

An aerial photograph of a semi-arid landscape with a complex network of rivers and streams. The terrain is a mix of brown, tan, and green, indicating sparse vegetation and exposed soil. The water bodies are a light blue color, winding through the landscape in a dendritic pattern.

**Juan Serra**

**METODOLOGIA INTEGRADA DE  
ESTIMACION DE CRECIDAS**

**en ambientes torrenciales típicos de áreas de  
meseta en la región semiárida patagónica**

**2008, Chubut, Argentina**

**Título: METODOLOGIA INTEGRADA DE ESTIMACION DE CRECIDAS  
EN AMBIENTES TORRENCIALES TÍPICOS DE ÁREAS DE MESETA EN  
LA REGION SEMIÁRIDA PATAGONICA (\*)**

Autor: Juan Serra

---

(\*) Serra, Juan (2002). Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura. Escuela de Carreras de Postgrado y Educación Continua. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Directora: Dra. Nora Pouey. Universidad Nacional de Rosario. Director de Tesis: Dr. Federico Horne. Rosario, Argentina. Jurados: Dra. Nora Pouey, Dr. Erik Zimmermann, Dr. Luis Vives. Defensa: 14 de Abril de 2003.

---

Autor/editor: Juan Serra

1ra. Edición (2008)

Cantidad de ejemplares (E-Book): 300

**ISBN: 978-987-05-4496-8**

© Juan Serra. Lezana, 2008. 1575, Playa Unión,  
Pcia. del Chubut, Rca. Argentina. jserra@satlink.com

Libro de edición argentina. Derechos reservados. Queda hecho el depósito que establece la Ley 11.723.

Advertencia: No se permite la reproducción parcial o total, el almacenamiento, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes 11723 y 25446.



## PROLOGO

*Este texto incursiona y avanza en el tratamiento de la hidrología regional patagónica apuntando a resolver una problemática grave y típica de la región. Indaga sobre los procesos hidrológicos a escala de paisaje, en unidades o geoformas que caracteriza funcionalmente. Sobre esta base y en el marco de los fundamentos de la hidrología conceptual determinística, presenta un modelo agregado y otro distribuido. El primero de gran aplicabilidad a la estimación de avenidas, con bajo requerimiento de data, de uso practico para el diseño de obras de defensa, presas de laminación de crecidas y sistematización de cauces.*

*La formulación distribuida desarrollada, integra inteligentemente herramientas computacionales actuales que conjugada con información topográfica satelital, permite mapear áreas de inundación, estimar riesgos y planificar el uso de la tierra.*

*La obra constituye un valioso ejemplo de una investigación académica bien estructurada, con resultados validados y de aplicación practica, ajustando las necesidades a la escasez de datos, muy apropiado para la región patagónica.*

**Federico Horne**

### **Cap. XI, Inundación: (\*)**

“Vencieron las cargadas nubes  
a toda la extensión del cielo,  
y vertiéndose, ya un mar inunda  
a la tierra, por todos sus rincones.  
Las fuentes de las profundidades,  
honduras invisibles,  
en hirvientes aguas rugientes se convirtieron  
y una vez despiertas, como un mar salvaje  
de blancas olas, la tierra invaden”. **Dafydd Ionawer (El Diluvio).**

(1899) “...salió de madre en un torrente rojizo-grisáceo en la punta del Valle Superior el 21 de Julio y desapareció toda esperanza d evitar el desastre...”

...“El torrente de agua viajaba rápidamente por el valle y no había nada que resistiera la avalancha...”

“...El agua entró al pueblo de Gaiman la mañana del Lunes 24, convirtiendo en un mar a su parte inferior y al valle inferior...”, “...Para el día 25, había llegado el torrente al Valle Inferior, fluyendo en una espumosa ola, pasó Trelew de largo y para el Viernes 2 había llegado a Trerawson (Rawson) y barrido casi por completo a este pueblo...”

### **Cap. XIII, Otra Inundación: (\*)**

“Fluyen con fuerza las aguas  
Como un río desde las rocas,  
Lejos sobre el límite llegan;  
Oigan el bramido del mar...  
Es el diluvio que lleva sus mares  
Blancos de ira  
Sobre valles y altos.  
Un solo elemento reina sobre todo ya,  
La mitad de la tierra es un inmenso océano.” **Islwin. (La tormenta).**

(1901)...“Ni el más pesimista soñó con otra inundación tan pronto”. La esperanza de un descanso para reparar las fuerzas fue lo que sostuvo a muchas almas doloridas en su esfuerzo de reparar los daños de la primera inundación. Pero ahora esta esperanza fue hecha añicos por la llegada de otra destructora inundación”...

### **Cap. XV, De nuevo inundación:**

“En la senda de los años irreconciliables.” **W. J. Griffith**

(1903, Julio). “Es muy adecuado llamar a estos años irreconciliables, porque era imposible para la colonia conformarse con el desastre de las inundaciones que hubo durante los cuatro años pasados”...

...“esta cuarta inundación era tan alta como la primera (1899, pero que no continuó en su plena fuerza por tanto tiempo como ella y vino más inesperadamente que ninguna de las anteriores...”

...“por el color grisáceo de sus aguas, como los de la segunda de 1901, que no fue de las inmediaciones de Los Andes que vino, sino de regiones no muy lejanas del interior y de los alrededores del Colbué Huapi...”

...“pertenece a esta cuarta inundación una característica que no se vio en ninguna de las anteriores, o sea los grandes trozos de hielo que traía consigo...”

(\*) Fragmentos de los relatos de la gesta de inmigración Galesa y formación de la Colonia del VIRCh, en “A Orillas del Río Chubut”, **Williams M. Hughes**, (1926)

# CONTENIDOS

- I- RESUMEN
  - II- INTRODUCCION
  - III- EL PROBLEMA TORRENCIAL EN PHMP
  - IV- PROPOSITOS DE LA INVESTIGACION DE PHMP
  - V- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS CONOCIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS EN CUENCAS TORRENCIALES
  - VI- INFORMACION DE APOYO PARA EL ESTUDIO LA PROBLEMÁTICA TORRENCIAL EN LA MESETA PATAGONICA
  - VII- METODOLOGIA INTEGRADA DE ESTIMACION DE CRECIDAS
  - VIII- MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS MÁXIMAS Y SUS RESULTADOS EN PHMP
  - IX- CONCLUSIONES
- APENDICES
- SIMBOLOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS
- AGRADECIMIENTOS

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CONTENIDOS</b>	1
TABLA DE CONTENIDO	2
I- RESUMEN	6
II- INTRODUCCIÓN	7
III- EL PROBLEMA TORRENCIAL EN PHMP	9
1. El Problema Torrencial en el Contexto Regional	9
1.1. El contexto socioeconómico regional	9
1.2. El entorno físico	11
1.3. Área Temática	13
2. Motivaciones para la investigación de PHMP	13
IV- PROPOSITOS DE LA INVESTIGACION DE PHMP	18
1. Delimitación del problema	18
2. Objetivo - Hipótesis	18
V- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS CONOCIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS EN CUENCAS TORRENCIALES	19
1. Reseña Histórica	19
1.1. La influencia mecanicista	19
1.2. La concepción sistémica	19
2. Algoritmos básicos en procesos hidrológicos	22
2.1. El teorema de transporte de Reynolds	22
2.2. La ecuación de continuidad	24
2.3. Ecuaciones de momentum	25
3. Las inundaciones	26
4. La estimación de crecidas maximas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales	26
4.1. Génesis de las crecidas	26
4.2. La crecida de Diseño o de Proyecto	28
4.3. La Crecida Máxima y el Caudal Máximo probable	30
4.4. Métodos Directos y Empíricos	31
4.4.1. Métodos Directos	31
4.4.2. Métodos Empíricos	31
4.4.3. Selección de Fórmulas Empíricas para el cálculo del caudal máximo (HERAS, 1976)	32
4.5. Métodos estadísticos	39

4.5.1.	Teoría de Probabilidades – Caudales máximos y período de retorno o recurrencia	39
4.5.2.	Hidrología Estocástica	40
4.5.3.	Correlación Hidrológica	41
4.6.	Métodos Hidrológicos o Hidrometeorológicos	41
4.7.	La Modelación	42
4.7.1.	Modelos de simulación de crecidas agregados y distribuidos	43
4.7.2.	Selección de modelos distribuidos físicamente basados	44
VI- INFORMACION DE APOYO PARA EL ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA TORRENCIAL EN LA MESETA PATAGONICA		47
1.	Breve referencia histórica	47
2.	Aspectos geológicos de los paisajes típicos de meseta en la region costera central patagónica	49
VII- METODOLOGIA INTEGRADA DE ESTIMACION DE CRECIDAS		52
1.	Crecidas Torrenciales en Paisaje Hidrico de Meseta ( PHM - Region Patagonica )	52
1.1.	Características físicas comunes. Generales y particulares.	52
1.1.1.	Topografía – Morfología	52
1.1.2.	Suelos y Geología	54
1.1.3.	Cobertura vegetal y superficial	56
1.2.	Infraestructura	57
2.	Clasificación de los Sistemas y Sub-Sistemas Hidrológicos Básicos o Unidades de Estudio Hidrológico (UEHs)	60
2.1.	Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT)	60
2.2.	Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT)	61
2.3.	Sistemas Hidrológicos Mixtos	62
2.3.1.	Sistema Hidrológico Mixto Típico ( $SHM_{TNT}$ )	62
2.3.2.	Sistema Hidrológico Mixto No Típico ( $SHM_{NTT}$ )	62
2.3.3.	Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Cuasi-Endorreico ( $SHM_{CE}$ )	63
2.3.4.	Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Lagunar Encadenado ( $SHM_{LE}$ )	67
2.3.5.	Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Atípico ( $SHM_{AT}$ )	68
2.4.	Sistemas Hidrológicos Complejos (SHC)	71
3.	Procesos Hidrológicos y Clasificación de Sistemas	73
3.1.	U.E.H. general	74
3.1.1.	Principio de continuidad	74
3.1.2.	Ecuación de momentum	76
3.2.	Procesos Hidrológicos en un SHT	77
3.3.	Procesos Hidrológicos en un SHNT	78

<b>Almacenamiento-Inundación</b>	79
3.4.    Procesos Hidrológicos en PHM	79
4.    La selección del método de cálculo, en PHM	82
4.1.    La finalidad del estudio	82
4.2.    La Información Técnica	84
4.3.    La certidumbre y calidad de resultados	86
<b>VIII- MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS MÁXIMAS Y SUS RESULTADOS EN PHMP</b>	89
1.    Modelo GAIMAN-TORDISE	89
1.1.    Reseña histórica.	90
1.2.    Requisitos y capacidades del modelo GAIMAN	92
1.2.1.    Aspectos físicos	93
1.2.2.    Aspectos climáticos	93
1.2.3.    Aspectos funcionales	94
1.3.    Componentes de modelado	94
1.4.    Submodelos y algoritmos básicos de cálculo a nivel de UEH	95
1.4.1.    Balance hidrológico - Lluvia Neta	95
1.4.2.    Distribución de la Precipitación (P)	96
1.4.3.    Retenciones Superficiales (Z)	98
1.4.4.    Infiltración (I)	99
1.4.5.    Cálculo del Caudal parcial aportado por la UEH en el período de cálculo	101
1.4.6.    Propagación de Q en el período de cálculo, desde la UEH al Punto de síntesis de la cuenca C	101
1.5.    Nidos de Tormentas, programa TORDISE	105
1.6.    Calibración	106
1.7.    Resultados de simulación GAIMAN TORDISE	109
1.8.    Comparación de resultados (Modelo HEC HMS)	111
1.9.    Embalses y depresiones: Modelo PRESAS	113
2.    Modelo Distribuido “PIXEL”: Formulación conceptual	113
<b>IX- CONCLUSIONES</b>	122
1.    Conclusiones	122
2.    Sumario de Contribuciones	122
3.    Trabajos futuros	123
<b>APENDICES</b>	124
1.    Modelo de Simulación Lluvia- Caudal GAIMAN. Simulación Cañadón Baraibar, en ruta 25., Gaiman, Chubut. Entradas (Variables y Parámetros, Salidas	124

2.	Modelo de Simulación Lluvia- Caudal HEC HMS. Simulación Cañadón Baraibar, en ruta 25., Gaiman, Chubut. (Comparación de resultados con modelo Simulación lluvia Caudal GAIMAN)	138
3.	Modelo GAIMAN: Aplicaciones	142
3.1.	Refacciones y mejoras al sistema de presas Cañadón del Parque Industrial de Trelew (PIT).	142
3.2.	Cuenca aluvional area dique ameghino a boca toma – virch (DBT)	150
4.	Cañadón Baraibar, Gaiman: Información accesoria	154
	SÍMBOLOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	156
1.	GLOSARIO	156
2.	BIBLIOGRAFIA	158
2.1.	BIBLIOGRAFIA CITADA	158
2.2.	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	160
3.	INDICE DE CITAS	164
	AGRADECIMIENTOS	165

## I- RESUMEN

Este trabajo de investigación, centra el análisis hidrológico en el problema torrencial de paisajes de Meseta y ambientes propios de clima semiárido, en la Región Central de la Patagonia Argentina. En su desarrollo, procura estudiar y aportar nuevos conocimientos sobre esta problemática tan particular de la región, y propone una metodología integrada para la estimación de crecidas máximas.

A partir de la observación regional del paisaje hídrico de meseta, la investigación profundiza en los aspectos hidrológicos que la diferencian o asemejan a problemáticas similares en los dos paisajes básicos, la montaña y la llanura.

Conocidos los patrones comunes de estímulos y respuestas hidrológicas, se caracterizan sus componentes y se propone una clasificación que facilita la selección de métodos de transformación de la lluvia en escorrentía superficial, con la finalidad de ordenar en una metodología integrada la técnica o conjunto de técnicas que adecuen y mejoren el procedimiento de cálculo, reduzcan la incertidumbre del resultado y den mejores soluciones al cálculo del problema torrencial.

En su desarrollo, se abordan las principales ideas, organización de la información, pasos y secuencias, modelos de aplicación, discusión, comentarios, que enmarcan la investigación y su método científico, aplicado en este caso a la resolución del problema de la hidrología en la determinación de los caudales máximos en paisaje hídrico de meseta.

Palabras clave: Hidrología superficial; mesetas; crecidas máximas; torrentes; Patagonia; Valle Inferior Río Chubut

## II- INTRODUCCIÓN

El problema torrencial en las zonas de meseta de la región Patagónica, y de su zona de contacto con los valles de Ríos y Arroyos, adquiere particularidades que la distinguen de la problemática hidrológica de cuenca de montaña y de área de llanura.

Si bien el ambiente semiárido habla de un reducido módulo pluviométrico, suelen ocurrir eventos meteorológicos extraordinarios que, con escasa frecuencia, activan sistemas hídricos de gran potencialidad torrencial.

