conformada, con taludes moderados a fuertes y escasas depresiones el valor del parámetro Z es prácticamente la intercepción. En caso de UEH con depresiones suaves y homogéneas puede utilizarse Z como de evaluación conjunta de la intercepción y el almacenamiento superficial.

Este parámetro interviene en la calibración del modelo, particularmente de la curva de subida del hidrograma y se estima en base a coeficientes propuestos por distintos investigadores o bien adoptando las experiencias en PMP estimadas a partir de calibraciones de tormentas medidas.

Para la estimación y ajuste de los parámetros 'c' y 'b' de Kostiakov, se recurre a determinaciones y ensayos de campo, con una red de infiltrómetros que miden este proceso en distintos suelos representativos de la UEH. Para estimaciones de menor precisión, puede recurrirse a curvas características de suelos recomendados por distintos autores, o de funciones teóricas para suelos característicos experimentados en PMP.

En la Figura: 9 se muestra un Ensayo de Infiltración de larga duración, para suelos de la terraza alta (Cota 130m), al NO de la ciudad de Puerto Madryn, realizados con motivos de estudios de lagunas de estabilización de efluentes urbanos (Stampone et al, 1998) La función de ajuste de Kostiakov resulta:

$$(XII) \quad I[mm] = 2,3t[\text{min}]^{0,8}$$

Donde I es la lámina infiltrada y t el tiempo desde el inicio del ensayo. El Ensayo, verifica con una Infiltración Básica Ib cercana a 1mm/día.

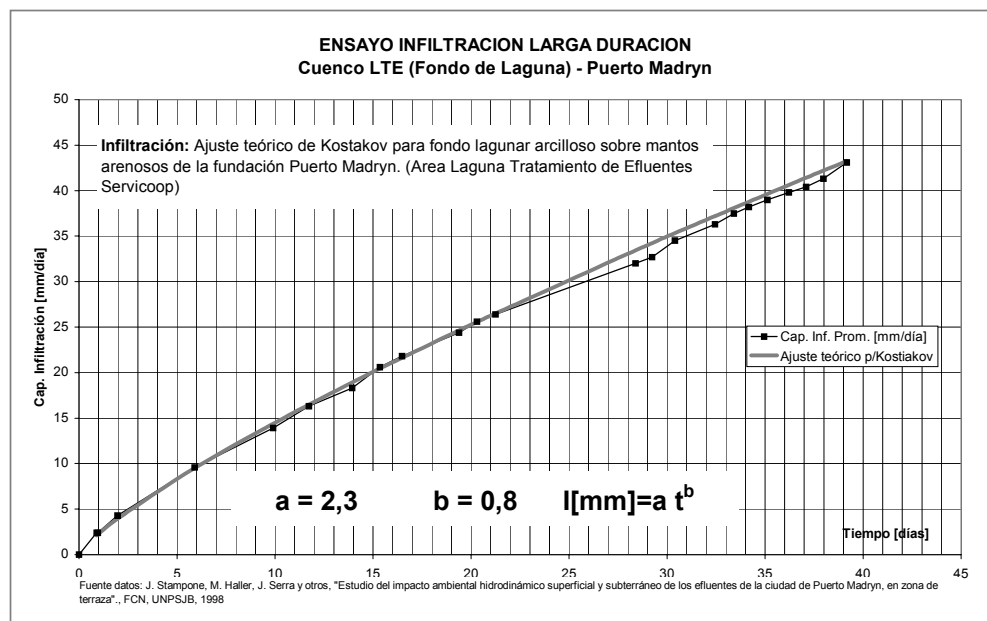


Figura: 9. Ensayo de larga duración. Fondo de laguna, área de Meseta, Zona de Puerto Madryn

El modelo dispone de información recopilada y seleccionada para la conformación de curvas tipo de suelo, basadas en ensayos de infiltración efectuados por la Dirección General de Estudios y Proyectos de la Provincia (MESOP, 1982/89) en Cañadón Baraibar de Gaiman, cañadón Dolavon, Cañadones 1 a 5 del cuenco Aluvional de Puerto Madryn, ensayos realizados por la Facultad de Ciencias Naturales de la UNPSJB para zona de terraza en Puerto Madryn y otros ensayos, algunos de los cuales se presentan en la Figura: 10.

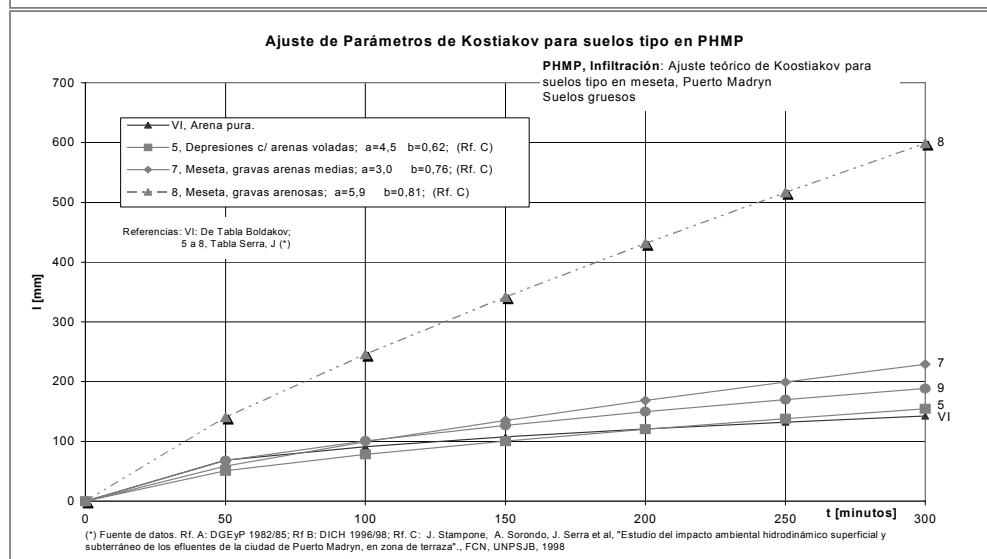
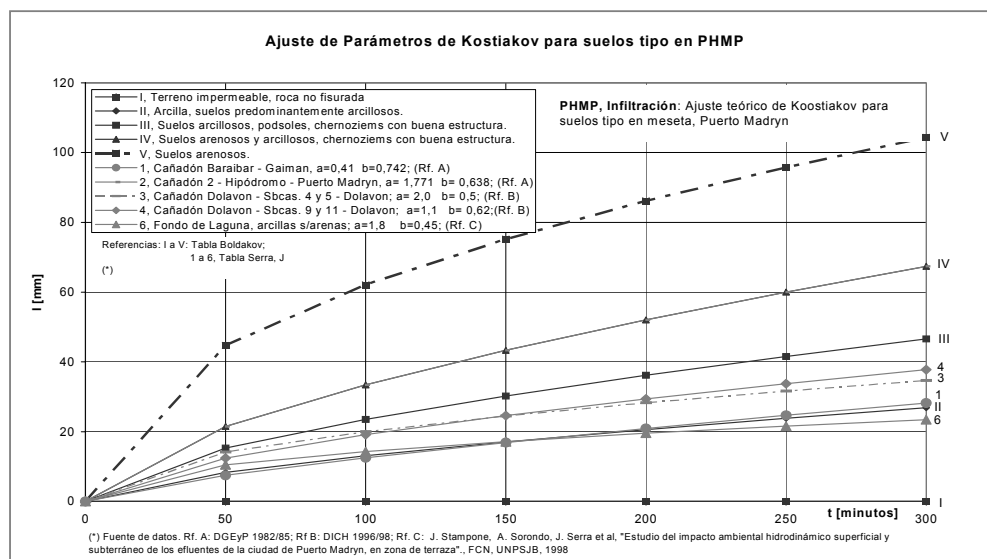
A estos datos, se agregan nuevas experiencias desarrolladas para el área de mesetas y lagunas en la planicie aluvial del Río Chubut, en la parte final del Valle Inferior del Río Chubut.

El método de propagación adoptado para el hidrograma elemental, desde el pie de la UEH hasta la salida de la cuenca es un método directo derivado del método conocido de los lineal de los paralelogramos de escorrentía, con parámetros adaptados para el caso.

*Método de propagación por paralelogramos de escorrentía*

Siguiendo la teoría del hidrograma unitario (HU), propuesto inicialmente por Sherman en 1932, se tiene una función tiempo-respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal, donde se cumple el principio de superposición y proporcionalidad entre los excesos y la escorrentía directa. Aunque se ha visto en la revisión que queda demostrado que el flujo superficial no es una función lineal, Heerdegen (1974) citado por Chow (1994, *op.cit.*), "...cuando la información hidrológica que va a utilizarse se selecciona cuidadosamente... los resultados obtenidos por el modelo de hidrograma unitario generalmente son aceptables para propósitos prácticos".





**Modelo GAIMAN: Parámetros de Infiltración (Kostiakov), Tabla de Boldakov y experiencias en PHMP**

t[min]	I	II	III	IV	V	VI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	8.3	15.3	21.5	44.7	68.6	7.5	21.5	14.1	12.4	50.9	10.5	58.7	140.3	67.9
100	0.0	13.1	23.5	33.4	62.1	91.1	12.5	33.4	20.0	19.1	78.2	14.3	99.3	246.0	100.8
150	0.0	17.1	30.2	43.3	75.2	107.4	16.9	43.3	24.5	24.6	100.6	17.2	135.2	341.6	127.0
200	0.0	20.6	36.2	52.0	86.2	120.8	20.9	52.0	28.3	29.4	120.2	19.5	168.2	431.2	149.6
250	0.0	23.9	41.6	60.0	95.8	132.3	24.7	60.0	31.6	33.7	138.0	21.6	199.3	516.6	169.9
300	0.0	26.9	46.5	67.4	104.4	142.6	28.2	67.4	34.6	37.8	154.5	23.4	228.9	598.9	188.5

**Referencias**

I, Terreno impermeable, roca no fisurada  
 II, Arcilla, suelos predominantemente arcillosos.  
 III, Suelos arcillosos, podsoles, chernozems con buena estructura.  
 IV, Suelos arenosos y arcillosos, chernozems con buena estructura.  
 V, Suelos arenosos.  
 VI, Arena pura.

Referencias: I a VI, Tabla de Boldakov  
 1 a 9, Serra J. (\*)

(\*) Fuente de datos: Rf. A: DGEyP 1982/85; Rf. B: DICH 1996/98; Rf. C: J. Stampone, A. Sorondo, J. Serra et al. "Estudio del impacto ambiental hidrodinámico superficial y subterráneo de los efluentes de la ciudad de Puerto Madryn, en zona de terraza", FCN, UNPSJB, 1998

Figura: 10. Infiltración y Suelos Tipo: Valores teóricos de la expresión de Kostiakov para una selección de suelos s/ a) Boldakov y b) Parámetros obtenidos en base a Ensayos de Infiltración medidos en PHMP de la región del VIRCH

Se puede asumir que se cumple pues la función respuesta de pulso discreto de Chow, donde:

$$(XIII) \quad Q_n = \sum_{M=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1}$$

En la que 'U' es la función respuesta de pulso discreto, con dimensiones de L<sup>2</sup>/T y P es la Precipitación en unidades de lámina; 'M' es la cantidad de pulsos de entrada y 'n' el contador de intervalos de salida.

Derivado del principio del HU. Monteanu, citado por López Cadenas y Soba Baro, 1982, *op. cit.*, desarrolla el método de los paralelogramos de escorrentía aplicado al cálculo de caudales máximos en cuencas torrenciales,

Con relación al caso que se desarrolla, se deduce que los hidrogramas resultantes de cada UEH y en cada período de cálculo pueden ser acumulados en sus respectivas bandas temporales para la obtención del hidrograma resultante de la lluvia total ingresada. Para mejorar este procedimiento de traslación de crecida a nivel de cuenca y su integración en unidades hidrológicas de orden mayor, MHIG modifica este método para agregar discretización areal y temporal de variables y parámetros.

En el esquema de la Figura: 11, cada paralelogramo representa la escorrentía E de cada UEH causada por una Lluvia Neta Pt, de un ancho T uniforme e igual al paso del modelo. La altura del paralelogramo, representa el caudal medio en el intervalo de cálculo. La suma de los caudales parciales de cada UEH representa el caudal medio de toda la cuenca en la sección de control o salida y en el período T de cálculo.