El crecimiento de asentamientos poblacionales urbanos y rurales en valles y zonas deprimidas, de infraestructura vial y rural, o de actividades productivas, presentan cada vez más vulnerabilidad al problema torrencial. En muchos problemas de gestión y manejo del agua y de diseño y cálculo de obras hidráulicas y civiles, se necesita evaluar la actividad torrencial con las particularidades de estos sistemas, y determinar los caudales máximos de sus crecidas para definir las condiciones de contorno que delimitan el problema.

El escaso conocimiento y difusión que se tiene de esta conformación hidrológica, interviene como un factor más en la falta de previsión y planificación y frente a la progresiva antropización del paisaje por el desarrollo humano.

Esta investigación, partiendo de la observación y experiencias realizadas en un paisaje particular de la Provincia del Chubut, trata del estudio de la fenomenología torrencial y de la estimación de crecidas máximas en pequeñas y medianas unidades hidrológicas propias de las zonas de meseta y del clima semiárido, con poca o nula información hidrométrica.

En su inicio, el trabajo analiza distintos aspectos del contexto socioeconómico regional, el entorno físico, el área temática, y las motivaciones del tema elegido que llevan a definir los objetivos y la delimitación del problema que se investiga. El propósito, es desarrollar una metodología integrada apoyada en procedimientos, técnicas y herramientas para la caracterización hidrológica de crecidas y la determinación del caudal máximo.

Para abordar el tema, se efectúa primero un análisis de los métodos y procedimientos conocidos para la determinación de caudal máximo en cuencas torrenciales. Se destaca la revisión de las definiciones de sistemas hidrológicos y su evolución, que permiten no solo diferenciar paisajes de montaña y de llanura, sino sus diferencias y semejanzas hidrológicas con el paisaje de meseta.

El análisis sistémico, y los algoritmos conocidos del teorema del transporte, la ecuación de continuidad y de momentum aplicado a sistemas hídricos, facilitan el desarrollo de la investigación propuesta.

La consideración de las distintas expresiones para la determinación del hidrograma unitario, de la estimación de caudales máximos y de simulación hidrológica, permiten discernir y opinar sobre la conveniencia del uso de procedimientos y técnicas más convenientes frente a un caso sometido a investigación.

Una mención especial, merece la nueva generación de modelos hidrológicos distribuidos, físicamente basados, surgidos de la expansión en capacidad y velocidad de manejo de la información por la computadora personal de los últimos años.

Completa la revisión, una selección de información de apoyo al trabajo, con énfasis en estudios de carácter regional.

El trabajo, avanza en caracterizar los ambientes sometidos a investigación, y establecer semejanzas y diferencias con la problemática de llanura y de montaña, para proponer nuevas sub-clasificaciones hidrológicas de sistemas mixtos. Los PHM, paisajes hídricos de meseta, presentan componentes *típicos* y *no típicos*, y también sub categorías *mixtas*. Los sistemas mixtos, admiten a su vez modelados cuasi endorreicos, lagunares, atípicos, y complejos, cuya comprensión facilita la investigación torrencial.

El análisis de los procesos hidrológicos para cada clase, lleva a un mejor planteo y selección del método o procedimiento de cálculo de los caudales máximos. La investigación, avanza en la discusión de estos métodos y procedimientos y propone criterios para la mejor selección basados en la *finalidad*, la *información técnica* y la *certidumbre* de los resultados.

Finalmente, se desarrolla un modelo de tipo agregado para el estudio de caudales máximos con las experiencias y resultados obtenidos, el modelo *GAIMAN*, originado en el cañadón Baraibar de la localidad homónima a principios de la década de 1980. Este modelo fue muy utilizado en una diversidad de investigaciones y estudios aplicados y obras hidráulicas construidas. Complementariamente, se introduce a los procedimientos de los modelos hidrológicos distribuidos con el desarrollo conceptual de un sistema compuesto de aplicaciones o programas múltiples, el modelo *PIXEL*, para el desarrollo de mapas de inundabilidad y torrencialidad en PHM.

La investigación, concluye proponiendo nuevos conceptos y procedimientos para el análisis de torrencialidad en *paisajes hídricos de meseta*, particularmente relevantes en la caracterización aluvional de pequeñas y medianas unidades hidrológicas en la región Patagónica (PHMP).

### III- EL PROBLEMA TORRENCIAL EN PHMP

#### 1. EL PROBLEMA TORRENCIAL EN EL CONTEXTO REGIONAL

La región patagónica, entre la cordillera y el océano Atlántico presenta los paisajes típicos de *costas*, de *montañas* y *valles*, y de extensas *mesetas* (Fig. N°: 1). A excepción de una delgada franja cordillerana, de alta pluviosidad orogénica, las precipitaciones níveas o de lluvias disminuyen abruptamente hacia el Este, con medias anuales reducidas y propias del clima semiárido (Fig. N°: 2, Fig. N°: 3). La fuerte variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones caracteriza también a la distribución de los excesos superficiales, sus cursos y cuerpos de agua. Sin embargo, esta escasez de lluvias en la meseta y en la región costera contrasta con la existencia de eventos meteorológicos extraordinarios, de baja frecuencia, pero que producen descargas superficiales importantes y le confieren potencialidad torrencial a sus cuencas.

Esta investigación, observada en un paisaje particular de la Provincia del Chubut pero que caracteriza a grandes extensiones de su superficie y de la meseta patagónica en general, trata de la estimación de crecidas máximas en el estudio de la fenomenología torrencial. En especial, se analizan las experiencias en la región del Valle Inferior del Río Chubut, cuyos aspectos más relevantes de la problemática hídrica aluvional se reúnen en un reciente trabajo del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (Serra, 2000; Serra et al, 2002a).

Seguidamente, se analizan aspectos del contexto socioeconómico regional, el entorno físico, el área temática y las motivaciones del tema que llevan a definir los objetivos y la delimitación del problema que se investiga.

##### 1.1. EL CONTEXTO SOCIOECONÓMICO REGIONAL

Chubut, una de las provincias de la Patagonia Argentina, está ubicada al sur, entre los Paralelos 42 y 46. Al Este, delimita con la costa marítima (Océano Atlántico) y al Oeste, las altas cumbres de la cordillera de los Andes la separan de la República de Chile.

Su economía, destaca la explotación petrolera y sus derivados. También la pesca en nuestra plataforma marítima continental, la producción de los parques industriales textiles, mecano-metalúrgicos y pesqueros de Trelew, Comodoro Rivadavia, Puerto Madryn. La explotación ganadera extensiva -ovino en mayor medida, también bovino, caprino- y de enclaves agropecuarios como el Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh), los valles de Sarmiento y 12 de Octubre en Trevelin, o la creciente actividad turística, son entre otras las principales actividades productivas.

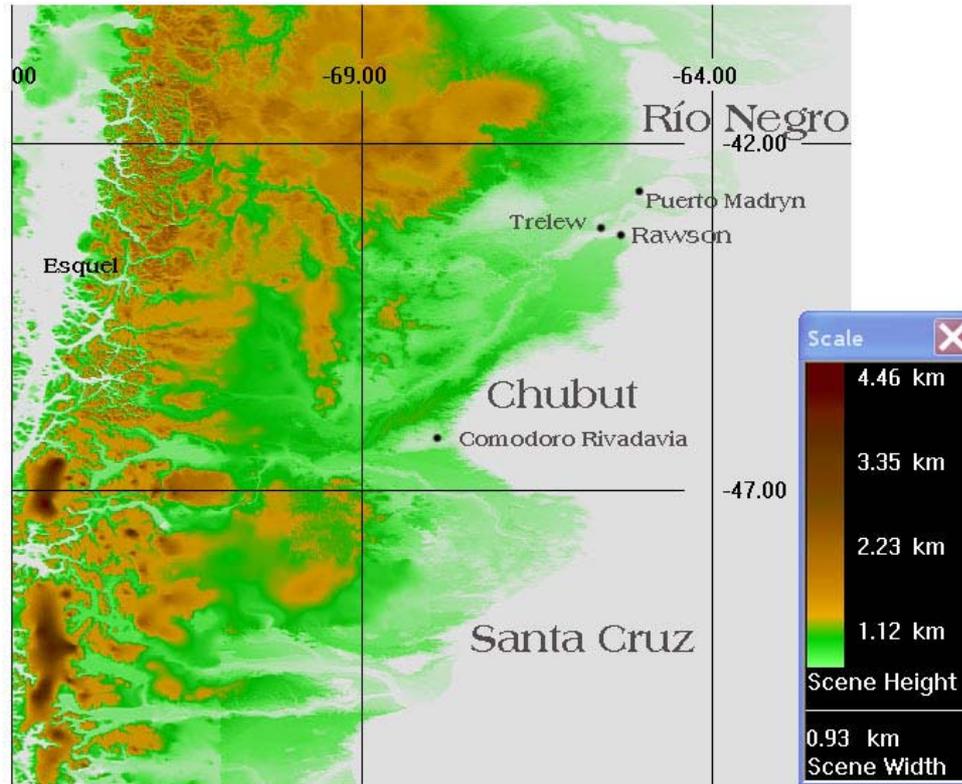


Fig. N°: 1. Chubut y la Región Central de la Patagonia Argentina: Los tonos verdes o claros corresponden con áreas de meseta.<sup>1</sup>

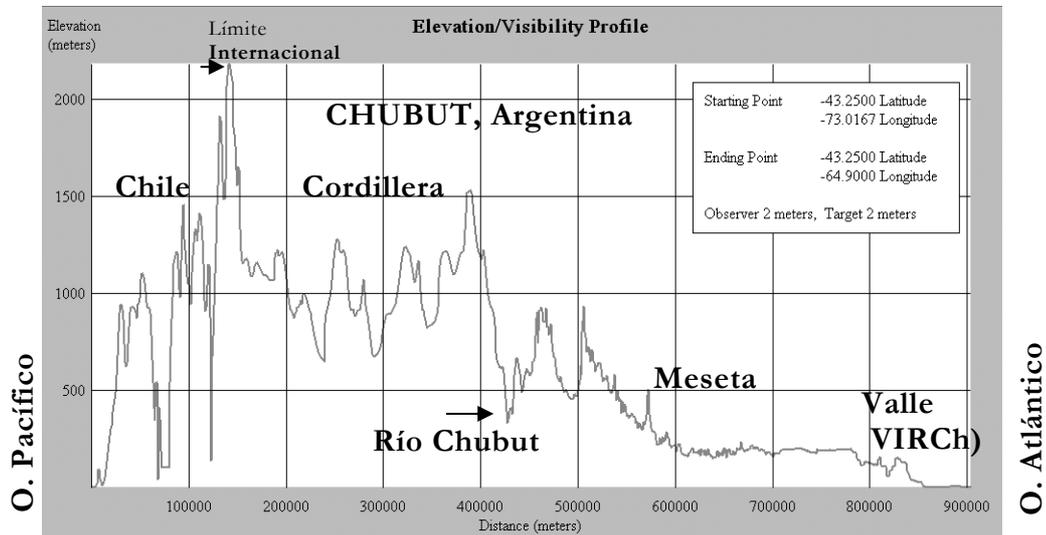
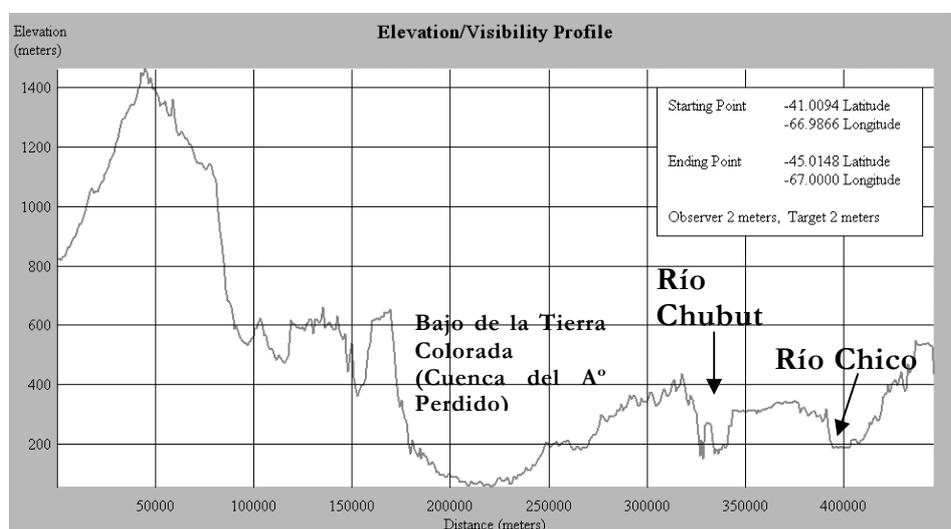


Fig. N°: 2. Perfil topográfico de Oeste a Este (Latitud 43° 15' S), entre ambos océanos, incluido Chile. A la izquierda, el Pacífico, luego las más altas cumbres. A la derecha, con alturas menores a los 500m s/n/m, se observan mesetas que se extienden por 400km

<sup>1</sup> Ref.: National Imagery and Mapping Agency (NIMA), Digital Elevation Model, 3DEM program

La densidad poblacional es muy baja, -apenas supera el orden de 1 Hab/Km<sup>2</sup>- y su economía se distribuye fuertemente concentrada en pocas ciudades y localidades del interior. Aunque estas localidades en las últimas décadas han sido expulsoras de población con una fuerte migración de jóvenes hacia los polos urbanos.



**Fig. N°: 3.** Perfil topográfico Norte-Sur, Meridiano 67° entre el paralelo 41° y 45°. Se destacan el gran Bajo de la Tierra Colorada, depresión final de la gran cuenca endorreica del A° Perdido y A° Telsen. A la derecha, los cañadones del Río Chubut y Río Chico pocos km al oeste del Dique Ameghino.

## 1.2. EL ENTORNO FÍSICO

Una de las características del riguroso clima patagónico son los fuertes *vientos predominantes del oeste*, y su rafagosidad. Estos vientos se cargan de humedad en el océano pacífico y constituyen la fuente principal de precipitaciones, cuya génesis orogénica, se aprecia en el marcado gradiente Oeste-Este de sus isoyetas. Las lluvias y nevadas dejan la mayor pluviosidad en las estribaciones montañosas orientales de Chile y nuestra alta cordillera, para disminuir fuertemente en pocos kilómetros al Este. Así, en las regiones de las altas cumbres de la cordillera Chubutense se tienen módulos pluviométricos que superan los 3000mm anuales. Mientras que en Esquel, a 30km de estas cumbres se tienen precipitaciones medias de 600mm y en Tecka, a menos de 100km en línea recta, no supera los 200mm anuales.

Estos vientos continúan secos hacia el Este, y caracterizan la reducida pluviosidad de la meseta y la costa. Solo fenómenos extraordinarios pueden extenderse con lluvias y nevadas generalizadas que alcancen la costa atlántica, a causa de grandes centros de baja presión en el Pacífico Sur y en cercanías de la costa Chilena.

Hoy, el mayor conocimiento que se tiene de la influencia de la *Corriente del Niño* y de ciclos meteorológicos hiper-anales, permite atribuir a este fenómeno la aparición de eventos meteorológicos extremos. Las tormentas extraordinarias que sobrevienen, -en

superposición con las estaciones invierno-primavera- producen las mas grandes precipitaciones níveas y pluvionivales y sus posteriores crecidas de deshielo.

La meseta Patagónica en su región central y costera, es de clima semiárido con precipitaciones medias anuales del orden de 180mm. El paisaje de extensas terrazas, muestra alturas que oscilan desde los 500 m/s/n/m en la precordillera hasta los 20m s/n/m en las cercanías de la costa marítima.

Chubut, -como toda la Patagonia-, posee grandes superficies prácticamente desiertas o semidesiertas cuya actividad casi excluyente es la explotación extensiva de la ganadera ovina. Pese a ello, el impacto erosivo es fuerte. También es fuerte el avance de la desertización por este tipo de actividades, como lo demuestran diversos trabajos del programa de control de desertificación y de recuperación de suelos del INTA. Esta es una característica singular del paisaje hídrico en que se desarrolla esta actividad y en relación con el impacto de las actividades antrópicas.

La morfología de la meseta, tiene en general extensas superficies de suaves ondulaciones que combinan con esporádicos afloramientos rocosos de formas erráticas y quebradas. La erosión eólica es un agente erosivo muy importante en el tallado de las superficies. Como la sístole y diástole del motor de la vida animal, el modelado de estos agrestes paisajes que siguieron a la glaciación tiene por agentes erosivos que energizan su dinámica erosiva a ambos: *precipitaciones-vientos*. Ambos agentes, se presentan en una combinación aleatoria pero con patrones de distribución de *intensidad-duración* marcados por la influencia de períodos estacionales e interanuales.

Sus sistemas de drenajes son generalmente cursos temporarios, fuertemente erosionados, convergentes hacia lagunas temporarias, más o menos encadenadas y ordenadas jerárquicamente hacia sistemas cerrados, o cuasi-cerrados, pero que convergen en años de extrema pluviosidad hacia cursos fluviales o sistemas de orden mayor.

La vegetación que prevalece es la estepa, con presencia de grandes superficies de suelos desnudos a causa de la salinización de las áreas más deprimidas o de la erosión eólica, hídrica o antrópica (ganadería).

Los valles, en su zona de contacto meseta-valle, presentan particularidades geomorfológicas y una dinámica hídrica que la distinguen del paisaje de meseta o típico de valle fluvial.

En los valles, confluyen los cañadones, normalmente sin aguas superficiales pero que ocasionalmente se transforman en torrentes con aportes de excedentes hídricos pluviales que drenan desde la meseta. Han sido modelados por las más grandes tormentas, que labraron en el tiempo la franja de contacto entre la “meseta” y el “valle”. Sus contornos naturales, generalmente bien definidos, son suficientes para interpretar una envolvente de aportes de los excedentes hídricos hacia un punto de

síntesis dado, tal lo explica la definición clásica de cuenca. Sin embargo, los componentes del paisaje interior, su entorno, y muy especialmente sus mecanismos de disipación le confieren en muchos casos características muy similares a la problemática de llanura.

En la meseta, las suaves ondulaciones morfológicas, la mayor indefinición de sus contornos, o la movilidad de éstos por la susceptibilidad a ser erodado por la acción del agua y el viento, hacen que la dinámica hídrica superficial y su problemática se asemejen en muchos casos a la llanura.

Se suele preferir utilizar para referenciar a estos ambientes el término de Unidades de Estudio Hidrológico (UEH), donde pueden coexistir sub-unidades hidrológicas que responden al concepto típico de cuenca, y otras, al comportamiento en áreas de llanura. Las crecidas torrenciales en estas pequeñas a medianas UEHs, son de régimen temporario y constituyen una problemática creciente por el uso no planificado de espacios naturalmente inundables. Estos espacios por lo general están fuertemente antropizados, con un gran crecimiento de infraestructura rural y urbana sobre cañadones, en áreas llanas o en depresiones lagunares temporarias.

El escaso conocimiento y difusión que se tiene de esta particular conformación hidrológica interviene como un factor más en la falta de previsión y planificación frente a esa progresiva antropización de estas áreas.

Las consecuencias de esta cultura de la urbanización indiscriminada, no planificada, son la inundabilidad y torrencialidad creciente tanto en zonas urbanas como rurales. Basta citar a modo de ejemplo situaciones críticas en las localidades del Valle Inferior del Río Chubut de Rawson, Trelew, Gaiman, Dolavon, 28 de Julio y de Puerto Madryn, de las que esta tesis tratará de rescatar sus experiencias.

### **1.3. ÁREA TEMÁTICA**

El tema *estimación de crecidas en paisajes de meseta–valle y ambientes hídricos semiáridos*, constituye una particularidad del área temática *hidrología superficial*, de una problemática común de la región central y costera patagónica.

De las experiencias recogidas a lo largo de dos décadas de trabajos e investigaciones, el tema de tesis escogido es un problema de cierta complejidad en unidades hidrológicas que por sus particularidades suelen presentar dificultades de ser resuelto con técnicas y procedimientos habituales de la ingeniería.

## **2. MOTIVACIONES PARA LA INVESTIGACION DE PHMP**

En la región investigada, suele requerirse la estimación de caudales máximos, escorrentías y los niveles y superficies anegables asociados, para la resolución de

problemas de ingeniería o cuestiones de planeamiento del uso de espacios o de cuestiones ambientales.

Las ciudades patagónicas en general, -y la región del Valle Inferior del Río Chubut en particular, -donde se concentra la mayor parte de las experiencias de estos estudios-, se caracterizan por el fuerte índice de crecimiento poblacional<sup>2</sup>, y consecuentemente, de su infraestructura urbana y rural asociadas.

En áreas urbanas, ese ritmo de crecimiento es agravado por el déficit en las políticas públicas de asignación de recursos y medios adecuados para un correcto planeamiento previo y de restricciones de uso de los espacios inundables. Se suele acometer primeramente el desarrollo de barrios de viviendas. Posteriormente, el de la infraestructura de servicios que tardíamente, debe resolver además de los problemas inherentes a su objeto el de impactos negativos no esperados y generados por la obra barrial.

Es habitual por ejemplo, observar la construcción de grandes extensiones de barrios de viviendas en zonas inundables o de aguas correntosas, en lugares tales como lagunas temporarias, meandros abandonados, cauces de torrentes temporarios (cañadones), riberas y valles de Ríos.

En zonas suburbanas y rurales, estos problemas también se manifiestan por la creciente infraestructura vial y en menor medida de viviendas.

Tal problemática, constituye uno de los principales problemas hídricos que padecen las poblaciones, con inundaciones o situaciones de emergencias hídricas cada vez más frecuentes. Ciudades como Trelew, son el paradigma de esta afirmación, donde además de los permanentes problemas en lluvias de escasa relevancia, ha soportado situaciones de emergencia hídricas extremas:

- En Mayo de 1992, una creciente extraordinaria causada por fuertes lluvias de larga duración en el cuenco inferior del Río Chubut, produjo importantes desbordes al valle de inundación, venciendo las obras de defensa y anegando grandes superficies de populosos barrios.
- En Abril de 1998, una tormenta excepcional, -234mm en 54 hs, que duplicó el registro de lluvia máxima diaria histórica-, provocó crecidas en los cañadones urbanos y la inundación abrupta de numerosos barrios y del casco céntrico de la ciudad.

---

<sup>2</sup> La tasa de crecimiento poblacional para la Provincia del Chubut ha disminuido sensiblemente (1,35% anual), pero continúa siendo elevada. Esta Tasa se duplica en centros urbanos por la fuerte migración interna desde poblaciones del interior, donde muchas de ellas tienen índices negativos.

- En Marzo de 2000, una tormenta extraordinaria localizada, muy intensa y de corta duración, provocó la inundación de importantes barrios céntricos en la ciudad de Trelew.

Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia, Rawson, Esquel y otras localidades del interior de Chubut y de la región patagónica padecen una problemática similar.

La infraestructura vial, tan particular como necesaria en estas extensas regiones donde la comunicación terrestre resulta vital, también se relaciona con esta problemática. Por un lado, por los problemas que debe resolver en su finalidad de garantizar el tránsito en ocasiones de lluvias extremas. Por otro lado, por el impacto negativo hacia el ambiente hídrico que muchas obras viales causan. Cruces de ríos y arroyos, valles inundables, pampas y cañadones, suelen requerir de soluciones viales, donde los criterios de diseño vial generalmente compiten con los criterios de diseño hidráulico que pretenden un menor impacto en el ambiente hídrico. Por ejemplo, produciendo efectos no deseados como el endicamiento causado por los terraplenes de la calzada, el encauzamiento de cunetas, o la concentración de flujos en puentes y aliviaderos.

Ambos problemas conviven y son inseparables y pueden observarse con mayor o menor impacto en casi todas las rutas patagónicas.

Erosión en pilares y estribos de puentes y alcantarillas, desbordes de estas estructuras, colapsos parciales o generalizados, constituyen un problema común que generalmente se resuelve aumentando algo su geometría hidráulica y elevando mucho más su terraplenamiento.

En tanto, en pampas y valles, los problemas causados por los terraplenes (convertidos en diques no deseados), son causantes antrópicos de la inundación de barrios urbanos y áreas rurales productivas.

Puede afirmarse que la problemática descrita tiene la mayor demanda de estudios hidrológicos. Esta demanda, puede ser para el tratamiento en las etapas previas de estudios de ocupación de nuevos espacios urbanizables, o para obras viales, o bien en el tratamiento preventivo o correctivo del impacto producido por la infraestructura ya existente. Afirmación que se sustenta en los innumerables requerimientos de organismos públicos, municipios y comunas cada vez que ocurre un evento meteorológico de magnitud.

Particularmente, interesa la estimación del *caudal máximo probable* o sus valores esperados para una recurrencia o período de retorno conocido, que constituye el tema principal de esta investigación.

En menor medida, pero no menos importante, resulta necesario conocer el *caudal máximo* en la resolución de problemas en el diseño de obras hidráulicas en general, como canales de riego y drenajes, tomas de riego, pequeños azudes o derivaciones

hidráulicas y obras de control de crecidas, cuyos proyectos requieren el estimador de caudal de diseño.

Problemas similares de la Hidrología, suelen encontrar solución en metodologías clásicas a partir de un estudio hidrológico con mediciones de campo y en un período que puede ser prolongado.

A veces, la falta de presupuesto y la oportunidad de respuesta, dejan en muchos casos fuera de competencia el uso de esta variable en la resolución de un problema dado. Por esto se optan criterios de simplificación en exceso, cuyas consecuencias son el sobre o sub dimensionamiento de obras y el mayor impacto negativo en el ambiente.

Hay casos que pueden abordarse y ser bien resueltos con la información técnica que en general se dispone, más alguna información específica que pueda lograrse en tiempos y costos razonables al objeto del problema a resolver y con las restricciones de precisión en el cálculo que la finalidad del mismo impone.

En ríos y cuencas de importancia, que cuentan con información hidrológica y registros hidrométricos históricos, los problemas hallan solución con la aplicación de métodos convencionales de tratamiento de tipo estadístico.

Pero en pequeñas y medianas unidades hidrológicas se carece generalmente de información hidrométrica. El régimen temporario de bruscas crecidas torrencales muy ocasionales, de corta a mediana duración pero de gran magnitud, agrega dificultad para la medición hidrométrica. Los problemas de estos sistemas, pueden ser resueltos en el marco de métodos convencionales de aplicación para cuencas con *escasez de datos* o *sin datos* hidrométricos, utilizando muchas técnicas conocidas y probadas, como correlación hidrológica con cuencas vecinas, modelos o métodos hidrometeorológicos de simulación tipo *lluvia-caudal* o métodos empíricos.

Sin embargo, el problema de estimar *caudales*, *escorrentías* y *niveles máximos de inundación*, se complica en la resolución de una importante cantidad de problemas regionales, donde por las particularidades del problema, de la información disponible y de las características geomorfo-hidrológicas de sus unidades, la aplicación de métodos o técnicas convencionales pueden presentar limitaciones o restricciones. En estos casos, se requiere una mayor investigación en la selección de técnicas y una metodología integradora a esa finalidad, que sea de aplicación específica para estas unidades hidrológicas.

En el prolongado período de experiencias de investigación y de trabajos realizados, se ha podido comprobar que tales limitaciones y restricciones encuentran factores comunes que caracterizan a determinadas unidades hidrológicas. Son las unidades propias de paisajes de terraza -particularmente en su zona de contacto meseta-valle-, y en ambiente hídrico semiárido.

El área específica de estudios, donde se concentran la reunión de experiencias y trabajos, es el Valle Inferior del Río Chubut y Puerto Madryn y corresponde a la región central–costera patagónica. Por analogía y extensión, la tesis pretende generalizar sus aplicaciones a áreas de meseta similares de la región en que funda sus estudios.

El tema elegido, está motivado en aportar nuevos conocimientos para la gestión de recursos hídricos y manejo de crecidas en zonas patagónicas, particularmente las de meseta. En ellas, el desarrollo y crecimiento poblacional rural y urbano, suele estar acompañado de severas alteraciones al medio ambiente con graves consecuencias socioeconómicas por la irracional ocupación de espacios que son naturalmente torrenciales o anegables. También, está motivado en la capacitación y transmisión de experiencias a profesionales afines para el manejo de técnicas integradas, cuya demanda se manifiesta en la interesante asistencia a cursos dictados sobre algunas de las herramientas aludidas.

## **IV- PROPOSITOS DE LA INVESTIGACION DE PHMP**

### **1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

Un primer interrogante del problema a resolver, se plantea con relación a la identificación de las principales características geomorfo-hidrológicas comunes en el Paisaje Hídrico de Meseta (PHM), -en particular Patagónica (PHMP)-, sus diferencias y semejanzas con problemas típicos de cuencas de montaña y áreas de llanura.

Si las respuestas a tales interrogantes justifican la consideración en particular de PHMP, cabe preguntar por la relación entre los estímulos hídricos del sistema y el modelado. Particularmente, en un ambiente hídrico semiárido y frente al desarrollo de la actividad humana o antrópica.

Si ambos interrogantes hallan patrones comunes de respuesta, con semejanzas y con diferencias en relación al tratamiento del problema en cuencas o en áreas llanas. ¿Cuál es la técnica o conjunto de técnicas, que en su conjunto, proponga métodos y procedimientos integrados que adecuen y mejoren el procedimiento de cálculo para reducir la incertidumbre del resultado y dar posibles soluciones al problema?.