En la gráfica siguiente, los tiempos t1 y t2 representan, los tiempos más temprano y más tardío de llegada de la gota hidrológicamente más cercana y más alejada respecto a la sección de control o síntesis y tomados desde el inicio de la precipitación.

Para estos algoritmos de propagación y como se observa en el esquema, el resultado es independiente del paso del modelo. Si se tienen en cuenta todos los submodelos que intervienen en el procedimiento y los datos con que se cargan, se deduce que un paso de modelo menor al tiempo de concentración permite discretizar mejor los parámetros de entrada. Pero un paso muy chico no agrega precisión, siendo aconsejable adoptar con criterio práctico entre un tercio y un cuarto del tiempo de concentración de la cuenca, similar al recomendado por López Cadenas y otros autores ya citados.

### *Cauces. Propagación en cauces*

Para la traslación de onda de crecida en tramos de cauces, se han seleccionado dos métodos. El método directo, derivado del método ya expuesto como método de los paralelogramos de escorrentía. Y el método cinemático de Muskingum, (US. ARMY, 1969), citado por Ferrer Polo (1993), Linsley (1977), y otros autores.

#### *Método de propagación directa en cauce*

El algoritmo adoptado es similar al expuesto para UEHs. La crecida se "traslada" en el tiempo sin deformación de la onda. Los parámetros que intervienen son la longitud del cauce (Lc) y la velocidad media de traslación (Vc). En términos prácticos puede utilizarse para este parámetro un estimador de 'c', celeridad de la onda de crecida. El tiempo de traslado es el que resulta de la relación entre la longitud del tramo y la velocidad de propagación.

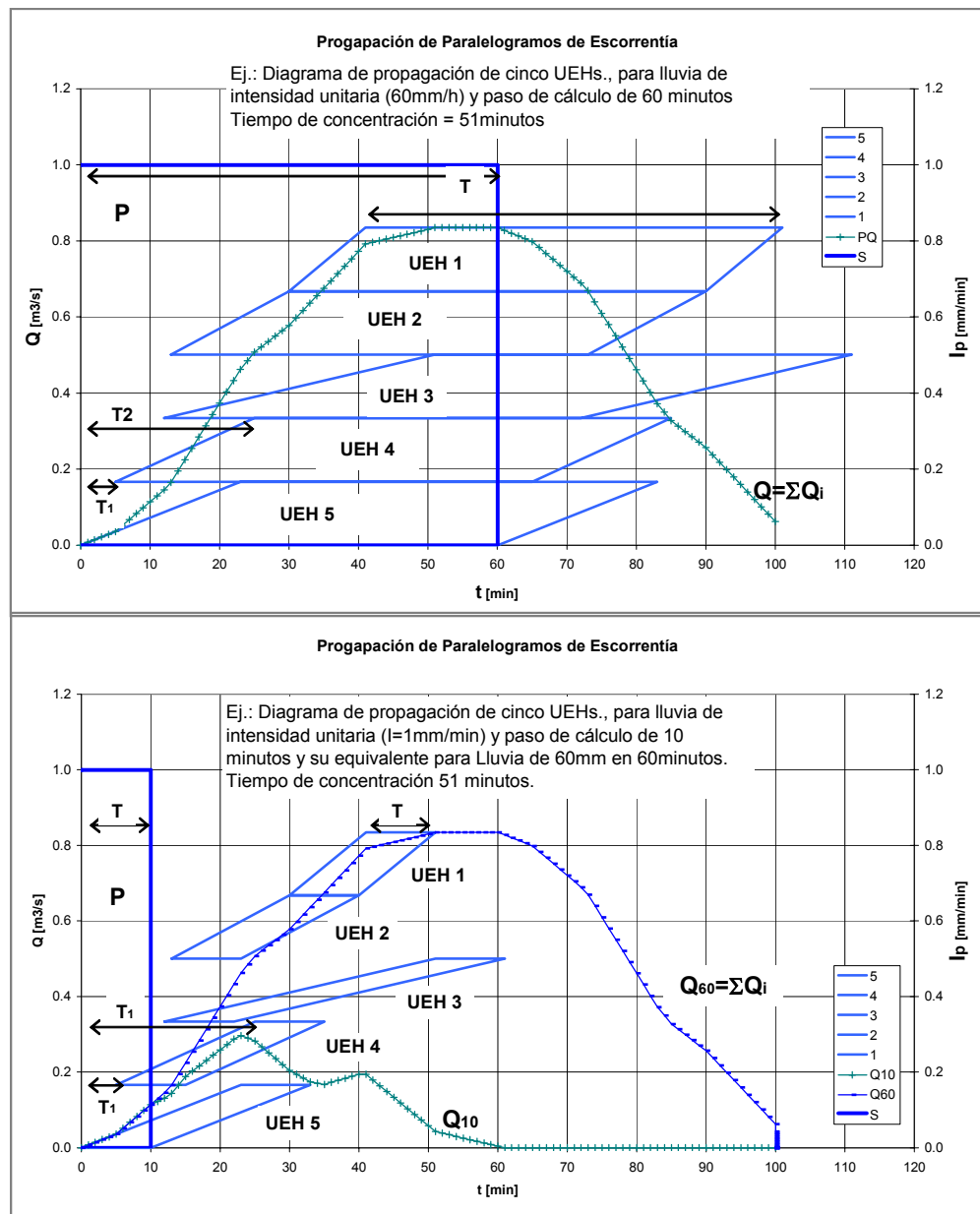


Figura: 11. Diagrama de Propagación, (paralelogramos de escorrentía): Esquema un período de cálculo, para una lluvia unitaria (1mm/minuto) en cinco UEHs unitarias, de tiempos desplazados y en. Comparación de un “paso” de cálculo similar al tiempo de concentración y un “paso” de 1/6 Tc

En la simulación por componentes y en la opción de utilización de este método, los algoritmos han sido aplicados por separado para cada elemento hidrológico simulado, y los parámetros deben en consecuencia ser estimados para cada uno de ellos.

El método de propagación directa de los paralelogramos de escorrentía produce un desplazamiento de la onda y no su atenuación. El método cinemático de Muskingum permite simular ambos efectos. Los caudales de un grupo de cuencas obtenidos al pie o salida de cada una, si descargan a un tramo de cauce, pueden ser propagados en dicho tramo hasta una sección de control única ubicada al final del mismo. El método cinemático de Muskingum de traslación agregada de ondas de crecidas en cauces naturales modela el almacenamiento volumétrico que produce la creciente en forma de cuña dentro del cauce y su valle de inundación.

Muskingum utiliza dos parámetros de ajuste, 'k' y 'x'. La constante de almacenamiento "K", expresa en unidades de tiempo la relación entre almacenamiento y descarga. Por defecto, se la estima como similar al tiempo de viaje de la onda de crecida y en función de su celeridad. El parámetro "x", es adimensional para  $0 \leq x \leq 0,5$ , con valores prácticos que varían entre 0,1 a 0,3 en la mayoría de los casos, y expresa la importancia relativa entre las entradas y las salidas del tramo de cauce. Para Muskingum, cuando la creciente comienza a desarrollarse (curva de ascenso del hidrograma), los caudales ingresantes al tramo son mayores que los salientes, produciéndose un incremento del almacenamiento en un período de cálculo, al que representa por simplicidad en forma de cuña (Figura: 12).

Durante el descenso, los caudales salientes son mayores a los entrantes produciéndose el efecto inverso. Para caudales entrantes y salientes iguales, el almacenamiento presente puede asimilarse a un prisma de sección transversal constante. Ambos almacenamientos (prisma y cuña) pueden valorarse y sumados representan el almacenamiento total en el cauce.

Muskingum supone un parámetro de proporcionalidad 'K', tal que el almacenamiento en prisma es el producto  $A_p = K Q_s$ , es decir, que el almacenamiento en el prisma es proporcional al caudal saliente. Mientras que el almacenamiento en cuña, es proporcional al producto de  $K \cdot x \cdot (Q_e - Q_s)$ , o producto de la constante de proporcionalidad por la diferencia de caudales entrantes y salientes, afectado de un coeficiente de ponderación de entras y salidas.

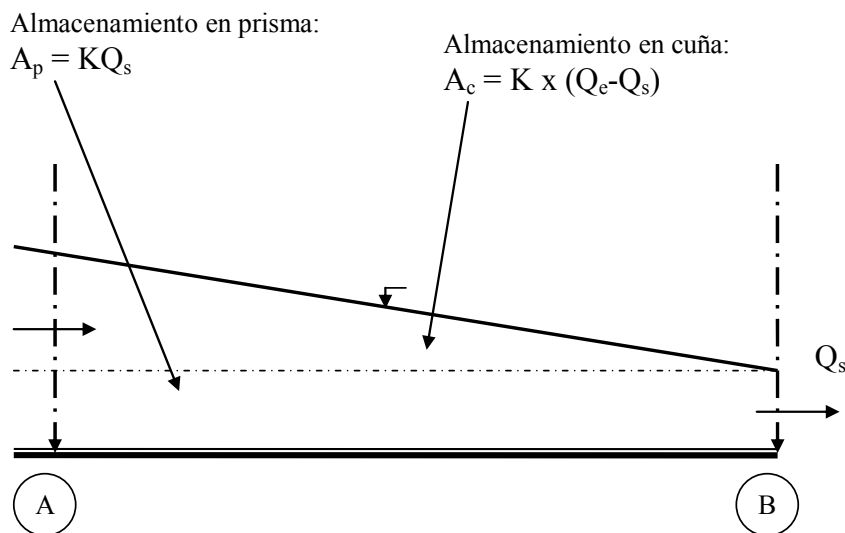


Figura: 12. Esquema de almacenamiento en un cauce (prisma – cuña), para la creciente

Luego, el almacenamiento 'S' en el tramo de cauce será:

$$(XIV) \quad S = K[xQ_e + (1-x) Q_s] \quad ; \quad 0 \leq x \leq 0,5 \quad ;$$

El coeficiente 'x' depende de la geometría de la sección transversal, variando entre un valor nulo para embalses (x=0), hasta un valor máximo de x=0,5 para cuñas totalmente desarrolladas. Los valores prácticos para tramos de arroyos y ríos varían entre 0,1 y 0,2.

Si los valores de 'K' y 'x' se suponen constantes y considerando un período dado de tiempo 'k', con un paso de cálculo t, se tiene para el inicio y fin del período:

$$(XV) \quad S_{k+1} - S_k = K \{ [xQ_{e_{k+1}} + (1-x) Q_{s_{k+1}}] - [xQ_{e_k} + (1-x) Q_{s_k}] \}$$

Reagrupando los términos, se arriba a la conocida expresión lineal para el tránsito agregado de crecidas:

$$(XVI) \quad Q_{S_{k+1}} = C_0 * Q_{e_{k+1}} + C_1 * Q_{sk} + C_2 * Q_{s_k}$$

Donde, Q = Caudal expresado en [m3/s], el Subíndice "S" indica en la salida del tramo, el subíndice "E" indica entrada al tramo, el Subíndice "1", al comienzo del período y el Subíndice "2" al final del período de cálculo. Los coeficientes "C0, C1 y C2" de Muskingum se deducen de su procedimiento en función de los parámetros "K" y "x" y de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$C_0 = -\frac{Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t} \quad ; \quad C_1 = \frac{Kx + 0,5t}{K - Kx + 0,5t} \quad ; \quad C_2 = \frac{K - Kx - 0,5t}{K - Kx + 0,5t}$$

Donde, (C0 + C1 + C2) = 1 , y 0 <= x <= 0,5

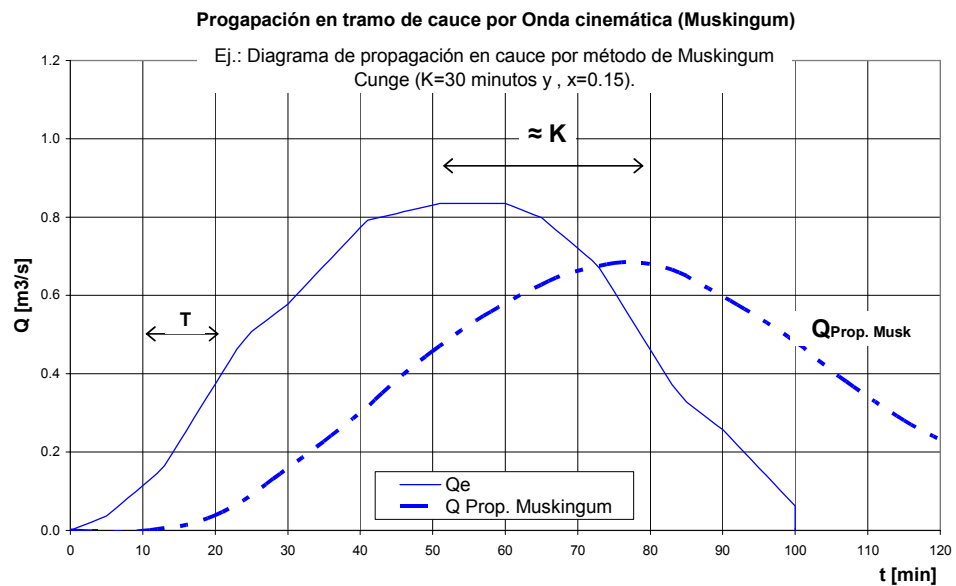


Figura: 13. Propagación en cauce, Método de Muskingum

Si se conocen ambos hidrogramas de entrada y salida en un tramo de cauce representativo del que se intenta simular,  $K$  puede ser medido despejando y resolviendo la ecuación Muskingum. Existen otros diversos métodos para la estimación de ' $K$ ', (Linsley, 1977, Chow, 1994, *op.cit.*). La interpretación física más simple de ' $k$ ' es que representa la celeridad de la onda de crecida y en ausencia de datos puede estimarse como la velocidad de traslación de la onda de crecida entre los dos picos de hidrogramas (entrad y salida).