### **2. OBJETIVO - HIPÓTESIS**

Esta tesis se propone profundizar en nuevos conocimientos, seleccionar y adecuar técnicas y proponer una metodología integradora, para estimar crecidas máximas en ambientes de terraza, propios de la región patagónica, con énfasis en pequeñas y medianas unidades hidrológicas y con escasez de información hidrométrica.

No obstante una herramienta dada o parte de ella pudiera ser innovadora, el objeto principal de la investigación, el problema a resolver, no es la herramienta en sí sino la propuesta de reunión en una metodología integrada de métodos y de técnicas y herramientas modernas como forma de resolución del problema y de reducción de la incertidumbre en el cálculo, de la que se espera logre nuevos conocimientos en la disciplina y resulten relevantes y prácticas para su utilidad.

El objeto específico a desarrollar es una metodología integrada, innovadora como tal, apoyada en procedimientos, técnicas y herramientas (innovadoras y no innovadoras), para la caracterización hidrológica de crecidas por lluvias en pequeñas y medianas Unidades de Estudios Hidrológicos (UEHs), en ambientes típicos de zonas semiáridas de la meseta patagónica.

## V- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS CONOCIDOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS EN CUENCAS TORRENCIALES

### 1. RESEÑA HISTÓRICA

#### 1.1. LA INFLUENCIA MECANICISTA

La ciencia de la Hidrología se remonta a la interpretación en la antigüedad del ciclo hidrológico. Pensadores como Homero, Tales de Mileto, Platón, Aristóteles, difundían ya entonces las primeras respuestas a sus interrogantes respecto a la razón de los cursos de agua.

Hidrólogos como Chow (1964), Linsley (1977) y otros, atribuyen a Marcos Vitrubio Pollio, unos 100 AC, la primer referencia a las precipitaciones como causantes de las corrientes superficiales y a Leonardo Da Vinci (siglo XV) quien introdujo la teoría del ciclo hidrológico. Sin embargo, la Hidrología como ciencia, tuvo su gran desarrollo en el siglo XX, ya con el concepto moderno de ciclo hidrológico y la teoría de cuencas.

Hasta hace casi tres décadas, la Hidrología era sólo un pensamiento posible a partir de este concepto, que dio lugar al crecimiento de mediciones, técnicas, cálculos, proyecciones, teorías, que acompañaron el diseño y cálculo de ingeniería de un siglo caracterizado por la construcción de grandes obras hidráulicas. Como todas las “ciencias duras”, tuvo un fuerte impulso bajo la influencia del pensamiento mecanicista de Descartes, Hobbes y otros iniciadores de una filosofía que aún perdura en ellas.

Pero el desarrollo y la industrialización del mundo, trajo consigo la introducción de crecientes problemas ambientales, y con ellos, el del manejo del agua. La cantidad y distribución de las aguas dulces, y su creciente escasez conforme evoluciona la vida humana en el planeta, la contaminación y la interrelación con los problemas ambientales del mundo moderno, fueron introduciendo nuevos problemas en las ciencias hídricas, en un contexto de contemporaneidad con el crecimiento de las ciencias ambientales.

Y nuevos problemas hídricos, encontraron limitaciones de ser resueltos con las teorías existentes, propias del planteo filosófico en que se desarrollaron. Así, la problemática de inundabilidad-sequía en áreas deprimidas, en el contexto de nuevas escuelas de pensamiento, da lugar al nacimiento de la *Hidrología de Llanura*.

#### 1.2. LA CONCEPCIÓN SISTÉMICA

Un sistema, se interpreta como un “conjunto de partes conectadas entre sí que forman un todo”. Chow, (1989), razona así el ciclo hidrológico, como un sistema que puede tratarse

como tal por sus componentes de precipitación, evaporación, escorrentía, y otras variables, donde “*un sistema hidrológico es una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas*”. Agrega luego, que “*una cuenca es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado*”.

En nuestro país, la *Hidrología de Llanura* tuvo una fuerte influencia de la geomorfología francesa y de otras de la disciplina hidrológica como la escuela Rusa. Dos trabajos pueden citarse como disparadores de esa línea de pensamiento, vanguardia en el mundo en la teoría de los sistemas hidrológicos.

Fertonani (1978), introduce dos nuevos conceptos teóricos, de fuerte sesgo geomorfológico, para los sistemas hidrológicos. Por un lado, identifica “sistemas en los cuales la estructura de disipación o de escurrimiento está conformada por elementos *lineales, organizados y jerarquizados*”. A estos sistemas, se los puede “identificar dentro de una porción de espacio o una unidad de comportamiento definida” y se “puede encontrar un punto de relación que exprese la resultante de una conducta intrínseca de los diferentes niveles o estados energéticos que lo conforman”. Estos sistemas, bautizados como “*sistemas hidrológicos típicos*” (SHT), son las comúnmente denominadas *Cuencas*, “una superficie tributaria con relación puntual, en donde los escurrimientos se resuelven en forma más o menos ordenada, según una conducta definida por la jerarquización de sus componentes”.

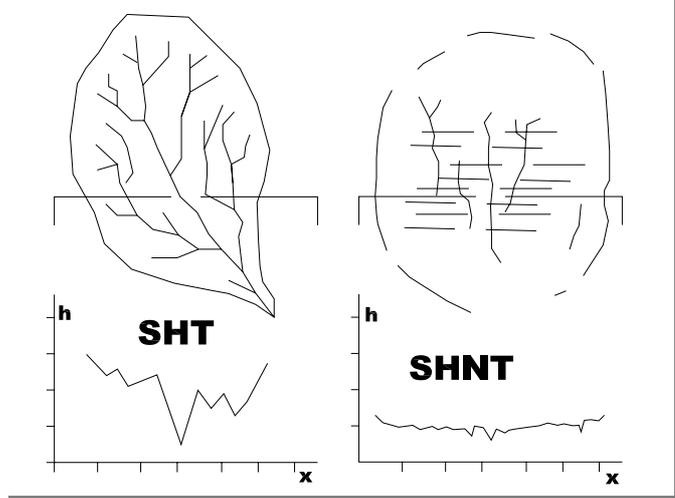
En este concepto moderno de Sistema Hidrológico Típico o SHT, están comprendidos términos de la literatura clásica de la morfología de cuencas en la Hidrología, como la definición dada por Chow, que interpreta siempre la existencia de una sección de control con una única divisoria de aguas, una superficie tributaria y una red de drenaje superficial asociadas.

Queda implícito en este concepto el principio de continuidad del punto de síntesis a que refiere el autor, puesto que en cada punto del interior del sistema le corresponde una envolvente tributaria, en una relación biunívoca.

Fertonani, sostiene seguidamente la existencia de otros sistemas, “en los cuales no se tiene ni la superficie tributaria definida, ni la relación puntual. Sistemas que no cuentan con componentes lineales, organizados y jerarquizados conformando su estructura de disipación (escurrimientos areales, mantiformes)”, a los que denomina *Sistemas Hidrológicos No Típicos* (SHNT) (Fig. N°: 4).

Para el autor, cuando se pretenden introducir aspectos de manejo y control en áreas

**Sistemas Hidrológicos Básicos**  
(Fertonani, Incyth, 1978)



llanas, generalmente se recurre a lo conocido, el concepto de “cuenca”, lo cual implica aislar porciones de espacio recurriendo a divisorias artificiales tales los bordos o terraplenes.

El problema es que por desconocimiento, se transforma a la naturaleza para adaptarla a situaciones conocidas (cuencas) y esto implica en muchos casos un muy difícil control de las reacciones que el paisaje experimenta.

**Fig. N°: 4. Esquema para Sistemas hidrológicos Típicos y No Típicos**

Posteriormente y en la misma línea de pensamiento, un trabajo de la Universidad Nacional del Litoral entre cuyos participantes se destaca el mismo autor citado y que obtiene el primer premio del IX Congreso Nacional del Agua, precisa tales conceptos proponiendo nuevas definiciones:

“Un *Sistema Hidrológico* (SH) es un conjunto de componentes caracterizable mediante variables y parámetros (hidrológicos o no) que interactúan entre sí y con el medio según relaciones funcionales definidas que permiten, conocido el estímulo que se aplica, predecir las respuestas del sistema”. Y define como componentes, a “aquellos elementos físicos, hidrológicos, tales como ríos, esteros y acuíferos, soportados o contenidos por el modelado. Los que pueden cuantificarse mediante las variables que determinan su estado o su relación con otros componentes”.

Para los SH, la definición deja atrás el concepto morfológico clásico e incorpora la dinámica entre el clima y el modelado, entendido como “el conjunto de elementos físicos terrestres (geológicos, morfológicos, edáficos, fitológicos) y la interacción según sus componentes y relaciones funcionales que determinan las respuestas del sistema”.

El trabajo de Caamaño, Fertonani et al, (1979) consolida desde una visión sistémica los conceptos anteriores respecto a los SHT, y agrega que de la confrontación *clima-modelado*, las respuestas a un estímulo importante son esencialmente *no atmosféricas* (excedentes hídricos superficiales, subsuperficiales y subterráneos).

Mientras que para los SHNT, la resolución de los excedentes hídricos no es a través de los escurrimientos sino que encuentra la deformación de sus componentes como respuestas a un estímulo importante, provocando inundaciones, cuyos resultados no pueden ya evaluarse sólo a través de metodologías tradicionales.

Pero además, este grupo de investigadores avanza en la proposición de parámetros hidrológicos que se destacan en la cualificación del análisis de situaciones para las alternancias de *inundación-sequía* en áreas llanas.

Ambos conceptos teóricos propuestos, dan una interpretación académica de los dos sistemas hidrológicos básicos. En la naturaleza, no se encontrarán uno u otro en la pureza de su definición sino en formas combinadas, donde los autores proponen su clasificación conforme la predominancia de las características del sistema principal. En efecto, un paisaje de montaña lleva a sostener su clasificación como SHT, aunque muy posiblemente se encuentren porciones de espacio interiores, de proporciones muy inferiores, que tengan distintos comportamientos.

Los nuevos conceptos propuestos y aprobados por el Congreso Nacional del Agua citado, incorporan profundos cambios en la visión puramente morfológica e hidráulica de hasta entonces en los sistemas hídricos e inician grandes y profundos cambios en las escuelas de formación hidrológica.

Contemporáneamente, la aparición de la computadora –y particularmente de la PC hacia mediados de la década de los '80-, imprime un ritmo vertiginoso al enfoque sistémico de las ciencias hídricas, donde conviven y compiten escuelas de “hidrología matemática”, fuertemente vinculada a las ciencias duras, y de una “hidrología conceptual”, más formada en el intercambio disciplinario con las ciencias naturales y ambientales.

En la actualidad, el uso del ordenador o PC, constituye una herramienta de cálculo del hidrólogo y particularmente de la Hidrología como ciencia auxiliar de la Ingeniería.

## **2. ALGORITMOS BÁSICOS EN PROCESOS HIDROLOGICOS**

### **2.1. EL TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS**

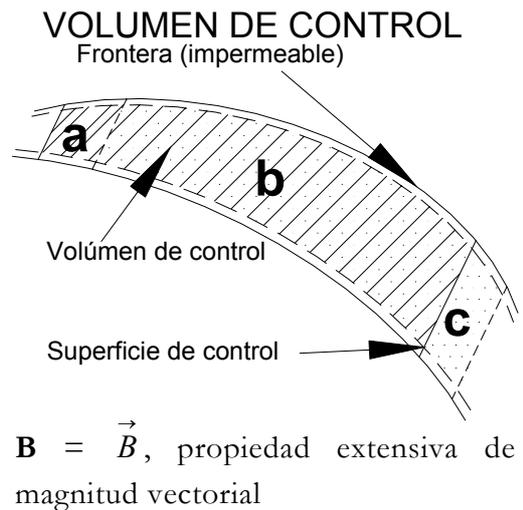
En un sistema hidrológico, los procesos y subprocesos son los responsables de la transformación de la distribución tiempo-espacio del agua. En los procesos hidrológicos, el movimiento depende de las propiedades físicas y de su relación con otros medios presentes.

La *ecuación general de volumen de control* o *Teorema de transporte de Reynolds*, comúnmente usado por diversos autores en textos de Hidráulica -e.g. Chow, (1964, op. cit), Shames, (1967)-, desarrolla las ecuaciones de *continuidad*, *momento* y *energía* en los procesos hidrológicos a partir del análisis por *volumen de control*.

Tal se aplica para la física de las partículas, Reynolds en su estudio de los fluidos propuso el análisis a partir de un volumen de control o porción imaginaria de un tubo de corriente, en la que la superficie que lo contiene se supone impermeable y dentro de la cual circula la corriente de fluido.

Para todos los fluidos –y para el agua en particular-, sus propiedades pueden admitir dos grandes grupos. Un primer grupo, de propiedades que dependen de la *cantidad de masa* presente, o propiedades *extensivas*. Y un segundo grupo, de propiedades intensivas que son las que no dependen de la cantidad de masa presente.

Para Chow (1989, op. cit.), refiriendo a Reynolds, toda propiedad extensiva “B” del fluido, (masa, momentum, energía, masa del vapor de agua), representada por una variable de magnitud escalar o vectorial, puede ser expresada a partir de una propiedad intensiva  $\beta = dB/dm$ . Es decir, de la cantidad B por unidad de masa. Las propiedades extensivas que se analizan son la masa, el momentum y la energía.



*Fig. N°: 5. Esquema para un volumen de control*

En Efecto, en un volumen de control (Fig. N°: 5), para un elemento diferencial  $dB$ , la cantidad de propiedad B puede ser expresada por:

$$(I) \quad B = \iiint_{V.C.} dB$$

Donde B, es una propiedad extensiva cualquiera y  $\beta$  su propiedad intensiva expresada por unidad de masa. La densidad del fluido es “ $\rho$ ”, la masa es “m”; la densidad es  $\rho = dm/dv$ , y “v” es el volumen.

Reynolds en su teorema, relaciona la tasa de cambio  $dB/dt$  de la propiedad extensiva respecto al tiempo. Si se analiza el momentum del fluido B, de magnitud vectorial, será  $\mathbf{B} = m\mathbf{V}$  (donde  $\mathbf{V}$  es la velocidad).

De acuerdo a la ecuación fundamental de la mecánica clásica, la segunda Ley de Newton, la tasa de cambio del momentum respecto al tiempo, será:

$$(II) \quad \frac{d\vec{B}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \sum \vec{F}$$

Las acciones externas en el fluido dada por  $d\mathbf{B}/dt$ , se compone de dos partes. Por un lado, la tasa de cambio de la propiedad dentro del volumen de control. Por otro lado, la transferencia o *flujo neto* a través de la superficie de control, en la frontera del volumen de control

En el interior de este volumen, la cantidad de propiedad B puede ser expresada reemplazando de la siguiente forma:

$$(III) \quad B = \iiint_{V.C.} \rho \, dm = \iiint_{V.C.} \beta \rho \, dv \quad ; \text{ Para la masa de fluido en el esquema, y en los}$$

instantes “t” y “t+Δt”, será:

$$(IV) \quad \frac{dB}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [(B_b + B_c)_{t+\Delta t} - (B_a + B_b)_t]$$

Resolviendo esta expresión, se arriba la ecuación general de Reynolds, que expresa:

$$(V) \quad \frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \beta \rho \, dv + \iint_{S.C.} \beta \rho \, \vec{V} \, d\vec{A} \quad ; \text{ Teorema de Transporte de Reynolds.}$$

El Teorema de Transporte de Reynolds, establece que *la tasa total de cambio de una propiedad extensiva de un fluido es igual a la tasa de cambio de la propiedad extensiva almacenada en el volumen de control (primer término de la expresión integral), más el flujo neto de la propiedad extensiva a través de la superficie de control (segundo término de la expresión integral. Por convención, los flujos de entrada son negativos y los de salida son positivos.*

## 2.2. LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Un principio básico de aplicación a los problemas hidrológicos –como de los hidráulicos- es el de la *conservación de la masa*, del que derivan las ecuaciones de continuidad. Si en el teorema anterior, la propiedad extensiva B es la masa “m”, por la Ley de conservación de la masa será  $\beta = dB/dm = 1$  y  $dB/dt = dm/dt = 0$ .

$$(VI) \quad \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \rho \, dv = - \iint_{S.C.} \rho \, \vec{V} \, d\vec{A} \quad ; \text{ ecuación de continuidad para fluidos.}$$

Es decir, la tasa de cambio de la masa en el interior del volumen de control debe ser igual y de signo contrario al flujo neto a través de la superficie de control. Si “S” es el almacenamiento de fluido en el volumen, el primer término resulta ser la tasa de cambio del almacenamiento dentro del volumen de control,  $dS/dt$ . El segundo término, el flujo neto de masa a través de la superficie, es la diferencia entre los flujos de entradas y salidas, esto es,  $(Q_e - I_e)$ . En la práctica y para un curso de agua, es la

diferencia entre los caudales salientes y entrantes de un tramo dado. La ecuación de continuidad resulta de la conocida expresión de continuidad para flujo no permanente, de densidad constante, aplicable a corrientes de agua:

$$(VII) \quad \frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad ; \text{ ecuación de continuidad flujo permanente y densidad cte.}$$

En el caso de flujo permanente, el primer término de la ecuación (variación temporal) será nulo, y en consecuencia, las entradas igual a las salidas. En la ecuación VI se tendrá:

$$(VIII) \quad \oint_{s.c.} \rho \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad ; \text{ ecuación de continuidad para flujo permanente.}$$

Cuando el total de flujos de entrada y salida se igualan, se dice que el sistema es cerrado, en caso contrario el sistema es abierto. Por ejemplo, el ciclo hidrológico es un sistema cerrado. El ciclo de escorrentía es un sistema abierto, pues una parte de lo que precipita no se transforma en escorrentía.

### 2.3. ECUACIONES DE MOMENTUM

Si el teorema de transporte de Reynolds se aplica al *momentum* o cantidad de movimiento del fluido, la propiedad extensiva B es  $\mathbf{B} = m\mathbf{V}$  y  $\beta = d\mathbf{B}/dm = \mathbf{V}$ . La tasa de cambio del momentum con respecto al tiempo, según la 2da. Ley de Newton, es:  $d(m\mathbf{V})/dt = \sum \mathbf{F}$ .

Reemplazando en la ecuación general de volumen de control, se tiene:

$$\sum F = \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \vec{V} \rho dv + \oint_{s.c.} \vec{V} \left( \rho \vec{V} \right) d\vec{A} \quad (IX) \quad \text{Ecuación integral de momentum en flujo impermanente.}$$

Si el flujo es permanente, el primer término se anula, resultando:

$$\sum F = \oint_{s.c.} \vec{V} \left( \rho \vec{V} \right) d\vec{A} \quad (X) \quad \text{Ecuación integral de momentum, flujo No Uniforme y permanente.}$$

Si además de permanente, el flujo es uniforme, se tendrá que el segundo término es nulo, puesto que las velocidades son constantes en todos los puntos de la superficie de control, es decir,  $\sum F = 0$ ,

### **3. LAS INUNDACIONES**

El estudio de crecidas e inundaciones en cuenca y en área de llanura es uno de los principales temas de estudio de las ciencias hídricas.

Muy profusa es la bibliografía dedicada por Hidrólogos, Hidráulicos e Ingenieros, a los que se suman cada vez más científicos y estudiosos de otras disciplinas de las ciencias naturales y sociales que vinculan la amenaza hídrica, la vulnerabilidad del medio, el riesgo de inundación, ante la creciente ocupación poblacional y de infraestructura en zonas inundables.

Carlos Tucci, en su libro *Hidrología, Ciencia y Aplicación*, (Tucci et al, 1993), dedica un capítulo a la problemática del control de crecientes y sostiene que “cuando la precipitación es intensa en cantidades que llegan simultáneamente al río las crecidas resultantes pueden alcanzar una magnitud que supere la capacidad de drenaje del cauce normal, inundando las áreas ribereñas”. Los problemas de inundación dependen del grado de ocupación de las áreas inundables por la población y de la frecuencia de ocurrencia de las inundaciones. Refiere también -en una lógica muy difundida por diversos autores en las investigaciones y estudios aplicados recientes- a las *Medidas o Acciones Estructurales y No Estructurales en el control de las inundaciones*.

Existe una fuerte tendencia actual a dar cada vez más importancia a las acciones no estructurales y de prevención en el tratamiento de esta grave problemática, como así también a la integración multidisciplinaria en la gestión ambiental de cuencas hídricas.

Para el estudio de ambos tipo de medidas, o para la resolución de muchos problemas de la ingeniería sean simples o complejos, resulta necesario conocer o estimar las crecidas máximas de la unidad hidrológica en estudio. Particularmente, son de interés al tema que se desarrolla los estudios de crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas torrenciales y accesoriamente, de pequeñas a medianas subunidades llanas.

### **4. LA ESTIMACIÓN DE CRECIDAS MAXIMAS EN PEQUEÑAS Y MEDIANAS CUENCAS TORRENCIALES**

#### **4.1. GÉNESIS DE LAS CRECIDAS**

En relación a su génesis, Heras (1976), clasifica las crecidas por su origen pluvial líquido, níveo o mixto, y atribuye para las más grandes a causa de tormentas excepcionales por su intensidad, extensión, duración y repitencia. “Considerados en una larga serie de años, los temporales fuertes, que persisten muchos días en grandes extensiones, parecen reproducirse a intervalos más o menos alejados siguiendo modalidades casi análogas”.

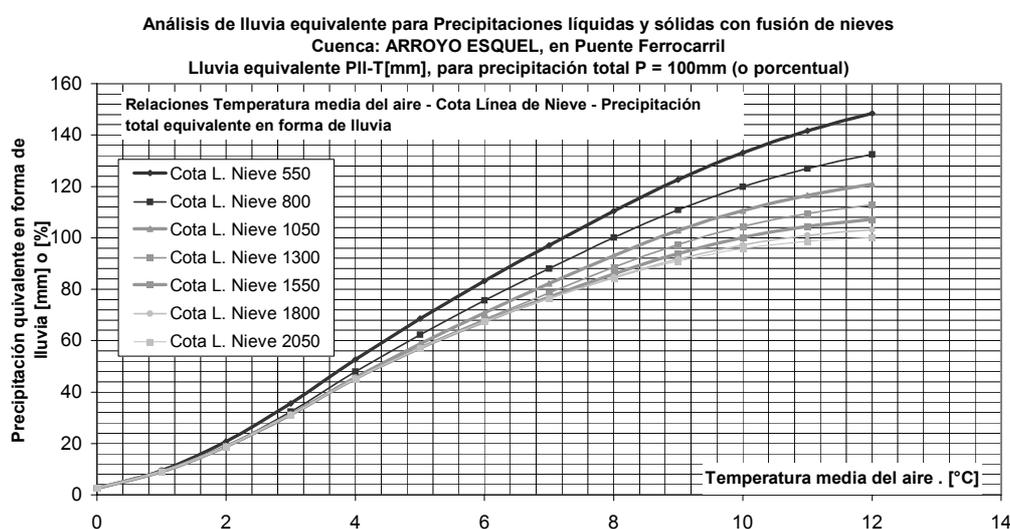
Fuera de estas lluvias generales, los aguaceros tempestuosos y cortos, violentos y muy localizados, producen en las pequeñas cuencas, principalmente de montaña, crecidas “de punta”, cuyos caudales máximos pueden producir efectos importantes en pequeños torrentes, sin influir notablemente en el caudal de los grandes cursos de agua.

La topografía, la geometría de la cuenca, la red de drenaje, condicionan el tiempo de concentración. La temperatura, humedad, cobertura vegetal, permeabilidad del suelo, estación del año, la intensidad y distribución de la lluvia, hacen de una misma lámina de agua caída caudales picos diferentes.

López Cadenas y Perez Soba Baro (1982), incorporan de Munteanu, Gaspar, Cliniciu y Lazar el “Cálculo de caudales máximos de los torrentes”, que caracterizan la génesis del proceso torrencial en lluvias, nevadas y la superposición de ambas formas de precipitación.

Temez, (1978), coincide en esta clasificación sobre el origen de las avenidas, crecidas o riadas, aunque las nivales requieren del tratamiento específico e independiente siendo poco característico del paisaje o entorno de su estudio.

Tampoco se consideran en esta génesis crecidas extra-hidrológicas debida a ondas generadas artificialmente o por rotura de presa.



**Fig. N°: 6. Lluvia equivalente por fusión de nieves, (Serra, 2002b)**

En relación al trabajo y metodología integrada que se desarrolla, el autor (Serra, 2002b), analiza las crecidas máximas en pequeñas y medianas cuencas pluvionivales con escasez de datos hidrométricos, partiendo del análisis para una cuenca de montaña con suficiencia de información hidrológica, la cuenca del Arroyo Esquel en la región central oeste Patagónica. Se deduce de los resultados, que existen cuencas pluvionivales como las del ejemplo, en que una tormenta pluvionival puede generar crecidas de

volúmenes de escorrentía de importancia con picos relativamente altos, pero cuya onda resulta más amortiguada que la producida por una lluvia extraordinaria sobre todo el cuenco sin nieves. Por ello, para la maximización de caudales picos de crecidas será determinante la lluvia caída en el área completa de la cuenca, generalmente en estaciones de otoño o primavera, con menor nieve en los cerros pero con mayores temperaturas (Fig. N°: 6).

De acuerdo al análisis efectuado y sus resultados, para la investigación de la tormenta de diseño y maximización de caudales en pequeñas a medianas cuencas pluvionivales de montaña, cuando hay escasez de datos hidrométricos, se aconseja aplicar como criterio de cálculo la lluvia sintética generalizada en toda la cuenca sobre suelos sin nieve o con escasa nieve depositada. Este criterio, no implica desconocer la importancia de los aportes níveos en la génesis de las crecidas de deshielo, los que en volúmenes de aportes sí resultan importantes.

El procedimiento de cálculo propuesto, se apoya en algoritmos básicos de la física de deshielo. Incorpora al análisis información que hoy es de disponibilidad común en las cuencas de montaña y propone en su desarrollo conceptual un método que arriba a resultados y conclusiones simples sobre la influencia y proporción de la nieve en la composición del caudal pico de una crecida y para una cuenca dada. Este resultado permite incrementar o decrementar el estimador de precipitación máxima a considerar en la simulación hidrológica lluvia caudal.

#### 4.2. LA CRECIDA DE DISEÑO O DE PROYECTO

Chow, define el diseño hidrológico como el “proceso de evaluación del impacto de los eventos hidrológicos en un sistema de recursos hidráulicos y de escogencia de valores para las variables importantes del sistema para que este se comporte adecuadamente”. El diseño hidrológico puede utilizarse para desarrollar esquemas de una nueva estructura, como un dique para el control de crecientes, o para desarrollar programas de manejo y administración para controlar mejor un sistema existente (mapas de inundación).

Sea para el *control del agua* (drenaje, crecidas, contaminación, sedimentos, etc.) como para el *uso del agua* (provisión de agua poblacional, industrial, irrigación, generación hidroeléctrica, reservas, etc), la tarea del hidrólogo es determinar un caudal de diseño al problema a resolver. Puede definirse un *valor límite esperado* (ELV, en inglés), definido como *la máxima magnitud posible de un evento hidrológico en un lugar dado utilizando información hidrológica disponible..* Este concepto está asociado con la *precipitación máxima probable* (PMP, definida por la OMM, Organización Meteorológica Mundial ) y la equivalente *crecida máxima probable* (CMP), que es la crecida máxima físicamente posible en la cuenca.

Por debajo de este límite, se utilizan métodos probabilísticos para estimar la magnitud de eventos hidrológicos cuya frecuencia es conocida y por lo tanto, asociada a un período de retorno dado.

En el diseño hidrológico, es importante conocer las magnitudes de las crecientes a través de parámetros de caudales, volúmenes y elevaciones que definen la *creciente de diseño* o *caudal de diseño*, particularmente útil cuando se trata del diseño de estructuras hidráulicas (vados, alcantarillas, puentes, vertederos, derivaciones, etc.), pero también útiles a la planificación del control y uso del agua.

Para Heras, existen una gran variedad de procedimientos y técnicas para el cálculo de la crecida de proyecto sin que estén hoy estandarizados. La estimación de máximas crecidas tienen mayor importancia en proyectos de presas, por la seguridad de las mismas, y recomienda dos aspectos: el cálculo de la máxima crecida para la estabilidad de la obra y la ponderación de los riesgos consecuentes al establecimiento de la obra aguas abajo de la misma.

En España, la instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas establece desde 1967 que la capacidad total de desagüe ha de calcularse para la crecida de 50 años, y la altura de la presa ha de asegurar un resguardo que permita la laminación de la crecida máxima con retorno de 500 años y su evacuación con los desagües disponibles y para los aliviaderos de la crecida centenaria.

Los autores, motivados por el estudio de ordenación de las cuencas hidrográficas torrenciales, clasifican para el diseño de obras de ordenación el cálculo en un *caudal máximo de cálculo* y los *caudales máximos de verificación*. Los primeros, para evaluar las dimensiones de la obra estudiada. Los de verificación, para obtener los caudales teóricos máximos que deban ser considerados para verificar la obra en estudio.