En MHIG, los parámetros " $K$ " y " $x$ " son ingresados como datos para cada tramo de cauce, en función de las características morfológicas, de la celeridad estimada para la onda de crecida y de la longitud del tramo.

En la Figura: 13, puede verse un diagrama de propagación por Muskingum, para un hidrograma elemental producido en una UEH que es trasladado al final de un tramo de cauce.

### *Represas y estructuras hidráulicas de evacuación*

Las represas y sus órganos hidráulicos de regulación o evacuación (orificios, vertederos, compuertas) pueden ser simulados de manera muy sencilla, insertando en el ruteo del diagrama un componente represa.

El programa analiza en forma aislada las entradas y salidas al embalse de una represa, produciendo como resultado -para cada período de cálculo- las variables de embalse: *altura de agua, superficie inundada y almacenamiento*, y los *caudales salientes* en dicho período (Figura: 14).

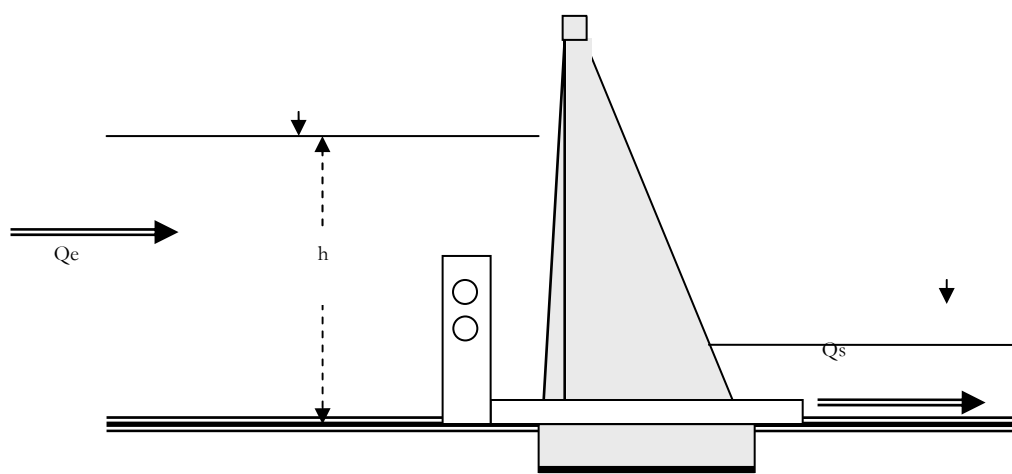


Figura: 14. Esquema de cálculo para una Represa

### *Tránsito de crecidas en embalses de represas*

Para un modelo agregado, el tránsito de crecidas es el procedimiento por el cual puede determinarse la forma del hidrograma de aguas abajo a partir de conocer el Hidrograma en una sección de aguas arriba. En este caso, conocido el hidrograma de entrada al canal o tramo de cauce, deducir el hidrograma en el final.

El proceso de cálculo de una represa se resume en aplicar: a) Modelo de balance de aguas superficiales (entradas y salidas al embalse, y b) Modelo de traslación de onda de crecida en embalse. Los modelos de traslación de onda de crecida que se computan opcionalmente son: a) *Propagación directa* (paralelogramo de escorrentía; b) *Muskingum* (lagos); y c) *Runge Kutta*.

En todos los casos, la información de entrada son los caudales entrantes, en tanto los parámetros de ajuste dependen del método de propagación elegido.

Chow (1994, *op.cit.*), analiza el tránsito agregado de crecidas partiendo de la conocida ecuación de continuidad (Shames, 1977, Chow, 1964):

$$(XVII) \quad \frac{dS}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t)$$

La ecuación diferencial, establece para el almacenamiento una función de las entradas y las salidas. Una segunda relación que me permita resolver la ecuación, podría obtenerse de la función de almacenamiento, que en un desarrollo de Taylor en función no lineal de las entradas y las salidas puede expresarse como:

$$(XVIII) \quad S = f(Q_e + \frac{dQ_e}{dt} + \frac{d^2Q_e}{dt^2} + \dots; Q_s + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{d^2Q_s}{dt^2} + \dots)$$

El sistema de ecuaciones diferenciales puede resolverse por diferencias finitas, según el sistema que se esté analizando. Chow considera tres métodos de resolución: piscina nivelada, Muskingum, y Runge Kutta.

*Método de propagación de Piscina Nivelada*

Se supone aquí que el almacenamiento es una función no lineal solo de las salidas, según una serie de Taylor, puede expresarse como:

$$(XIX) \quad S = Q_s + \frac{dQ_s}{dt} + \frac{d^2Q_s}{dt^2} + \dots$$

Si el embalse es ancho y profundo, las velocidades y pérdidas de carga son despreciables, la superficie de agua puede asimilarse a una superficie horizontal, donde la variación del almacenamiento debida a las entradas puede aceptarse despreciable, solo es función de los caudales salientes.

Integrando la ecuación diferencial (XIX) , y resolviendo para intervalos finitos en el período 'k', de ancho de intervalo T= Δt, se tiene:

$$(XX) \quad \int_{S_k}^{S_{k+1}} dS = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} Q_e(t) dt - \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} Q_s(t) dt \text{ , para variación lineal en el}$$

intervalo:

$$(XXI) \quad S_{k+1} - S_k = \frac{Q_{e_k} + Q_{e_{k+1}}}{2} \Delta t - \frac{Q_{s_k} + Q_{s_{k+1}}}{2}$$

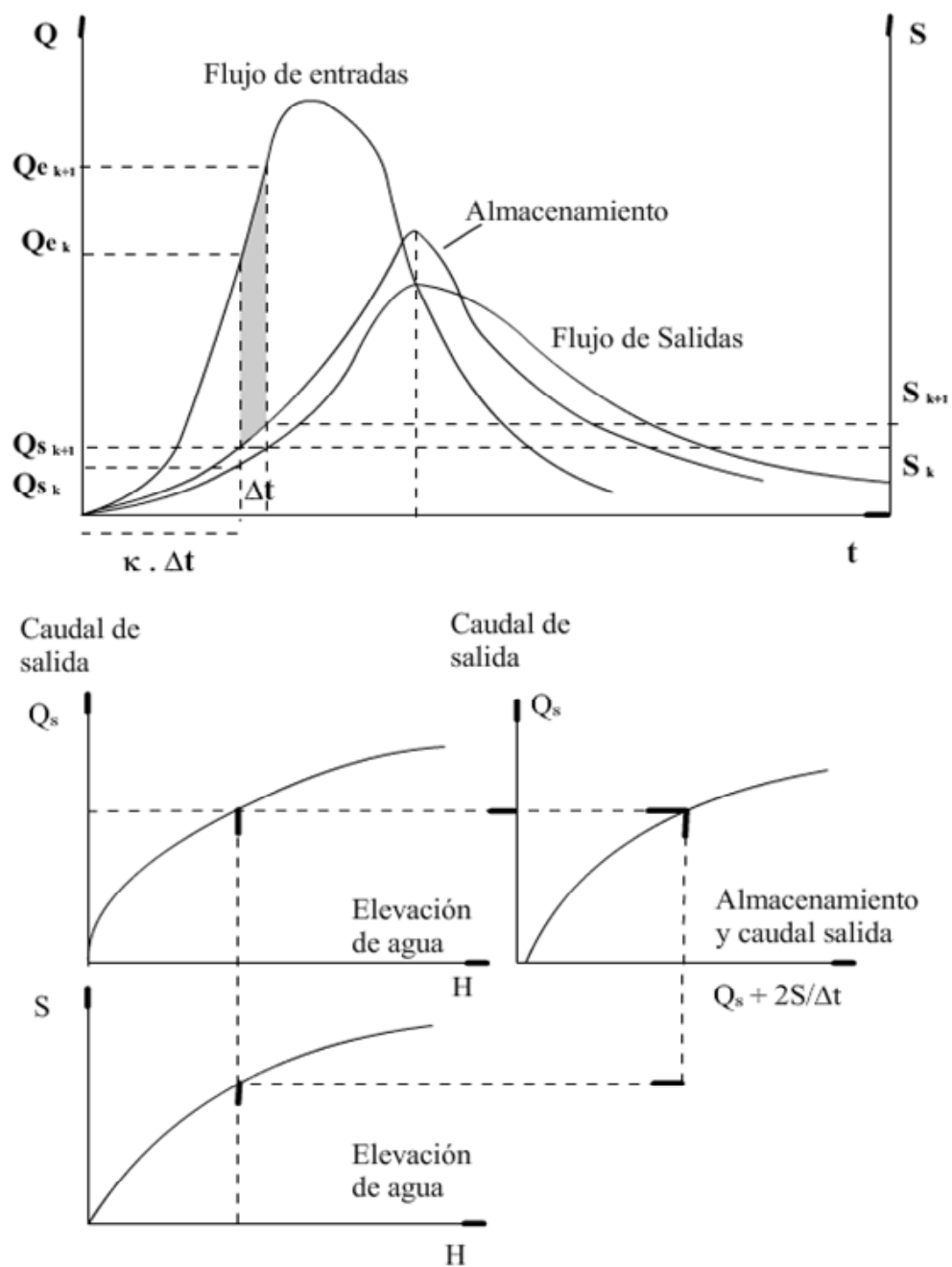


Figura: 15. Piscina Nivelada: Diagrama para Almacenamiento, flujos de entradas y salidas



Reagrupando los términos conocidos a la derecha de la ecuación,

$$(XXII) \quad \left( \frac{2S_{k+1}}{\Delta t} + Q_{s_{k+1}} \right) = (Q_{e_k} + Q_{e_{k+1}}) + \left( \frac{2S_k}{\Delta t} - Q_{s_k} \right)$$

Para el cálculo de  $Q_{k+1}$ , se recurre a una función de almacenamiento-caudal de salida, que relacione  $2S/\Delta t + Q_s$  con  $Q_s$ . Esta función se puede obtener de relacionar el almacenamiento con la altura de agua en el embalse.

Esta relación, puede obtenerse con trabajos topográficos. La relación elevación del agua-caudal saliente puede obtenerse de aforos o de funciones de los órganos de regulación de la presa (vertederos, compuertas). Para un valor conocido de 'H' de la elevación de agua en el embalse, se determina el almacenamiento 'S', y el caudal saliente 'Qe'. Seguidamente, para esos valores conocidos se calcula la función  $2S/\Delta t + Q_s$  y con ella, el valor del caudal saliente (¡Figura: 15).

#### *Método de propagación de (Muskingum)*

En esta opción, el método adoptado para la propagación de crecida en un tramo de cauce es el de onda cinemática de Muskingum, expuesto en 0, donde el parámetro de ponderación 'x' es nulo ( $x=0$ ), según se ha visto. Luego, el almacenamiento es función proporcional del caudal de salida:

$$(XXIII) \quad S = KQ_s \quad ;$$

$$(XXIV) \quad C_0 = -\frac{-0,5t}{K + 0,5t} \quad ; \quad C_1 = \frac{0,5t}{K + 0,5t} \quad ; \quad C_2 = \frac{K - 0,5t}{K + 0,5t}$$

#### *Método de propagación de Runge-Kutta*

Chow explica un procedimiento alternativo para el tránsito agregado de crecidas que surge de resolver las ecuaciones de continuidad por el método numérico de Runge-Kutta. La ventaja de este método es que no requiere de la función almacenamiento-caudal de salida,  $S = f(Q_s)$ . Citando a Carnahan (et al, 1969), sostiene que pueden adoptarse varios esquemas de Runge-Kutta de diferente orden, del que selecciona un esquema de tercer orden. Cada intervalo de tiempo es subdividido en tres partes, y calcula valores sucesivos de la elevación del agua y el caudal de salida del embalse para cada incremento.

En la ecuación de continuidad (XVII), la variación del almacenamiento en relación a la elevación y superficie de agua embalsada, puede expresarse en función de la altura del embalse, como:

$$(XXV) \quad dS = A(h) dh$$

Donde 'h' es la elevación de agua en el embalse, y 'A(h)' es el área de la superficie de agua a la altura 'h'. Reemplazando en la ecuación de continuidad, resulta:

$$(XXVI) \quad \frac{dh}{dt} = \frac{Q_e(t) - Q_s(h)}{A(h)}$$

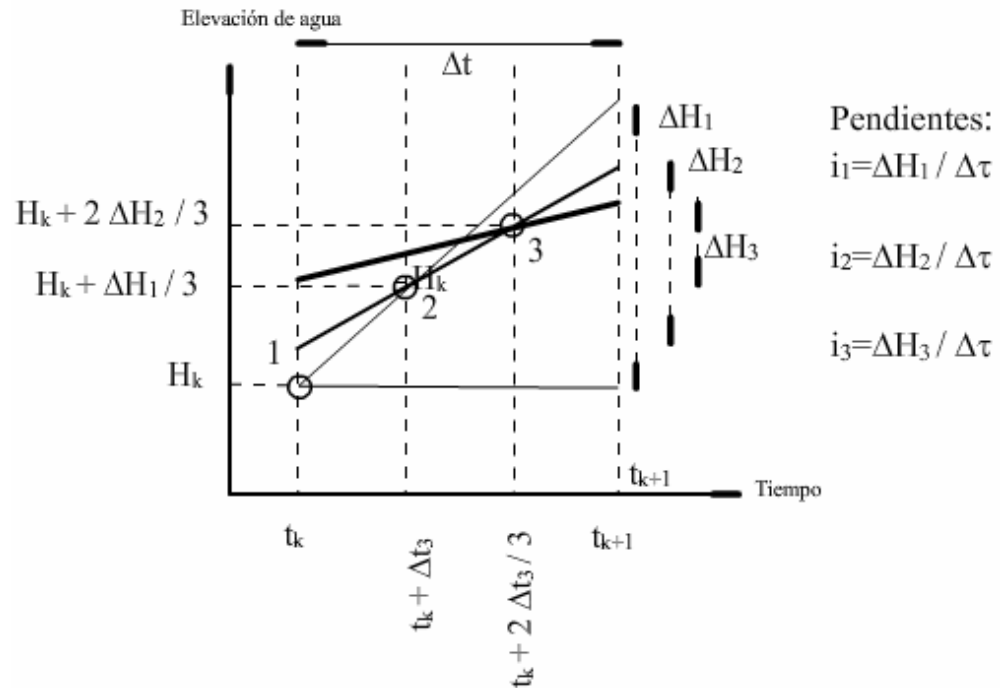


Figura: 16. Tránsito agregado en embalses: Incrementos de elevación para la resolución por método numérico de Runge Kutta, de tercer orden

La resolución numérica, toma pequeños intervalos de la variable dependiente 'h' dentro del intervalo 't'. En un esquema de tercer orden, se toman tres intervalos de 'h' en cada período 'Δt', truncando los términos subsiguientes de la serie de Taylor.

Cada uno de los tres intervalos en 'h', dan una aproximación mayor al valor de la solución. Tomando intervalos finitos, resulta:

Primera aproximación:

$$(XXVII) \quad \Delta h_1 = \frac{Q_e(t_k) - Q_s(h_k)}{A(h_k)} \Delta t$$

Segunda aproximación:

$$(XXVIII) \quad \Delta h_2 = \frac{Q_e(t_k + \frac{\Delta t}{3}) - Q_s(h_k + \frac{\Delta h_1}{3})}{A(h_k + \frac{\Delta h_1}{3})} \Delta t$$

Tercera aproximación:

$$(XXIX) \quad \Delta h_3 = \frac{Q_e(t_k + \frac{2\Delta t}{3}) - Q_s(h_k + \frac{2\Delta h_1}{3})}{A(h_k + \frac{2\Delta h_1}{3})} \Delta t$$

La elevación de agua en el período, es la elevación de agua en el período anterior más la variación 'h', de donde se deduce que:

$$(XXX) \quad \Delta h = \frac{\Delta h_1}{4} + \frac{3\Delta h_3}{4}$$

La Figura: 16, muestra un diagrama para las tres aproximaciones de 'Δh1', 'Δh2' y 'Δh3'. La pendiente de la solución dh/dt, queda resuelta por aproximación 'Δh/Δt'. Se calcula primero en (hk ; tk), luego en (hk+ Δh1/3 ; tk+ Δt/3), finalmente en (hk+ 2 Δh2/3 ; tk+ 2 Δt/3).

*Datos y parámetros de entradas de componentes Represas*

Los datos y parámetros a ingresar para un componente represa, se agrupan en:

Relaciones h-A-S Las relaciones de almacenamiento 'S' y área de la superficie de agua 'A' embalsada a la elevación 'h', se ingresan para cada uno de los componentes en formato de tabla.

La Relaciones h-Qs : función de descarga del embalse, se puede conformar por un conjunto de ecuaciones de opción potencial o poli nómica de Q (h). Opcionalmente, puede ingresarse en forma de tabla discreta de valores h-Q.

*Componentes lagos / lagunas / mallines*

El análisis es similar que para represas, admitiendo las mismas opciones de propagación de la crecida. Los datos se cargan solo en formato de tabla para h-A-S-Qs.

## Calibración - Explotación

Luego de la diagramación y carga de componentes de la simulación hidrológica, se requiere la fase de calibración, en la cual se ajustan los parámetros que mejor resultados producirán.

Esta fase requiere ser validada con investigaciones de campo y laboratorio, y corridas de ajustes en gabinete, que permitan reproducir de manera abstracta el fenómeno torrencial que se modela, arribando a resultados confiables en un entorno de error conocido y aceptable para el propósito perseguido.

El procedimiento correcto de calibración requiere de al menos una tormenta observada, y su correspondiente hidrograma medido en una sección de control.

En la tesis MIEC-PMP, se han desarrollado los criterios que permiten acotar el error aceptable, en función de la finalidad del estudio, la información técnica disponible, y la certidumbre y calidad de los resultados esperados (Serra, 2003, *op.cit.*). Dependiendo de ello, muchos parámetros con dificultad de ser medidos en campo pueden ser reemplazados con estimaciones basadas en experiencias en unidades hidrológicas similares.

La calibración en una simulación de crecidas máximas en torrentes de PM, admite simplificaciones de simulación hidrológica que acotan el problema, por cuanto se suponen:

- Condiciones previas de humedad elevada en la cuenca y tasa de infiltración cercana a la infiltración básica;
- Caudal superficial inicial nulo (aunque el modelo admite como dato un caudal inicial mayor que cero);
- Unidades hidrológicas pequeñas a medianas. En consecuencia, la lluvia puede suponerse generalizada en todo el cuenco; aunque el modelo admite discretizar la lluvia en tantas áreas como en UEHs se haya subdividido a la zona de estudio.
- Laderas y red de drenaje de pendientes bien conformadas, sin depresiones extensas. (Aunque el modelo admite retardos para la mejor simulación de UEHs con pendientes reducidas y elevado almacenamiento);

La fase de explotación, corresponde a las corridas que se efectúan con el modelo ya calibrado, para explorar comportamientos en diferentes escenarios de tormentas. Las fases de la explotación del programa, comprenden:

### *Primer paso*

- Diagramación de los componentes (Editor Gráfico),
- Carga de componentes UEHs, cauces, represas, lagos/lagunas/mallines,
- Vinculación y jerarquización de componentes (ordenamiento de la descarga de un componente a otro),
- Carga de datos físicos y parámetros de las UEHs:
  - Área o superficie tributaria, longitud al pie de UEH o cauce más cercano,
  - Parámetros de retención superficial e infiltración, parámetros de humedad y de escurrimiento iniciales,
- Carga de datos físicos y parámetros de cauces,
  - Longitud de cauce,
  - Opción de método y parámetros de propagación,
- Carga de datos físicos y parámetros de represas y lagos/lagunas/mallines,
  - Altura inicial de embalse,
  - Funciones h-A-S,
  - Funciones h-Q,
  - Opciones de método y parámetros de propagación,
- Carga de parámetros estimadores de Propagación:
- Verificación de todos los datos cargados (formato detallado en tabla).

### *Segundo paso*

Una vez cargados los datos físicos y parámetros del modelo, se cargan los datos de la tormenta en el módulo de precipitaciones,

Opción de la forma de ingresar los datos de la tormenta,

Carga de la tormenta o del grupo de tormentas (corrida anidada para un conjunto de tormentas PDR),

Selección o carga de la distribución de la tormenta, en caso de optar por un evento no real o sintético,

Selección del paso de cálculo del modelo y de las salidas del modelo (hidrograma),

### *Tercer paso*

Correr el modelo en una de las dos opciones (una tormenta o tormentas múltiples).

### *Cuarto paso*

Despliegue de informes de salidas en formato tabla y gráfico.

## Prueba y Validación

### Prueba de casos simples

Los modelos de procesos y subprocesos de cálculo han sido sometidos a distintas pruebas. A modo de ejemplo, se muestran resultados de tres pruebas, una para cada uno de los tres métodos de propagación en embalses que usa MHIG: b1) Piscina Nivelada, b2) Muskingum, 3, Runge Kutta. Para contrastar la prueba, se comparan los resultados de MHIG con los dados en el ejemplo de Chow (1994, p. 256-257, *op.cit.*), para Piscina Nivelada y Runge Kutta, agregando además el tránsito por Muskingum. Los valores del ejemplo, se han convertido previamente a unidades métricas. (Tabla 6, Figura: 17 a Figura: 20)