Munteanu (en López Cadenas y Soba Baro, 1982, op. cit.), clasifica los métodos de estimación de caudales máximos en torrentes, de cálculo o de verificación, en directos e indirectos. Los *métodos directos*, los que se aplican cuando el material hidrométrico es suficiente para el cálculo de curvas de probabilidad. Los métodos indirectos, cuando los datos hidrométricos son insuficientes, faltan o son inciertos. Incluye en estos métodos, las relaciones de generalización, las fórmulas indirectas (empíricas), el método expedicionario (directo), el método de las analogías.

A su vez, clasifica a los métodos indirectos en dos subgrupos. En un primer grupo a las fórmulas empíricas. Un segundo grupo, los métodos genéticos, que determinan el caudal máximo a partir de las precipitaciones y de las características físico-geográficas de las cuencas.

En Rumania por ejemplo, estos autores destacan en este grupo el método de los paralelogramos de escorrentía de Apostol, el procedimiento o diagrama de distribución de la superficie de la cuenca de Gaspar, el diagrama sectorial de la cuenca de Gaspar,

el método de Gologan, el de lluvia horaria de Mustata, o el más conocido y difundido *método racional* propuesto por Stanescu (Tabla Nro.: 1).

<b>Clasificación de Métodos de Cálculo para la crecida de Proyecto</b>	
<b>Rafael Heras:</b>  <b>Métodos de cálculo de la Crecida de Proyecto</b>	Métodos Directos
	Métodos Empíricos
	Métodos Estadísticos
	Correlación Hidrológica
	Métodos Hidrológicos
<b>Munteanu, Gaspar, Clinciu, Lazar:</b> <b>Métodos de Cálculo y Verificación de Caudales Máximos en Torrentes</b>	Métodos Directos
	Métodos Indirectos

*Tabla Nro.: 1. Clasificación de métodos de cálculo de la crecida de proyecto o crecida de diseño*

#### 4.3. LA CRECIDA MÁXIMA Y EL CAUDAL MÁXIMO PROBABLE

Heras propone las siguientes definiciones de uso común en la Hidrología:

*Crecida Anual (CA)*: Igualada o superada, como media, una vez cada año.

*Crecida Máxima Posible (CMPb)*: Máxima crecida que cabe esperar, si se supone la coincidencia total de todos los factores que producirían la precipitación máxima y la escorrentía máxima.

*Crecida Máxima Probable (CMPr)*: Máxima crecida que cabe esperar, teniendo en cuenta los factores condicionantes: geográficos, meteorológicos, hidrológicos y geológicos.

*Crecida Máxima Extraordinaria*: Corresponde a una recurrencia de 100 años.

*Crecidas Excepcionales*: Corresponden a una recurrencia de 500 años.

*Crecidas Catastróficas*: Corresponden a una recurrencia de 1000 años.

En general, definido el caudal máximo de proyecto, los métodos hidrometeorológicos basados en la precipitación pueden proporcionar al proyectista la forma del hidrograma de la crecida de proyecto.

#### **4.4. MÉTODOS DIRECTOS Y EMPÍRICOS**

##### **4.4.1. Métodos Directos**

Heras prefiere reservar la denominación de *método directo* al que consiste en tratar de fijar en un tramo del río suficientemente característico y definido las cotas máximas alcanzadas por las aguas, y calcular a partir de las mismas los caudales producidos.

En el cálculo de caudales máximos de una crecida, la aplicación de los métodos directos no debiera omitirse. Es posible encontrar rastros de fenómenos extraordinarios, tales como alturas alcanzadas por las aguas en tiempos relativamente remotos. Las principales limitaciones de estos métodos es por los errores que pueden producirse, sobretodo si se obtienen resultados muy altos en relación a los medidos. Las variaciones bruscas de la sección del cauce, pendiente longitudinal o variación de la relación nivel-caudal, suelen ser los factores que más error inducen.

Aunque los métodos directos carecen de precisión, suelen dar una buena aproximación al orden de magnitud del caudal máximo buscado.

##### **4.4.2. Métodos Empíricos**

Existe una gran variedad de fórmulas empíricas para determinar caudales máximos de crecidas, de sencilla aplicación y de utilidad para contrastar valores obtenidos por otros métodos. El principal problema es la aplicación correcta de estas fórmulas pues resultan de estimaciones en determinadas cuencas, condiciones y características hidrológicas, climatológicas, geológicas, geográficas. Entre sus principales inconvenientes, además de su rango de incertidumbre o error, sus resultados no relacionan el caudal máximo con el tiempo de recurrencia.

En general, en todas sus expresiones interviene una de las variables más importantes que definen el fenómeno de crecidas de una cuenca: el área o superficie tributaria. Hay dos grandes grupos: fórmulas en las que interviene el concepto de probabilidad y aquellas en las que no interviene la probabilidad. En las expresiones siguientes, se presenta una selección de expresiones conocidas de citadas por Heras para el cálculo de caudales máximos por métodos empíricos:

Creager, Dickens, Fanning, Forti, Fuller, Ganguillet, Gherardelli, Kuickling, Larivaille, Mac Math, Meyer, Oskowski, Pagliaro, Possenti, Quijano, Ryves, Richards, Santi, Scimeni, Turazza, Valenitini, Zapata, López Cadenas.

#### 4.4.3. Selección de Fórmulas Empíricas para el cálculo del caudal máximo (HERAS, 1976)<sup>3</sup>

*CREAGER*

$$Q = 0,55 * C * S^{S^{-0.05}}$$

$$Q = C * 0,018 * S^{0.5} * \left[ \frac{2 - e^{-0,33} * S^{0,3}}{3} * \left( 1 - \frac{\log 0,1 * T}{T} \right) + \frac{\log 0,1 * T}{T} \right]$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>; T, Retorno, en años)

*DICKENS*

$$Q = 6,9 * S^{3/4}$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*FANNING*

$$Q = 2,5 * S^{5/6}$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*FORTI*

$$Q = \left( 3,25 * \frac{500}{S + 125} + 0,5 \right) * S \quad ; S < 1000 Km^2; P \text{ max } 400m$$

$$Q = \left( 2,35 * \frac{500}{S + 125} + 0,5 \right) * S \quad ; P \text{ max } 200mm$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*FULLER*

$$q = (T) = q_1 * (1 + 0,8 * \log T) \quad ; q_1 = \text{media de caudales máximos medios diarios}$$

T = Tiempo de recurrencia, en años

$$Q = q * \left( 1 + \frac{2,7}{S^{0,3}} \right)$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

<sup>3</sup> Rafael HERAS, (1976) "Hidrología y Recursos hidráulicos", CEHyDG, Madrid, España.

*GANGUILLET*

$$Q = \left( \frac{25 * S}{S + \sqrt{S}} \right)$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*GHERARDELLI*

$$q = q_{100} * \left( \frac{S}{100} \right)^{-n} \quad ; 2,8 \leq q_{100} \leq 20,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2$$

$$; 0,2 \leq q_{100} \leq 9,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2$$

$$; n = 0,5 \text{ permeables}; 0,7 \text{ impermeables}$$

(q<sub>100</sub>, Caudal específico de crecida para 100 Km<sup>2</sup>, en m<sup>3</sup>/s/Km<sup>2</sup>)

*GUTMANN*

$$Q = \frac{2832}{96 + S} * S \quad ; S < 3000 \text{ Km}^2$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*GETE*

$$Q = (4 + 16 \text{Log } T) * \sqrt{S}$$

T, Recurrencia, en años

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*HOFFMAN*

$$Q = \frac{3 * S}{(1 + S)^{0,29}} \quad ; S > 300 \text{ Km}^2$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*KRESHIK*

$$Q = \alpha * \frac{32}{50 + \sqrt{S}} * S \quad ; 0,5 < \alpha < 4,5$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*HERAS*

$$Q = \rho_i * e * S \quad ; \rho = \text{coeficiente característico}$$

$i [mm]$  = intensidad horaria de precipitación,

$e$  = coeficiente de escorrentía

$S$  = Superficie de la cuenca, en  $Km^2$

( $Q$ , Caudal Máximo en  $m^3/s$ ;  $S$ , Superficie de la Cuenca en  $Km^2$ )

$\rho$	$i$	$e$	$S$
0,20 - 0,40	10 - 50	0,40 - 0,90	$25 < S < 100 Km^2$
0,15 - 0,35	10 - 40	0,40 - 0,90	$100 < S < 500 Km^2$
0,10 - 0,30	10 - 40	0,40 - 0,90	$500 < S < 1000 Km^2$
0,10 - 0,25	10 - 30	0,40 - 0,80	$1000 < S < 10000 Km^2$
0,10 - 0,20	10 - 20	0,40 - 0,80	$S > 10000 Km^2$

*HERAS :Fórmula resumen*

$$Q = K * S$$

( $Q$ , Caudal Máximo en  $m^3/s$ ;  $S$ , Superficie de la Cuenca en  $Km^2$ )

$K$	$S$
0,80 - 5,00	25 - 100
0,60 - 3,50	100 - 500
0,40 - 3,00	500 - 1000
0,20 - 1,70	1000 - 10000
0,10 - 1,00	> 10000

*HERAS*

$$Q = \alpha * I_p^\beta * S \quad ; I_p = \text{Índice de pendiente} \quad ; S = \text{Superficie, en } Km^2$$

$S [Km^2]$	$\alpha$		$\beta$
	100 años	500 años	
< 25	10 - 60	15 - 70	1,75
$25 \leq S \leq 100$	8 - 50	12 - 60	1,50
$100 \leq S \leq 500$	6 - 30	10 - 40	1,40
$500 \leq S \leq 1000$	4 - 25	7 - 35	1,35
$1000 \leq S \leq 5000$	2 - 20	5 - 30	1,25
$S > 5000$	1 - 10	3 - 20	1,20

*KUICKLING*

$$Q = \left( \frac{1246}{S + 440} + 0,22 \right) * S \quad ; (\text{crecidas ordinarias})$$

$$Q = \left( \frac{3596}{S + 985} + 0,08 \right) * S \quad ; (\text{crecidas extraordinarias})$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*LARIVAILLE*

$$\log q = \lg B + 2,3 \log (\log A - \log S)$$

$$a = \text{Log} A = 4,92 \quad ; b = \text{Log} B = 3,19$$

(q, Caudal específico Máximo en m<sup>3</sup>/s/Km<sup>2</sup>; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*MAC – MATH*

$$Q = K * P * S^{0,58} * i^{0,42} \quad ; S = \text{Superficie en Has}$$

$$P = \text{Máxima Pp [mm], en 24 hs} \quad ; i = \text{pendiente, en milésimas}$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*MEYER*

$$Q = 1,75 * C * S^{1/2} \quad ; 30 \leq C \leq 100$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*OSKOWSKI*

$$Q = m * \lambda * H * S \quad ; H, \text{ Altura media, en m}$$

$$; 1 \leq m \leq 10, \text{ para } 25000 \geq m \geq 1$$

$$; S = 100 \quad m = S$$

$\lambda$ , Coef. morfológico,  $0,017 \leq \lambda \leq 0,80$ , de plano a montañoso

S    1000    5000    10000    25000

      4        3,2        3        2,8

Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*PAGLIARO*

$$Q = \left( \frac{2900}{S + 90} \right) * S \quad ; 20 < S < 1000 \text{Km}^2$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*POSSENTI*

$$Q = \frac{\lambda * H_m}{L} \left( S_m + \frac{S_p}{3} \right) \quad ; H_m = \text{Altura [m], de Máx. Pp. en 24hs}$$

$L = \text{Long. máxima en Km}$  ;  $S_m = \text{parte montañosa en Km}^2$

$S_p = \text{Parte llana en Km}^2$  ;  $700 \leq \lambda \leq 800$  var iando inversamente a  $L$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*QUIJANO*

$$Q = 17 * S^{2/3}$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*RYVES*

$$Q = 8,5 * S^{2/3} \quad ; S > 2000 \text{Km}^2$$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*RICHARDS*

$$Q = \frac{1}{2} \frac{k * i * S}{3,6}$$

$K = \text{Coeficiente de escorrentía}$

$i = H / T, \text{Intensidad media, en mm / hora}$

$H = \text{Altura media de Pp, en mm}$

$S = \text{Superficie de la cuenca en Km}^2$

(Q, Caudal Máximo en m<sup>3</sup>/s; S, Superficie de la Cuenca en Km<sup>2</sup>)

*SANTI* :

$$Q = C * S^2 \quad ; \quad b = \frac{1}{2}, \text{ para } S < 1000 \text{ km}^2$$
$$b = \frac{2}{3}, \text{ para } S > 1000 \text{ km}^2$$

$C = 33$ , para  $T = 100$  años

50, para  $T = 500$  años

66, para  $T = 1000$  años

(Q, Caudal Máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$ ; S, Superficie de la Cuenca en  $\text{Km}^2$ ; T, Retorno, en años)

*SCIMENI*

$$Q = \left( \frac{600}{S + 10} + 1 \right) * S \quad ; \quad S < 1000 \text{ Km}^2$$

(Q, Caudal Máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$ ; S, Superficie de la Cuenca en  $\text{Km}^2$ )

*TURAZZA*

$$Q = \frac{E * H * S}{3,6 * t_c} \quad ; \quad e = \text{Coef. escorrentía}$$

$H[\text{mm}] = \text{altura total máxima de Pp durante un período igual al } T_c \text{ (tiempoconcentración)}$

(Q, Caudal Máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$ ; S, Superficie de la Cuenca en  $\text{Km}^2$ )

*VALENTINI*

$$Q = 27 * \sqrt{S}$$

(Q, Caudal Máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$ ; S, Superficie de la Cuenca en  $\text{Km}^2$ )

*ZAPATA*

$$Q = 21 * S^{0,6}$$

(Q, Caudal Máximo en  $\text{m}^3/\text{s}$ ; S, Superficie de la Cuenca en  $\text{Km}^2$ )

*LOPEZ CADENAS :*

$$Q_{punta} = Q_d * \left( 1 + \frac{2,66}{S^{0,3}} \right)$$

*LOPEZ CADENAS :*

$$Q = \frac{a * p * (42 + 0,525 * S) * S}{(1 + S)(1 + 0,025 * S)(0,5 + \sqrt{S})} \quad ; S < 0,4$$

$$Q = a * p * (12,2 * S + 5,74) \quad ; 0,4 < S < 2,5 \text{Km}^2$$

$$Q = \frac{a * p(42 + 0,525) * S^2}{(1 + S) * (1 + 0,025 * S) * (0,5 + \sqrt{S})^2} \quad ; S > 2,5 \text{Km}^2$$

$$a = \frac{1 - 3 * S_c}{4 * S} \quad ; S_c = \text{Superf. cuenca ondulada en Km}^2$$

$$p = \left\{ \begin{array}{l} 0,75 + (\frac{1}{2}, \text{si pendiente} > 30\%) \\ 1 + (\frac{1}{3}, \text{si pendiente} > 30\%) \\ 1,25 + (\frac{2}{3}, \text{si pendiente} > 30\%) \end{array} \right.$$

$(Q[m^3 / s]; A = \text{Superficie Cuenca en Km}^2)$

#### 4.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

##### 4.5.1. Teoría de Probabilidades – Caudales máximos y período de retorno o recurrencia

Para Heras, los métodos estadísticos, basado en la teoría de probabilidades, permiten por extrapolación estimar la crecida máxima que puede llegar a tener un curso de agua a partir de una serie de caudales máximos conocidos. El cálculo probabilístico de período de retorno se efectúa a través del análisis de frecuencia experimental y la aplicación de una función teórica de distribución de buen ajuste.