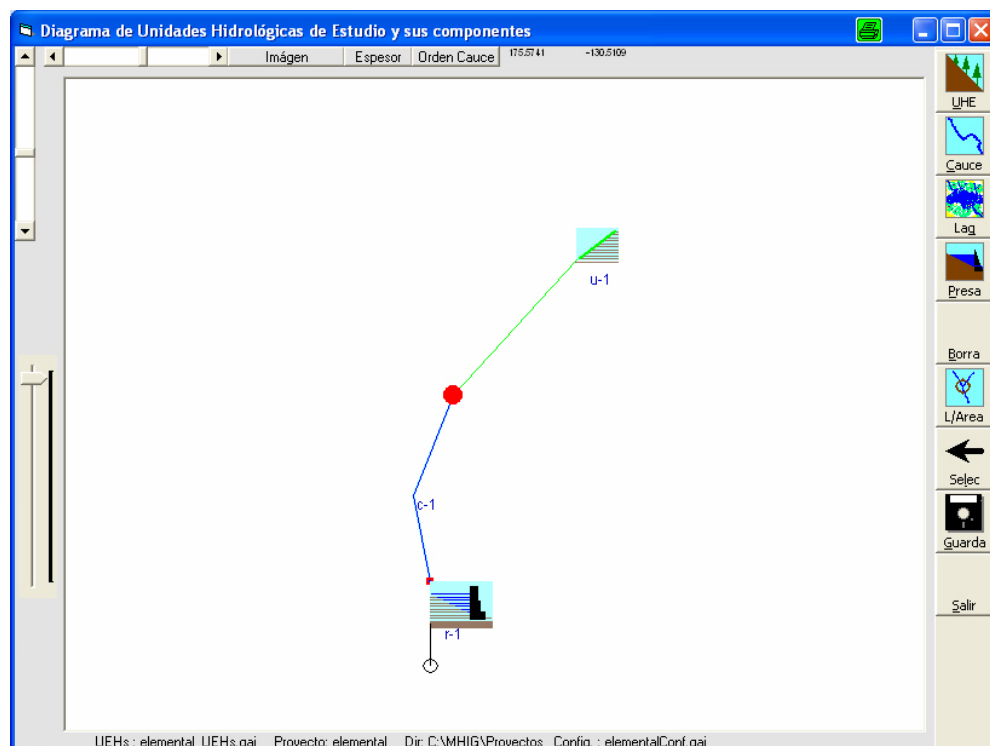


Figura: 17. Diagrama de MHIG para Pruebas de consistencia numérica 1,2,3,4 y 5

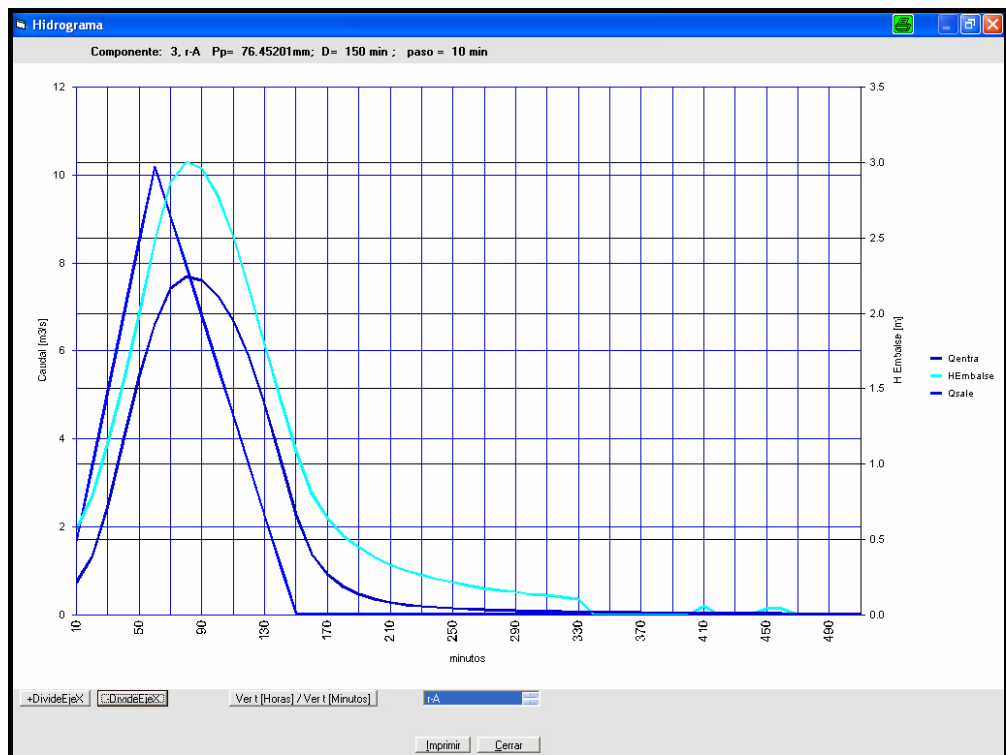


Figura: 18. MHIG: Resultados de tránsito por Método de Piscina Nivelada

Planilla detallada de cálculo de propagación en Represa  
 Método de Propagación: Runge Kutta

k	t	qe(i, k)	dH1	dH2	dH3	q(i, k)
0	0	0	0	0	0	5 97.21257
1	10	1.699003	-8.590364E-02	8.506668E-03	7.996098E-02	.6740972 5384948 2172.875
2	20	3.398007	.1519558	.2174481	.2670886	1.271873 .7768002 3152.993
3	30	5.09701	.3152273	.4352376	.3727513	2.442745 1.13517 4585.068
4	40	6.796013	.4795296	.6064576	.4122162	3.953379 1.542715 6254.595
5	50	8.495018	.6421161	.8352085	.4478332	5.390994 1.98388 8033.935
6	60	10.19402	.8052122	.1124832	.4803129	6.622623 2.479242 10029.42
7	70	11.89302	.9683083	.1459454	.5118129	7.798992 2.860509 11565.71
8	80	13.592017	1.1314044	.1784979	.5423129	8.898045 3.151212 13121.29
9	90	15.291015	1.2945005	.2110504	.5717129	9.908116 3.351212 14676.96
10	100	17.090013	1.4575966	.2436029	.6001129	10.838187 3.451212 16232.63
11	110	18.889011	1.6206927	.2761554	.6275129	11.688258 3.451212 17788.30
12	120	20.688009	1.7837888	.3087079	.6549129	12.458329 3.351212 19343.97
13	130	22.487007	1.9468849	.3412604	.6823129	13.148400 3.151212 20899.64
14	140	24.286005	2.1099810	.3738129	.7097129	13.758471 2.851212 22455.31
15	150	26.085003	2.2730771	.4063654	.7371129	14.288542 2.451212 24010.98
16	160	27.884001	2.4361732	.4389179	.7645129	14.738613 1.951212 25566.65
17	170	29.683000	2.5992693	.4714704	.7919129	15.108684 1.351212 27122.32
18	180	31.482000	2.7623654	.5040229	.8193129	15.398755 0.651212 28677.99
19	190	33.281000	2.9254615	.5365754	.8467129	15.608826 0.051212 30233.66
20	200	35.080000	3.0885576	.5691279	.8741129	15.738897 0.451212 31789.33
21	210	36.879000	3.2516537	.6016804	.9015129	15.788968 0.851212 33345.00
22	220	38.678000	3.4147498	.6342329	.9289129	15.759039 1.251212 34900.67
23	230	40.477000	3.5778459	.6667854	.9563129	15.649110 1.651212 36456.34
24	240	42.276000	3.7409420	.6993379	.9837129	15.359181 2.051212 38012.01
25	250	44.075000	3.9040381	.7318904	1.0111129	14.899252 2.451212 39567.68
26	260	45.874000	4.0671342	.7644429	1.0385129	14.269323 2.851212 41123.35
27	270	47.673000	4.2302303	.7969954	1.0659129	13.469394 3.251212 42679.02
28	280	49.472000	4.3933264	.8295479	1.0933129	12.509465 3.651212 44234.69
29	290	51.271000	4.5564225	.8621004	1.1207129	11.389536 4.051212 45790.36
30	300	53.070000	4.7195186	.8946529	1.1481129	10.109607 4.451212 47346.03
31	310	54.869000	4.8826147	.9272054	1.1755129	8.669678 4.851212 48901.70
32	320	56.668000	5.0457108	.9607579	1.2029129	7.069749 5.251212 50457.37
33	330	58.467000	5.2088069	.9953104	1.2303129	5.319820 5.651212 52013.04
34	340	60.266000	5.3719030	1.0308629	1.2577129	3.419891 6.051212 53568.71
35	350	62.065000	5.5350000	1.0674154	1.2851129	1.419962 6.451212 55124.38
36	360	63.864000	5.6980961	1.1049679	1.3125129	0.000000 6.851212 56680.05
37	370	65.663000	5.8611922	1.1435204	1.3409129	
38	380	67.462000	6.0242883	1.1840729	1.3703129	
39	390	69.261000	6.1873844	1.2266254	1.4007129	
40	400	71.060000	6.3504805	1.2706779	1.4321129	
41	410	72.859000	6.5135766	1.3164304	1.4645129	
42	420	74.658000	6.6766727	1.3638829	1.5000000	
43	430	76.457000	6.8397688	1.4130354	1.5385000	

Tabla 6 MHIG: Resultados de tránsito por Método de Runge Kutta

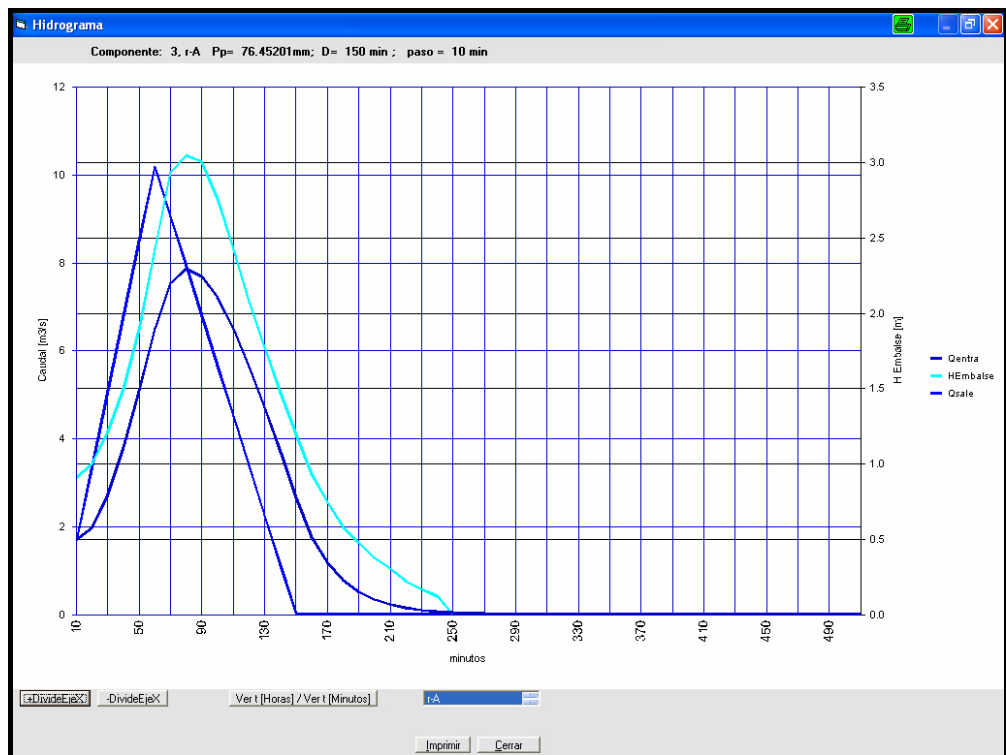


Figura: 19. MHIG: Resultados de tránsito por Método de Muskingum

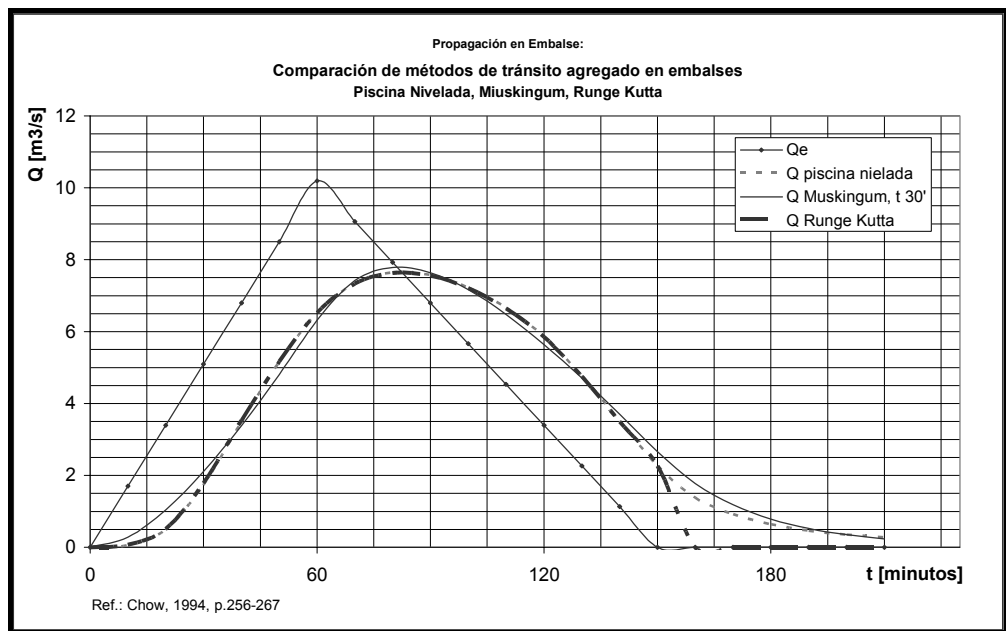


Figura: 20. MHIG, prueba y validación: Métodos de tránsito agregado de Piscina Nivelada, Muskingum y Runge Kutta. Soluciones al ejemplo de Chow.