Para el análisis experimental, se utilizan diferentes métodos de cálculo de la frecuencia experimental, entre los que se destacan:

Expresión de f, de	f (frecuencia experimental)
California	$i/N$
Hazen (1930)	$(i-0,5)/N$
Kimbal	$(i+1) / N$
Weibull	$i/(N+1)$
Tukey (1962)	$(3 i-1)/(3 N +1)$
Gringorten (1963)	$(i-0,44)/(N+0,12)$
Blou (1958)	$(N-0,375)/(n+0,25)$
Cegodaieu(1955)	$(i-0,3)/(N+0,4)$

*Tabla Nro.: 2. Ejemplos de funciones de frecuencia experimental*

Como funciones teóricas de distribución, para series de valores medios y especialmente para series de valores extremos, hay una diversidad de leyes de frecuencias propuestas que se aplican a problemas hidrológicos (Tabla Nro.: 2).

Entre las funciones de uso tradicional, se destacan la Normal o de Gauss, Log Normal, Gibrat Galton, Gumbel, Log. Gumbel o de Frechet, Pearson III, , Log Perason III, Fuller, Chow. En la actualidad, se de uso común funciones como Valores Extremos Generalizados (GEV), SQRT.

En la selección de la función de ajuste más conveniente, los métodos más usados son los test de comprobación gráfica (visual), test de bondad de ajuste de Chi Cuadrado, Test de Kolmogoroff e índices estadísticos.

Heras, sostiene que debido al número de datos generalmente utilizables, no parece correcto extrapolar a tiempos de recurrencia superiores a 1000 años. Debe calcularse el

hidrograma correspondiente a un tiempo de recurrencia de  $T=100$  años y, a partir de este valor, obtener los coeficientes de seguridad que den los valores del hidrograma para tiempos de recurrencia superiores, en función de las características hidrológicas de la cuenca y del tipo de obra.

Puede además que el proyectista esté obligado o desee aumentar la recurrencia, por razones de seguridad. El criterio económico induce a investigar el mínimo coste global actualizado, construido por los daños provocados en caso de destrucción de la obra y el costo de las obras de desagüe, criterio que puede ser el utilizado para definir la crecida de proyecto de las obras de desvío durante la construcción de la presa.

#### 4.5.2. Hidrología Estocástica

Una de las más antiguas referencias a esta novel disciplina Hidrológica se aprecia en un clásico de la ciencia hídrica contemporánea, “*Hidrología para Ingenieros*”, de Linsley, Kohler y Paulus, (1977, op. cit.).

Linsley sostiene que la mayoría de las series hidrológicas tienen un comportamiento en parte aleatorio y en parte determinístico. En consecuencia, el tratamiento de tales series solamente con la teoría de probabilidades, -al no considerar la secuencia u orden de aparición de cada valor observado de la muestra-, tiene la limitación de no considerar la incidencia determinística de los efectos estacionales o hiperanuales (fenómeno del efecto Niño-No Niño, por ejemplo).

La Hidrología Estocástica o ciencia de “las conjeturas”, es una disciplina moderna en el campo de las ciencias hídricas para el tratamiento de series aleatorias temporales. Esta rama hidrológica ha tomado un gran impulso, particularmente con la incorporación y auge del computador personal, y tiene por iniciadores a Hazen y Sudler, pero se consolida como una disciplina hidrológica con Markov y su modelo Markoviano de primer orden, una función sencilla para la generación de volúmenes de flujo anual en cursos de agua permanentes.

Markov, utiliza la combinación de los estadísticos que definen la componente determinística con la utilización de la técnica de Montecarlo y distribución “t”, para la generación de números aleatorios en el entorno determinístico. Posteriormente, suma a su teoría la generación sintética de caudales (o volúmenes de escorrentías) medios mensuales, incorporando estadísticos estacionales.

$$Q_{i,j} = \bar{Q}_j + \rho_j * \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} * \left( Q_{i-1,j-1} - \bar{Q}_{j-1} \right) + t_i * \sigma_j * \sqrt{1 - \rho_j^2} \quad \text{(XI) Procedimiento de Markov p/ caudales medios a nivel medio mensual.}$$

Donde, Q, es el caudal medio mensual; j, subíndice de estaciones o meses; i, subíndice serial del primer mes al

último;  $\rho_j$ , es el coeficiente de correlación serial entre  $Q_j$  y  $Q_{j-1}$ ;  $\sigma_j$ , el desvío estándar del mes,  $t_i$ , distribución de probabilidades “t” (técnica de Montecarlo) para el mes “i”.

#### 4.5.3. Correlación Hidrológica

Heras, sostiene que cuando por la falta total o parcial de datos de todo tipo no es posible estudiar con cierta garantía la máxima crecida, se puede recurrir a la correlación con los valores de crecidas de cuencas hidrológicamente afines a la estudiada en función de la semejanza de las principales variables, régimen de precipitaciones, extensión de la cuenca, orografía, forma de la cuenca, geología, vegetación, etc.

Para ello, se basa en el estudio de otra cuenca en la que sí existan datos, estableciendo luego los coeficientes de correspondencia entre ambas cuencas y en función de las características hidrológicas y físico geográficas de cada una de ellas.

Un ejemplo, lo constituye la posibilidad de estudiar los caudales de crecidas de una cuenca con escasez de datos hidrométricos y de precipitación, correlacionando con los caudales de una cuenca vecina de hidrometría conocida y características físico hidrológicas similares.

#### 4.6. MÉTODOS HIDROLÓGICOS O HIDROMETEOROLÓGICOS

Para Heras, los métodos hidrológicos, -también llamados indirectos-genéticos por Munteanu (López Cadenas y Soba Baro, 1982, op. cit.), o Hidrometeorológicos en la actualidad-, agrupan aquellos procedimientos que determinan el caudal máximo a partir de las lluvias y las características físico hidrológicas de la cuenca.

Estos métodos tienen su principal sustento en la *Teoría del Hidrograma Unitario*, que diera origen Sherman (1932) con su artículo “*Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method*”.

A partir de entonces toman forma distintas proposiciones de Hidrogramas Unitarios de uso común en la simulación hidrológica: la fórmula racional, el Hidrograma Unitario sintético propuesto por Snyder (1938), el modelo de Williams (1945) -base del modelo HYMO-, el hidrograma unitario triangular.

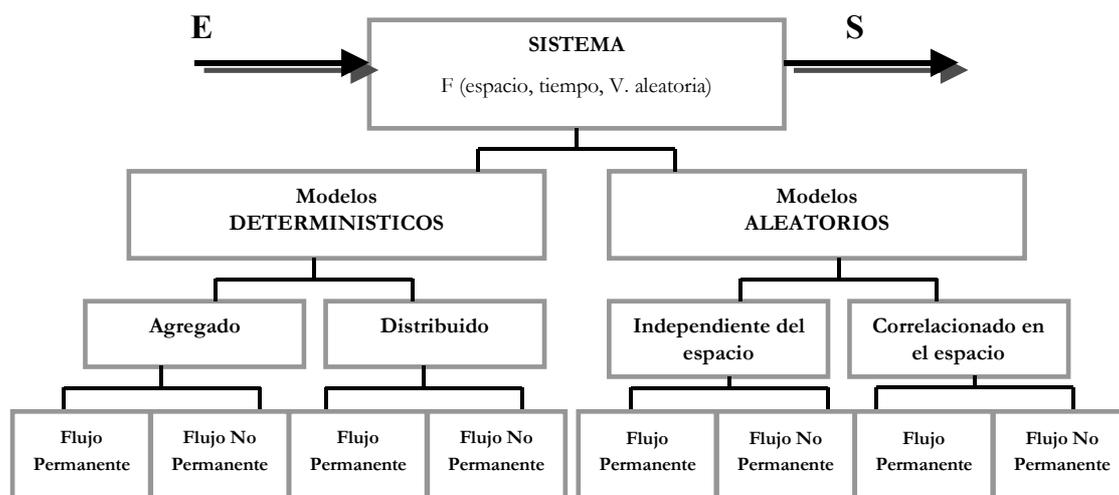
Estos y otros algoritmos de mediados del siglo XX, fueron el punto de partida de la simulación lluvia-caudal impulsada por el fuerte desarrollo informático de las últimas décadas.

#### 4.7. LA MODELACIÓN

Para Chow et al. (1994), hay dos clases de modelos hidrológicos, los *modelos físicos* y los *modelos abstractos*. Los modelos físicos son aquellos que representan a una escala reducida una selección de variables del sistema real. Pueden incluirse en esta categoría los modelos analógicos, basados en la comparación con otro sistema físico, como por ejemplo la representación de un flujo subterráneo por un banco de resistencias.

Los modelos abstractos utilizan las matemáticas para representar variables del sistema real y expresar las relaciones que vinculan las entradas y las salidas. Las variables, pueden ser funciones de tiempo y del espacio o bien ser variables aleatorias o probabilísticas descriptas a partir de su función de densidad (Cuadro Nro.: 1).

El primer grupo de variables no aleatorias, da origen a los “modelos determinísticos”, donde una entrada produce una salida única. Un ejemplo de ello es la modelación matemática de la descarga de un recipiente por un orificio inferior, a través de una relación funcional entre la carga hidráulica y el tamaño y forma del orificio.



**Cuadro Nro.: 1. Clasificación de modelos hidrológicos (Chow, V. T., 1994, op. cit).**

Desde el punto de vista de su variabilidad espacial, los modelos determinísticos pueden a su vez ser “agregados”, si el sistema es promediado en el espacio o considerado como punto único. Diversos cálculos de lluvia-escorrentía consideran a la precipitación, por ejemplo, aplicada uniforme en toda el área. O bien, pueden ser “distribuidos”, donde los procesos hidrológicos se dan en varios puntos del espacio y sus variables son funciones de las dimensiones del espacio.

A su vez, cada uno de estos dos grupos de modelos determinísticos, pueden ser de “flujo permanente” si la tasa de flujo temporal no cambia, o modelos “impermanentes” en el caso contrario. Para el ejemplo anterior del recipiente y orificio, en el primer caso,

ocurre cuando “H”, carga hidráulica es constante y el flujo permanente cuando por caso no se repone agua y la carga desciende progresivamente.

Los modelos estocásticos tienen salidas que son aleatorias o son en parte aleatorias. Por ejemplo, simular la evaporación media diaria, cuya determinación tiene una parte determinística y otra parte importante es aleatoria. Pueden ser independientes en el espacio o correlacionados con él. Y cada uno de estos dos grupos, a su vez puede ser independientes del tiempo o correlacionados con él.

#### **4.7.1. Modelos de simulación de crecidas agregados y distribuidos**

Ponce, (1989) y Chow et al, (op cit., 1994), tratan las diversas clasificaciones de los modelos de simulación de crecidas en la actualidad, y avanzan en consideraciones respecto a los *modelos agregados* y *modelos distribuidos*. Los modelos *agregados* consideran la lluvia aplicada en forma uniforme en toda la superficie de la cuenca, los parámetros de los submodelos son globales y constantes. Los modelos *distribuidos* son de última generación y se expanden por la rapidez de multiplicación de memoria y velocidad de procesamiento de los ordenadores y el desarrollo de los SIG o sistemas de información geográfica. Permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros de los submodelos siendo simultáneo el análisis intertemporal. Hay modelos distribuidos donde se analiza celda a celda y *pseudodistribuidos* en donde la cuenca se divide en pequeñas subáreas o subcuencas con precipitación y parámetros constantes. Son modelos de celda o píxel. Los SIG, constituyen herramientas de gran utilidad para procesar estos modelos de simulación.

Francés. García (1996, op. cit.) cita entre los modelos pseudodistribuidos el TOPMODEL de Beven y Kirby (1979), conectados con Sistemas de Información Geográfica; el KINEROS del U.S. Department of Agricultura (Michaud y Sorooshian, 1994). También el SCS de estos mismos autores, que utiliza el submodelo de infiltración del Soil Conservation Service y la propagación por parámetro de velocidad.

Entre los distribuidos Francés García destaca el modelo OMEGA, el CASC2D, de Colorado State University (Julien et al, 1995), integrado con GRASS; el modelo R.WATER.FEA incorporado a GRASS; también el THALES, de malla triangular irregular para el seguimiento de las curvas de nivel, conectado con MDT TAPES-C, que utiliza el submodelo de Smith y Parlante para el tratamiento de la infiltración.

En relación a la temática de estimación de crecidas en paisajes de meseta y ambiente semiárido, Serra (in litt) formula las bases de un modelo distribuido conceptual basado en VBA que interactúa con IDRISI, y que se describe en el Capítulo VIII.

#### 4.7.2. Selección de modelos distribuidos físicamente basados

##### a. *TOPMODEL*

El TOPMODEL es un modelo hidrológico lluvia-escorrentía de última generación, desarrollado inicialmente en 1989 por el profesor Keith Beven, “Center for Research on Environmental Systems and Statistics, Department of Environmental Science, Institute of Environmental and Natural, Lancaster University, Lancaster”. (Beven y Kirkby, 1979, op. cit.; Beven, 1997).

TOPMODEL es un modelo determinístico, distribuido, físicamente basado, para la predicción y análisis hidrológico a partir de la topografía. El modelo permite simular en 2D los excesos superficiales y los de infiltración que generan el subproceso de escurrimientos en los cauces de una cuenca. Originalmente, tuvo su desarrollo en PC escrito en Fortran 1985, revisado para su distribución en 1993. Hoy, TOPMODEL cuenta con varias versiones de actualización en DOS y Windows.

##### b. *KINEROS*

Este modelo tipo lluvia-caudal fue introducido por Michaud (Michaud y Sorooshian, 1994, op. cit.) y nace del estudio hidrológico en ambientes semiáridos del paisaje de Arizona, Estados Unidos.

Es un modelo distribuido cinemático desarrollado específicamente para regiones de desierto, y puede ser aplicado a cuencas sin datos históricos. El estudio examinó la certeza de KINEROS bajo limitaciones de datos, a partir de registros típicos de climas áridos y fue comparada con el modelo de SCS, obteniendo similares resultados que este modelo básico desarrollado por Soil Conservation Service en 1972. Se han obtenido buenos resultados aún en cuencas con divisorias de aguas débiles.