## Prueba de un caso real: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut.

La prueba siguiente corresponde a la descripción detallada para el Cañadón Baraibar, Gaiman, Provincia del Chubut. Es una pequeño cuenca, en zona de bardas, que desagua hacia el Río Chubut en la referida localidad.

En la tesis MIEC-PMP, se describe con mayor detalle las características topográficas, morfológicas, de suelos, e hidrológicas en general.

La sección de control principal se ha ubicado en el cruce con Ruta Nacional N° 25, en cercanías del acceso a la ciudad. La superficie de la cuenca es de 77,8 Has. y la longitud del cauce principal de 2,06 km. Se evalúan dos escenarios: situación natural (sin presas) y situación con proyecto (tres presas en cascada).

### *Escenario para Cañadón Baraibar, SIN PRESAS*

En la Figura: 21. se muestra el diagrama de componentes, en este caso UEHs y tramos de cauces. El diagrama muestra las conexiones entre componentes que definen el ruteo del agua superficial.

Se ha elegido para el caso un conjunto de tormentas sintéticas, para distintas duraciones y periodo de retornos (PDR). Para este ejemplo, se supondrá distribución de lluvias uniforme e intensidad constante.

Efectuada la simulación con MHIG, se obtienen resultados que se pueden obtener de tablas (Tabla 7) o con formatos ábaco (Figura: 22).

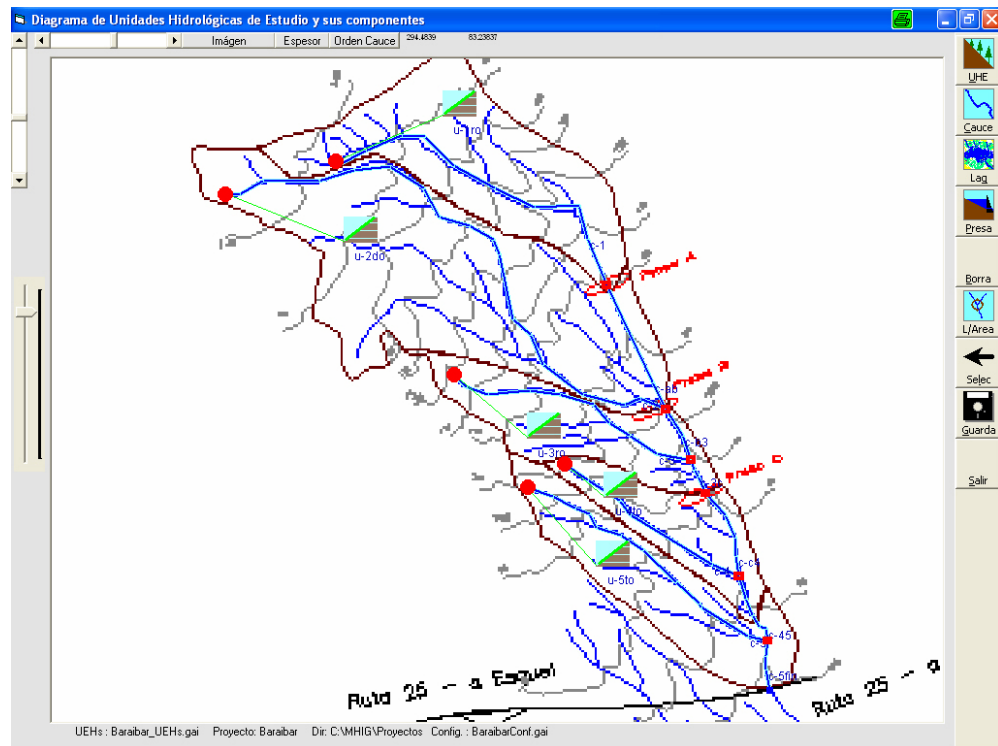


Figura: 21. Cañadón Baraibar, Gaiman, Chubut (Sin Presas): Diagrama de Componentes UEHs y cauces

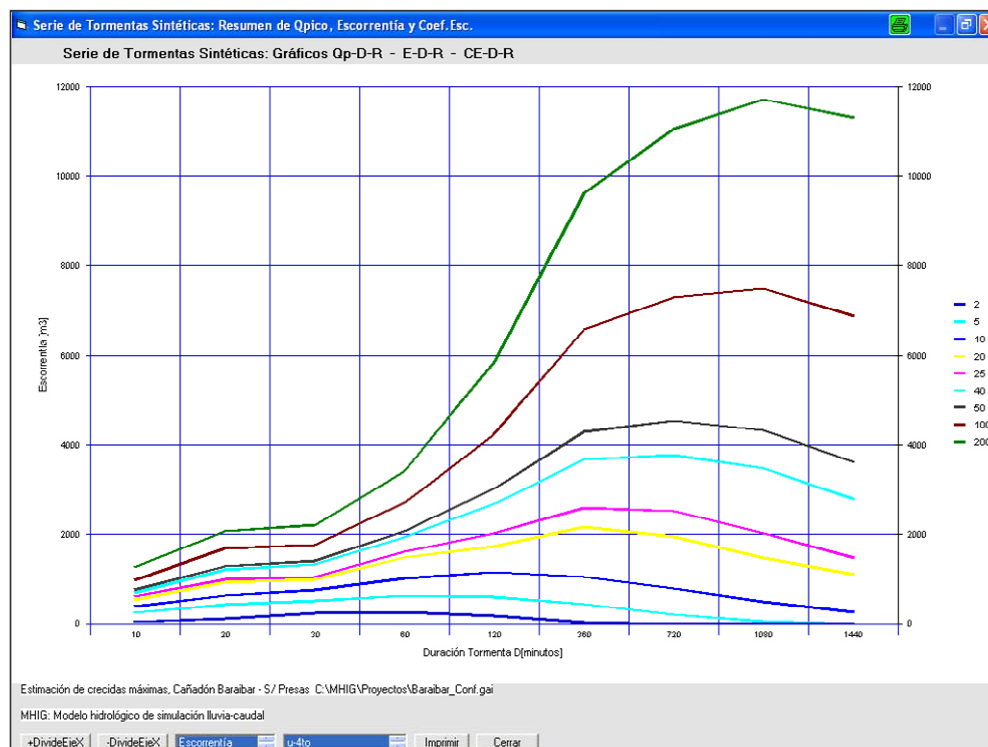
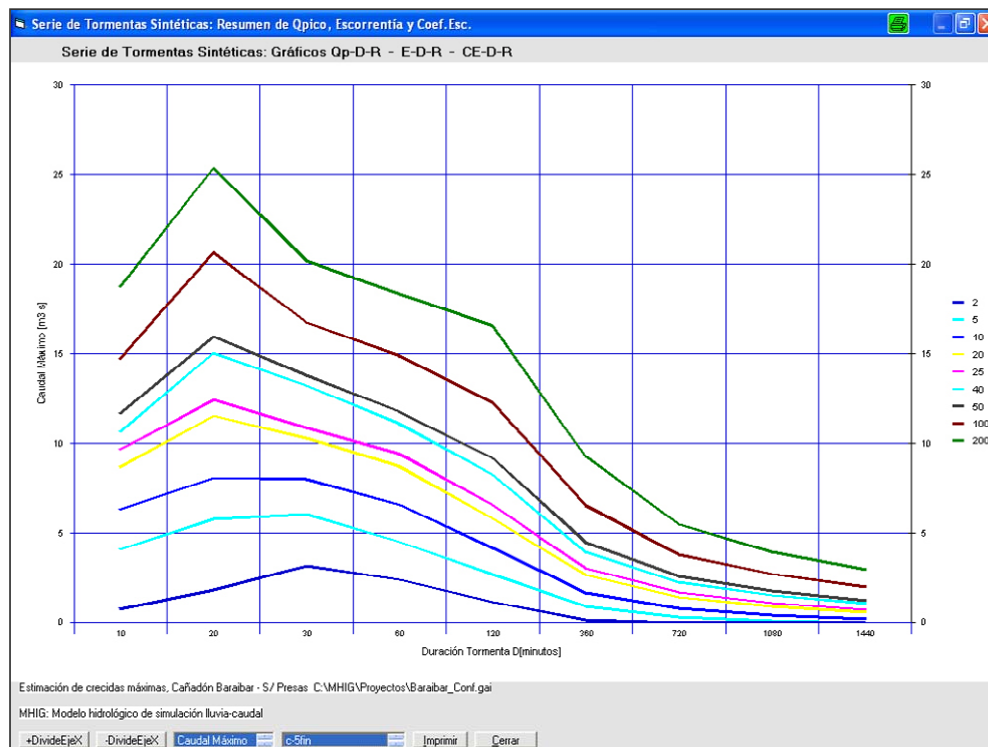


Figura: 22. MHIG: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. Gráfica de Caudales Máximos y Escorrentía - Duración - Recurrencia, para un conjunto de tormentas PDR

Componente	Nro.	P [mm]	D [min]	R [años]	Qp [m3/s]	E [m3]	C [%]
C:\MHIG\Proyectos\Baraibar_Conf.gai							
Estimación de crecidas máximas, Cañadón Baraibar - S/ Presas							
Ubicación: Gaiman, Pcia del Chubut - Cuenca: Valle Inferior del Río Chubut							
SubCuenca: Cañadón Baraibar							
Operador: JJS - 9/23/2006 8:21:56 PM							
o-c4	14	5	10	2	0.66		
		7	20	2	1.67		
		9	30	2	2.5		
		12	60	2	1.83		
		14	120	2	0.85		
		19	360	2	0.1		
		22	720	2	0		
		24	1080	2	0		
		24	1440	2	0		
		8	10	5	3.73		
		12	20	5	5.5		
		14	30	5	4.8		
		18	60	5	3.5		
		22	120	5	2.03		
		31	360	5	0.68		
		37	720	5	0.24		
40	1080	5	0.06				

Tabla 7 MHIG: Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. Ej.: Planilla detallada de Cálculo, por componente

## Comparación de resultados con otros modelos

Características de la prueba: Tormenta de recurrencia centenaria, duración 30 minutos, precipitación total de 32,4 mm. La Tabla 8, muestra una imagen del resumen de MHIG para los datos y parámetros de entradas de UEHs y tramos de cauces.

Tabla de datos de Entradas: Parámetros Físicos de las UEHs													
Baraibar06		Estimación de crecidas máximas, Cañadón Baraibar - S/ Presas						Baraibar06_					
Componente	Nro.	Nombre	#fuente de	Método	Vértices	Ind.Vért.	Vel. Media	Longitud	Orden	k Musk.	x Musk.		
Cauce	1	o-1	o-ab	Directo	11	1	1	895	1	0	0		
	2	o-2	o-b3	Directo	18	12	1.84	1320	1	0	0		
	3	o-3	o-3c	Directo	10	30	1.72	816	1	0	0		
	4	o-4	o-45	Directo	6	40	2.2	513	1	0	0		
	5	o-5	o-5fin	Directo	12	46	1.8	676	1	0	0		
	6	o-ab	o-b3	Directo	3	58	1.4	277	1	0	0		
	7	o-b3	o-3c	Directo	3	61	2.4	164	2	0	0		
	8	o-3c	o-o4	Directo	4	64	2.4	62	2	0	0		
	9	o-o4	o-45	Directo	5	68	2.4	239	2	0	0		
	10	o-5fin	0	Directo	4	73	2.4	114	2	0	0		
	11	o-45	o-5fin	Directo	6	77	2.4	190	2	0	0		
					Area	Long. Máx	Vel. Media	Infil.'a'	Infil.'b'	Humd	Q ini	'K' Rec.	Retens.
UEH	1	u-1ro	o-1	Directo	17.5	121	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	2	u-5to	o-5	Directo	11.3	97	0.5	0.41	0.74	0	0	0	3
	3	u-2do	o-2	Directo	32	142	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	4	u-3ro	o-3	Directo	9.8	135	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
	5	u-4to	o-4	Directo	7.2	46	0.23	0.41	0.74	0	0	0	3
Lag./Mallin	1				k Musk.						Hmin	HMáx	Hinicio
					0						0	0	0

Tabla 8 MHIG: Cañadón Baraibar, Tabla resumen de parámetros para UEHs y tramos cauces

Los resultados pueden observarse para cada componente UEH o cauce. Componente: Tramo de Cauce c-5fin

Per.k t[min] Qentra[m3/s] Qsale[m3/s]

Caudal Máximo = 12.15 m3/s

Seleccionando al fin de la prueba el último tramo de cauce, se obtienen como resultados un volumen escurrido de 18913 m<sup>3</sup>, caudal máximo 12,15m<sup>3</sup>/s, y el hidrograma que se muestra en la Tabla 9.

Los resultados obtenidos y expuestos en el punto anterior, se contrastan con los resultados de distintos modelos empíricos y de un modelo lluvia-caudal similar, de tipo determinístico y agregado.

El cálculo del tiempo de concentración, estimado por el método del SUCS, resulta de:

$$t_c = 0,87 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 0,87 \left( \frac{2,06^3}{70} \right)^{0,385} = 0,426 \text{ hs} \equiv 26 \text{ min}$$

Tabla 9 Cañadón baraibar: Resumen resultados para último componente (cauce), tormenta P 32,4mm, D 30 min., R 100años

t [min]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
0	0
5	0
10	0.818
15	4.237
20	7.286
25	9.596
30	11.129
35	12.154
40	8.544
45	5.28
50	2.766
55	1.233
60	0

Si se desea ajustar el resultado de MHIG a un tiempo de concentración similar, deben ajustarse los parámetros de velocidades de la onda de crecida en UEHs y cauces, siendo posible lograr total coincidencia.

Para el resultado mostrado, se presenta una comparación de hidrogramas de crecidas máximas que resultan de simular tormentas con el conocido modelo hidrológico HEC HMS. (Hydrologic Model System) HEC HMS, es producido por Hydrologic Engineering Center, US Federal Government:

Las variables de entrada y los parámetros de carga utilizados para ambos modelos son los mismos, o similares, como también son similares los criterios para el caso de aquellos parámetros de modelos diferentes.

Para las abstracciones se utiliza el método de “Initial-Constant”; el modelo de transformación del hidrograma utilizado es SCS (1971, *op.cit.*); por simplicidad se supone sin flujo base, conforme al Manual del Usuario y Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS. La, reproduce un esquema de los elementos hidrológicos con los parámetros físicos cargados en la rutina “Basin Model” (Figura: 23).

La Figura: 24 muestra resume en una gráfica los resultados del hidrograma obtenido por ambos métodos para el componente final en una sección de control ubicada en Ruta Nacional N° 25.

UEH	Initial loss [mm]	Constant Rate [mm/h]	SCS Lag [min]	Base Flow
1	3	5.16	15.5	No
2	3	5.16	17	No
3	3	5.16	11.4	No
4	3	5.16	7.7	No
5	3	5.16	9.3	No

Cauces	Lag [min]	Cauce Principal
R1	1.11	x
R2	1.11	x
R12	0.27	
R3	0.61	
R13	0.51	x
R4	0.27	
R14	0.28	x
R5	0.5	
R15	34	x
RS	0	x
<b>t Cauce Principal</b>	<b>37,0</b>	

Figura: 23. HEC-HMS: Cañadón Baraibar, Parámetros Físicos en “Basin Model”

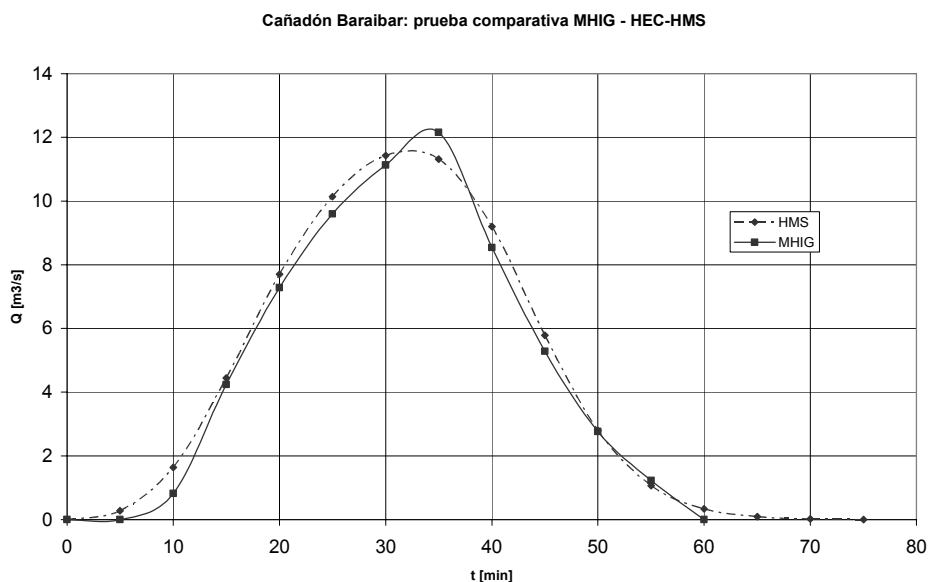


Figura: 24. Prueba comparativa MHIG y HEC-HMS. Tormenta de 32,4mm, Duración 30 minutos y período de retorno de 100 años

## Escenario para Cañadón Baraibar, CON PRESAS

Se analiza a continuación un caso aplicado para el cálculo de crecidas en la misma cuenca, “con presas”, de acuerdo a la conformación actual existente de tres pequeñas presas de control de crecidas, dispuestas “en cascada” en el cauce principal.

Cada una de las presas dispone de una estructura hidráulica de regulación y descarga, consistente en un dispositivo de toma con orificios y vertederos, y conducto bajo el cuerpo de la presa. Como estructura adicional, disponen de vertederos laterales, fuera del cuerpo de la presa, que en casos extremos producen descargas hacia el cauce principal. Las características de las presas y estructuras se describen con mayor detalle en la tesis MIEC-PMP.

Esta nueva versión de MHIG permite disponer de componentes “represas”, cargar sus parámetros de elevación, almacenamiento, superficie y descarga, y efectuar la simulación conjunta con la modelación hidrológica de la lluvia.

La conformación de componentes que resulta es la que se muestra en la Figura: 25.

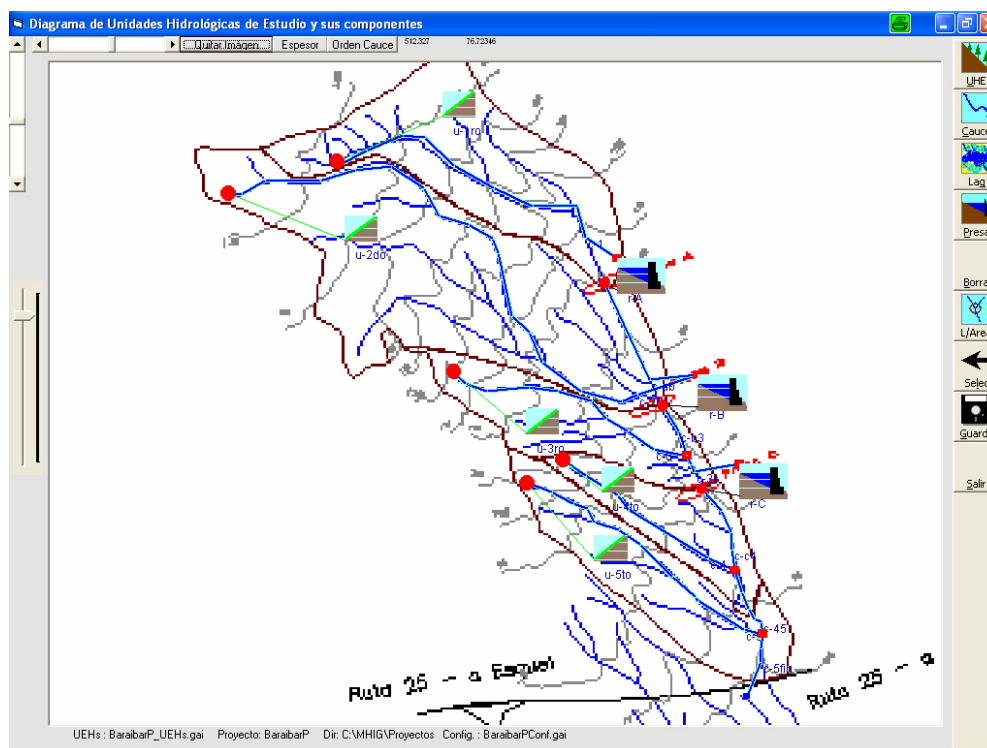


Figura: 25. MHIG: Cañadón Baraibar, diagrama de componentes, con las tres pequeñas presas de control de crecidas actualmente en servicio, A, B y C

Los parámetros de las estructuras hidráulicas no han sido objeto de medición y ajuste previo. Aunque se han aproximado en base a relevamientos existentes, estos parámetros no son verificados conforme a la obra existente, y solo se adoptan de manera aproximada al solo fin del presente ejercicio demostrativo (Figura: 26).

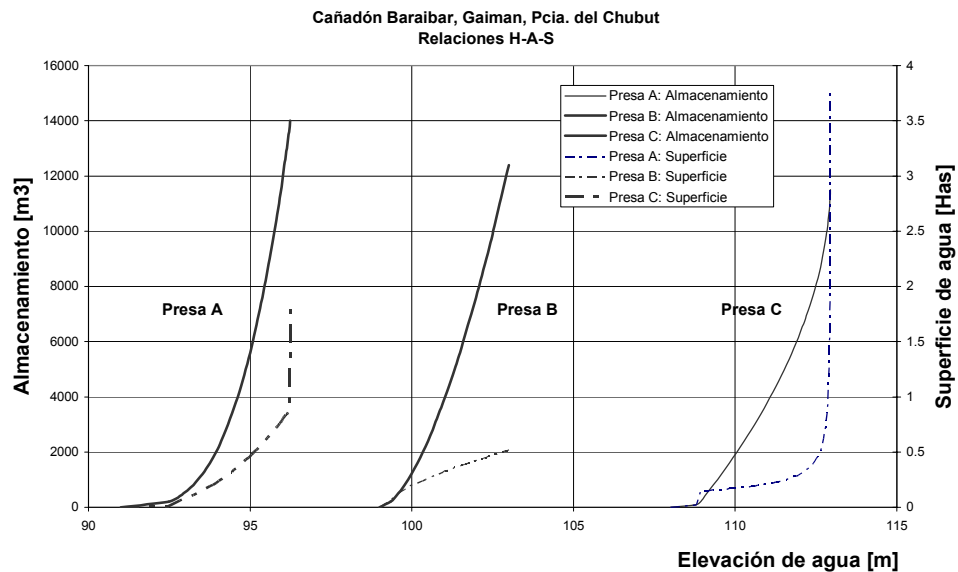


Figura: 26. MHIG: Cañadón Baraibar, Funciones elevación, superficie y almacenamiento de agua en embalses de presas A, B y C

El procedimiento para lagos/lagunas/mallines es análogo al realizado para represas, solo que se omiten las funciones teóricas de estructuras hidráulicas de regulación, y se reemplazan por una función estimada de la elevación de agua-caudal de salida.

En la Figura: 27 se muestran ábacos de resultados para dos componentes seleccionados.

Las pruebas de consistencias numéricas y comparativas realizadas para MHIG, y el contraste con otros modelos hidrológicos, resultaron consistentes y satisfactorios al objeto de la simulación de crecidas máximas, siendo una herramienta válida para este propósito en SHT o en SHM de PM.

#### *Aplicación a caso*

Finalmente, en la Figura: 28 se muestra un ejemplo de diagrama de componentes hidrológicos en una aplicación al Caso de Laguna Negra, un sistema hidrológico mixto y complejo, conformado por depresiones y lagunas existentes entre las ciudades de Trelew y de Rawson, en la Pcia. del Chubut.

Un detalle mayor de las referencias técnicas de MHIG pueden ser obtenidas del sitio [www.mhig.com.ar](http://www.mhig.com.ar).

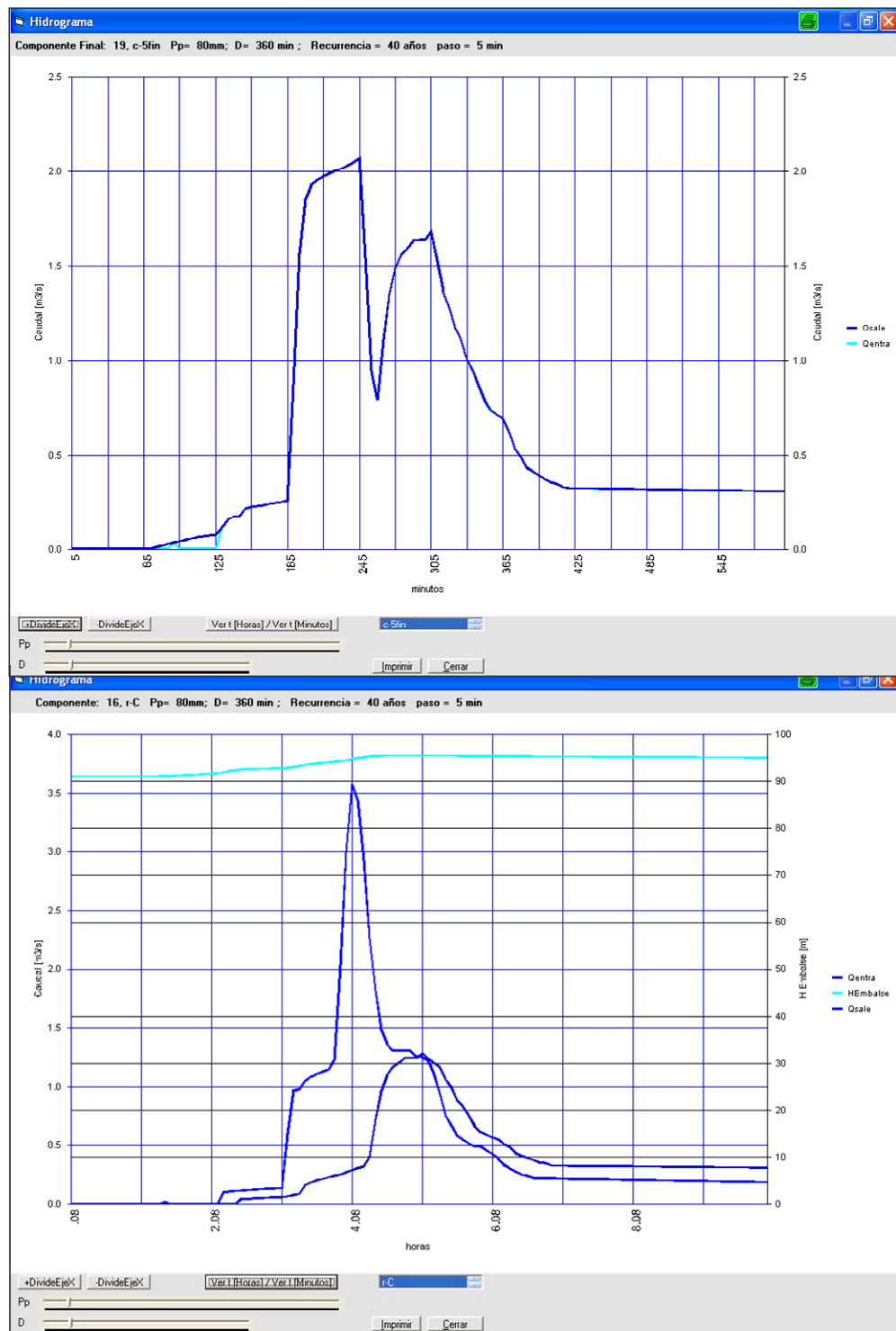


Figura: 27. MHIG: Cañadón Baraibar. Resultados de hidrograma para P 80mm, D 360min., R 40 años, en salida de Presa C (arriba) y tramo de cauce final (Ruta Nacional N° 25)



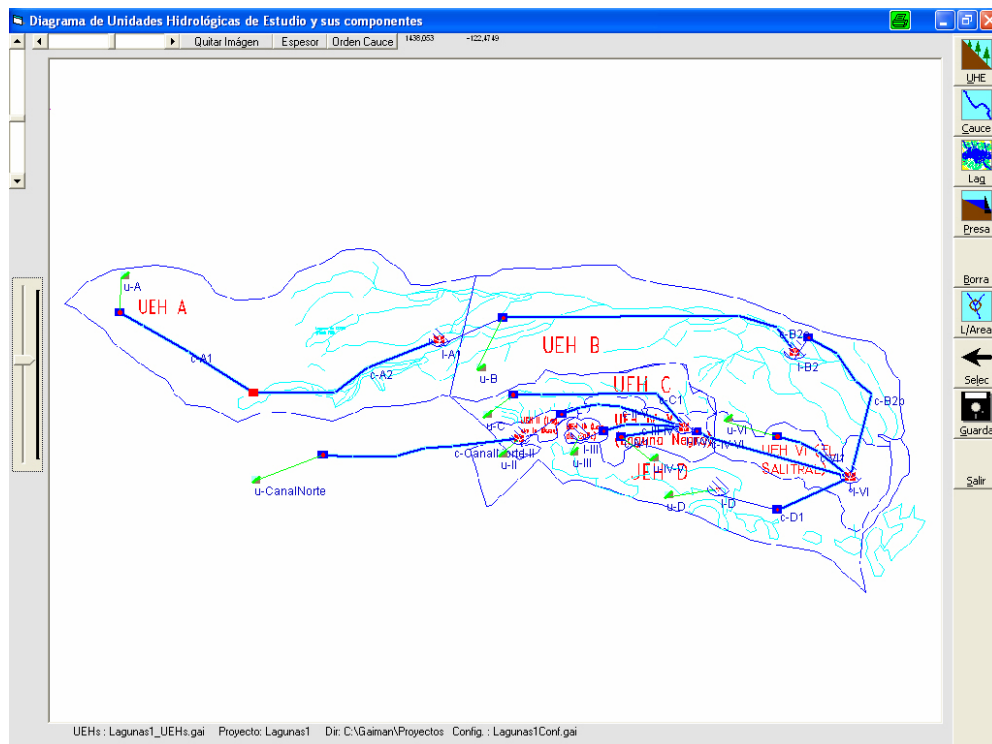


Figura: 28. Aplicación de MHIG: Caso de Laguna negra, entre Trelew y Rawson, Pcia. del Chubut, Argentina. Ejemplo de diagrama de componentes hidrológicos

# Glosario - Índice -

- Baraibar**, Cañadón Baraibar, Gaiman (VIRCh)
- Chubut**, Pcia Del Chubut, Argentina
- CORFO**, Corporación de Fomento del Chubut, Pcia del Chubut
- Dolavon**, Localidad de Dolavon, Pcia del Chubut
- Gaiman**, Ciudad del VIRCh, Pcia del Chubut
- GAIMAN**, Modelo Hidrológico (Serra, J, 1983)
- HEC HMS**, Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System
- MESOP**, Ministerio de Economía, Servicios y Obras Públicas (Chubut, 1980/90)
- NGA**, (National Geospatial-Intelligence Agency)
- PDR**, Funciones de Precipitación-Duración-Recurrencia (ecuaciones regionales de tormentas)
- PIT**, Parque Industrial de Trelew, Pcia del Chubut
- PM**, Paisaje de Meseta
- PMP**, Paisaje de Meseta Patagónica
- PMP**, Precipitación Máxima Probable
- Puerto Madryn**, Ciudad de Puerto Madryn, Pcia del Chubut
- Rawson**, Ciudad capital de la Provincia del Rawson, Chubut
- SCS Método de**, Soil Conservation Service, Curve Number Loss Model
- SCS**, Soil Conservation Service (US)
- SCyT**, Secretaría de Ciencia y Tecnología, UNPSJB
- SHM**, Sistema Hidrológico Mixto
- TRELEW**, Ciudad de Trelew, Pcia del Chubut
- UEH**, Unidad de Estudio Hidrológico
- UNPSJB**, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
- USGS**, US Geological Survey
- VIRCh**, Valle Inferior del Río Chubut

## A

### Ch

**Chow, V., 3, 22, 23, 28, 29, 31**

### F

**Ferrer Polo, 24**

### H

**Haller, 49**

**Heras, R., 19**

### L

**Linsley, 24, 28**

**Lopez Cadenas, 16**

### P

**Perez Soba Baro, A., 19, 24, 49**

### S

**Serra, J, 48**

**Serra, J., 34, 49**

**Sherman, 22**

**Soba Baro, A., 19, 24**

## Bibliografía citada

- Chow, Ven T., (1964), *Handbook Of Applied Hydrology*, Ed. Mc Graw-Hill.
- Chow, Ven T., Maidment, David R. Y Mays, Larry W., (1994), *Hidrología Aplicada*, Bogotá, Colombia: Ed. Mc Graw-Hill Interamericana S.A.. Isbn: 958-600-171-7.
- Ferrer Polo, Francico Javier, (1993), *Recomendaciones Para El Cálculo Hidrometeorológico De Avenidas*, Monografía M37, Ministerio De Obras Públicas, Transporte Y Medio Ambiente, Cedex, Issn 0211-8203, Isbn: 84-7790-168-6.
- Linsley, Ray K., Kohler, Max A. Y Paulus, Joseph L. H. (1977), *Hidrología Para Ingenieros*, 2da. Edición, Colombia: Ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana Sa.
- Lopez Cadenas De Llano, Filiberto, Y Perez Soba Baro, Antonio, (1982), *Seminario S/Erosión Y Sedimentación En Cuencas De Montaña*, 1982, Cihrsa, Incyth, Conicet, Carlos Paz, Córdoba.
- Serra, Juan Y Clérico, Felipe., (1989), <Gaiman>, *Modelo Matemático De Transformación Lluvia Caudal Para Pequeñas Cuencas Aluvionales En Áreas De La Meseta Semiárida Patagónica*, Informe Idth 7/89, Proyecto N°. 38/1986-1990, "Investigación Y Desarrollo De Técnica Hídricas De Manejo Y Control Del Virch"; En Biblioteca De Secretaría De Ciencia Y Tecnología, U. N. De La Patagonia San Juan Bosco, Pcia. Del Chubut.
- Serra, Juan., (2004a), *Tordise - Gaiman V-2000. Modelo Matemático De Simulación*, Lluvia-Caudal Para Pequeñas Cuencas Torrenciales. Obra Inédita De Software, Rnpi, E03802 Ex369879, Dnda, Buenos Aires, Rca. Argentina.
- Serra, Juan., (2004b), *Gaiman V-04, Modelo Hidrológico De Simulación De Crecidas En Sistemas Torrenciales*. Obra Inédita De Software, Rnpi, E 03801 - Exp. 369865 - 6/12/2004, Dnda, Buenos Aires, Rca. Argentina.
- Shames, Irving H., (1967), *Mecánica De Los Fluidos*, Madrid, España: Ed. Castillo.
- Sherman, L. K., (1932), *Streamflow From Rainfall By The Unit Graph Method*, Eng. News-Rec, Vol. 108, Pp. 501-505.
- Serra J., (2003), Estimación de Crecidas Máximas en Paisaje de Meseta. Tesis de Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, U. N. de Rosario
- Serra J., (2006), Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta, en la región semiárida patagónica. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, U. N. de Rosario.
- Stampone, Julio, Haller, Miguel, Serra, Juan, Greco, Winston, Sorondo, Alejandro, Harvey, Miguel Y Montí, Alejandro, (1998), Estudio Del Impacto Ambiental Hidrodinámico Superficial Y Subterráneo De Los Efluentes De La Ciudad De Puerto Madryn, En Zona De Terraza, Informe De Convenio Facultad De Ciencias Naturales, U.N. Patagonia San Juan Bosco Y Servicoop, Puerto Madryn.

Juan J. Serra  
<http://www.mhig.com.ar> - [jserra@satlink.com](mailto:jserra@satlink.com)  
® Derechos de Propiedad Intelectual en trámite  
Rawson, Pcia. del Chubut, Rca. Argentina, 5 de Octubre de 2006