El estudio también analizó la hidrología de inundaciones engendradas por tormentas en Walnut Gulch. Es fundamental en este modelo la dinámica *espacio-tiempo* de la lluvia y escorrentías que caracterizan la simulación. Las pérdidas principales son evaluadas por infiltración con el método de Hillslope, aunque la hidráulica del flujo, las pérdidas del canal, y la humedad inicial de tierra sean también importantes.

##### c. *CASC2D for WMS*

El modelo hidrológico CASC2D fue desarrollado originalmente por Julien, Saghafian y Ogden, (1995, op. cit), como parte de un proyecto de *Colorado State University* financiado por *U.S. Army Research Office*.

Durante los últimos años, el modelo se ha mejorado significativamente en términos de formulación y de versatilidad. Las últimas mejoras han llevado a convertir el CASC2D a una formulación continua que lo incluye en la serie de modelos hidrológicos WMS (Watershed Modeling System) sostenidos por la Línea Divisoria. Este modelo hidrológico interactúa con el desarrollado por Jones and Nelson at Brigham Young

University. Con CASC2D se obtiene como resultado los hidrogramas de descarga en la salida de la línea divisoria de las aguas, y en algún punto deseado por la red interior de la corriente.

El modelo puede producir también hidrogramas de descarga de sedimentos, separado por arrastre de fondo y en suspensión. CASC2D puede producir varios datos de la salida, inclusive mapas de serie de tiempo de distribución de contenidos de humedad de suelos, superficie de pelo de agua, altura acumulada de agua infiltrada, tirantes de agua en cursos de agua; caudales en cursos de agua, caudales sólidos y sedimentación en cursos de agua (Fig. N°: 7).

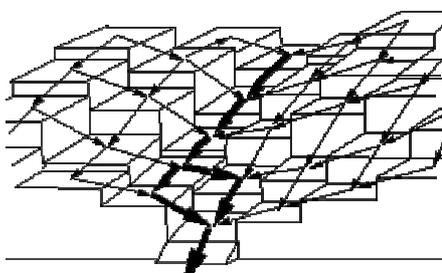
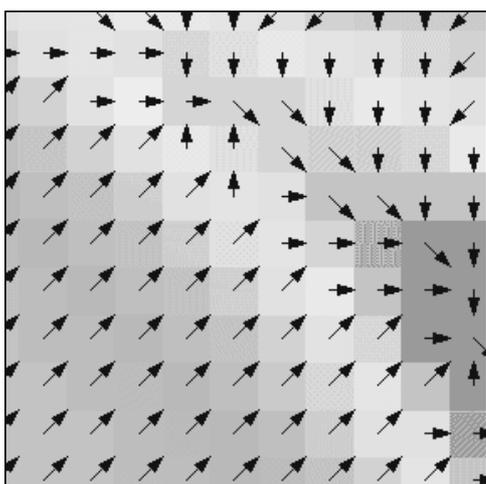


Fig. N°: 7. *Conceptual sketch of CASC2D overland flow routing, y Fred L. Ogden, Ph.D., P.E,* Ogden (1998) en la descripción del desarrollo del CASC2D, lo define como un modelo físicamente basado, de flujo impermanente, parámetro distribuido, raster (de cuadrícula cuadrada), de dos dimensiones. Calcula el exceso de infiltración basado en el subproceso de Horton y simula la respuesta hidrológica de las líneas divisorias de las aguas con sujeción a un campo de la lluvia de la entrada.

Destaca los componentes mayores del modelo que incluyen: la valoración continua de la humedad de tierra, interceptación de lluvia, la infiltración, superficie de agua y escorrentías, pérdidas de suelo por erosión y transporte de sedimentos (Fig. N°: 8).



**Fig. N°: 8. WMS-C, Watershed Modeling System Center**

El desarrollo de CASC2D se inició en 1989 en EEUU. La Oficina (ARO) de Investigación de Ejército financió el Centro para la Excelencia en Geociencia en la Universidad del Estado de Colorado.

CASC2D aprovecha los avances recientes en Sistemas Información de Geográfica (GIS), en sensores remotos, y en el bajo costo. Se pudo comparar los resultados de simulación obtenidos con USACE HEC-1<sup>4</sup>, donde CASC2D ofrece mejoras significativas respecto a la capacidad de HEC-1. Mientras HEC 1 requiere las líneas divisorias de las aguas que se asumen para ser hidrológicamente uniforme, CASC2D

<sup>4</sup> HEC HMS, Hydrologic Modeling System of Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineering.

permite que el usuario escoja un tamaño de cuadrícula que describe apropiadamente la variabilidad espacial.

Además, CASC2D resuelve las ecuaciones de la conservación de masa y energía para determinar la sincronización y el sendero de pérdidas en la línea divisoria de las aguas. Los enfoques más tradicionales, tal como HEC-1, se confían en la conceptualización para el cálculo de las pérdidas.

El enfoque de base física es superior al tratar en detalle (celdas) el proceso de pérdidas en escalas pequeñas y dentro de la línea divisoria de las aguas. Los modelos hidrológicos físicamente basados, son también superiores cuando tratan de predecir la conducta de las líneas divisorias de las aguas. CASC2D acepta la entrada espacialmente variada en resoluciones de 30 a 200m, sin embargo, la incertidumbre de datos de entrada puede tener como resultado una calibración no extraordinaria. CASC2D tiene un gran número de opciones tanto para la entrada de datos como para las salidas de resultados.

#### ***d. PIXEL***

En un proyecto de investigación en desarrollo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Serra (2001) formula en 1999 bases conceptuales para el “*Modelo “PIXEL”, herramientas integradas de última generación en la simulación de mapas de riesgo hidrológico e hidrogramas de crecidas 2D*”. El Píxel es un modelo hidrológico determinístico tipo distribuido, de celdas, programado en VBA, que interactúa con IDRISI, AUTOCAD y VBA en Microsoft Excel.

El modelo, es acompañado de técnicas en IDRISI y AUTOCAD para el procesamiento de vectores y matrices de topografía y otros parámetros de submodelos que intervienen en el proceso de cálculo de maximización de crecidas y que proveen de matrices de datos de celdas al modelo en VBA. Los resultados del modelo en desarrollo, son ordenados en tablas y gráficos EXCEL y devueltos para su presentación en formato IDRISI.<sup>5</sup> Parte del desarrollo conceptual se incluye en el apartado *VII- Metodología Integrada de Estimación de Crecidas*.

---

<sup>5</sup> SERRA, J, MALNERO, A.; Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas En Ambientes Torrenciales Patagónicos: Fundamentos del Modelo <PIXEL>, herramientas integradas de última generación en la simulación de mapas de riesgo hidrológico e hidrogramas de crecidas 2D.; Facultad de Ingeniería, SCyT, UNPSJB, 2000.

## VI- INFORMACION DE APOYO PARA EL ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA TORRENCIAL EN LA MESETA PATAGONICA

El año 1899 fue de verdad “una hija de las tempestades” para la colonia. Se sabía que el valle del Chubut estaba expuesto a inundaciones en tiempos idos, porque se hallaban huellas evidentes de ello en la formación de los antiguos lechos de río y los zanjones que surcaban el valle. Pero se pensaba que al cerrar los boquetes donde ellos salían del río, se podían dominar las aguas del mismo, cosa que siguiera su cauce. No había ningún fundamento a esta suposición. Había inundación en el año 1865, cuando llegó el primer contingente y desde entonces, la posibilidad de ello existía constantemente en la mente de los primeros colonos. A pesar de ello, creían éstos, como lo creyeron los que llegaron después, que bastaría con trabajar para evitar que se repitiera en el futuro. Más, ¡pobre de ellos! Jamás soñaron con la avalancha devastadora que llegó este año. **William M. HUGUES, (1926), “A Orillas del Río Chubut”**

### 1. BREVE REFERENCIA HISTÓRICA

Hasta mediados de la década de 1980, la fenomenología torrencial era un tema hidráulico más dentro de las funciones de organismos estatales patagónicos, como las Direcciones Provinciales de Hidráulica o de Recursos Hídricos.

En la Provincia del Chubut por ejemplo, se crea en 1980 la Dirección General de Recursos Hídricos (DGRH), un órgano central para la atención de la problemática del agua, a partir del cual cobra un fuerte impulso el tratamiento de la problemática aluvional, tanto en zonas de montaña como en la de meseta y de valles fluviales. Constituyó una forma de dar respuesta institucional a los nuevos problemas que se generaban por el fuerte ritmo de crecimiento poblacional, tan característico de la región patagónica. Crecimiento que como se señalara, implicaba una severa antropización de los sistemas hídricos –muchos de ellos torrenciales- en áreas inundables.

Se destacan en ese sentido una diversidad de estudios, proyectos y obras de control aluvional, que impulsaron a su vez el mayor conocimiento del fenómeno torrencial en áreas de meseta. Pueden citarse, por ejemplo, las obras de protección de General Roca en la Provincia de Río Negro, o los realizados por la Dirección General de Estudios y Proyectos (DGEyP) y la Dirección de Obras de Recursos Hídricos e Ingeniería (DORHeI) de la Provincia del Chubut en el período 1982 a 1987, como el canal de protección aluvional sobre el Cerro La Zeta en la ciudad de Esquel, las obras de defensa aluvional en Gaiman, Trelew, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia, y muchos otros trabajos realizados para cuencas torrenciales de meseta, del valle o de la cordillera.

Esta actividad, fue generadora de nuevas experiencias y conocimientos, que se tradujeron en el desarrollo a su vez de nuevas herramientas de diseño y cálculo aptas para el tratamiento de la problemática aluvional.

En ese contexto de experiencias de la temática aluvional y en coincidencia con el surgimiento de la computadora personal, nace en la Dirección General de Estudios y Proyectos el *<modelo GAIMAN>*, un *modelo de simulación lluvia-caudal para cuencas torrenciales en áreas de meseta*. Este modelo, basado en los algoritmos básicos del método de los paralelogramos, tuvo el agregado de discretizar el cálculo en tiempo y espacio, y siendo que las nuevas herramientas de cálculo lo permitían sumó parámetros físicos locales y regionales que caracterizaban mejor a los parámetros hidrológicos locales.

Posteriormente, estas experiencias son tomadas y mejoradas en el Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica (DICH) de la Facultad de Ingeniería y su Programa de Estudios y Proyectos de Obras Hidráulicas y Civiles, y complementadas en un proyecto de investigación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB).

Entre los informes de Proyectos de Investigación de la citada Secretaría de Ciencia y Tecnología, dirigidos por el autor, que con relación a esta temática aportan nuevas experiencias y trabajos en el período 1985-2000 (publicados y sin publicar) se destacan:

- Proyecto de investigación “Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos”, período 1999-2001.
- Proyecto de investigación “Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique-Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut”, período 1995-1998
- Proyecto de investigación "Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut, período 1.992-1995).
- Proyecto de investigación "Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut". Período 1986/90.

Las publicaciones e informes de biblioteca que conforman el material de estos proyectos de investigación constituyen la información de apoyo documental para este desarrollo metodológico del problema torrencial en ambientes de la meseta patagónica.

A estos trabajos de investigación se suman estudios y proyectos de obras de defensa aluvional ejecutados por el mismo director y grupo de docentes investigadores ya citados, entre los que se destacan las obras de control aluvional (presas de laminación de crecidas en cascada), del cañadón del Parque Industrial de la ciudad de Trelew (PIT), de los Cuencos 2, 3 y 4 de la ciudad de Puerto Madryn, de los cuencos del

Cañadón Baraibar en Gaiman y del cañadón Dolavon en la localidad homónima. O también, las obras de defensa aluvional en la terraza al norte de la ciudad de Rawson.

## **2. ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LOS PAISAJES TÍPICOS DE MESETA EN LA REGION COSTERA CENTRAL PATAGÓNICA**

Desde la zona costera hacia el Oeste de la región, Stampone, (1997) detalla en su caracterización geológica, la región del Valle Inferior del Río Chubut y Dique Florentino Ameghino con citas y referencias a trabajos de Malvicini, Llambías, Haller, Lesta y Lápido, entre otros estudiosos de la geología regional.

Stampone describe las Formaciones Geológicas costeras, (formaciones Madryn, Gaiman), las que varían ligeramente hasta que aparecen los afloramientos de las formaciones geológicas más antiguas, hace unos 150 MA.

Las rocas aflorantes más antiguas corresponden a la formación Marifil, del Mesozoico-Jurásico inferior a medio. Son un complejo de rocas volcánicas con rocas piroclásticas, con algunos horizontes cortos sedimentarios con materiales volcánicos de conglomerados y areniscas y sus rocas típicas son las Riolitas y los pórfidos.

Aguas abajo y sobre la traza del valle, aparecen mantos de sedimentitas sobre los mantos vulcaníticos. Entre Trelew y Playa Unión, por ejemplo, este techo rocoso se ha detectado a unos 150 - 155m de profundidad. El espesor total de esta formación fluctúa entre 50 y 300m.

Con el nombre de Grupo Chubut, se designa a los estratos sedimentarios continentales Mesozoico-Cretácicos, que aparecen en afloramientos por encima de las secuencias volcánico-piroclásticas de la Formación Marifil, y son cubiertos por la llamada Formación Salamanca.

Son sedimentos piroclásticos (tobas abigarradas blancorrojizas y areniscas tobáceas rosadas a rojizas). En los afloramientos de esta secuencia aparece como bancos de arcilla limosa castaño oscuro a negro.

Estas areniscas y tobas predominantes suelen presentar lentes de arcillas de cuerpos lagunares y los espesores son del orden de 20 a 30 m.

Del período Cenozoico-Terciario, aparecen fundamentalmente sedimentitas del Paleoceno, (p. ej. Formación Cañadón Iglesias, brazo antiguo del mar Salamanqueano, con ubicación geográfica dentro del Cuenco aluvional del área entre el Dique Florentino Ameghino y el paraje de Boca Toma, en cercanías de la localidad de 28 de Julio). Con la presencia de coquinas de gran tamaño y bancos fosilíferos. Otros, con la presencia de arcillas, areniscas de variada coloración y granulometría, conglomerados. También la Formación Río Chico, con areniscas y pelitas rojizas, con restos fósiles de

origen continental, contienen cemento carbonático y sílice coloidal castaño a verde, en espesores de unos 38m.

En el Eoceno Inferior del Cenozoico, Stampone cita en su estudio la Formación Arroyo Verde descrita por Malvicini y Llambias, constituidas por carbonatitas sedimentarias marinas. Algunos afloramientos aparecen en la zona de Dique Ameghino y está cubierta por los rodados patagónicos. En el Eoceno inferior a Oligoceno superior, refiere a la Formación Sarmiento, o Tobas de Sarmiento, que nomina a un conjunto de sedimentitas continentales de areniscas tobáceas–limoarcilitas, que se disponen sobre la formación Río Chico y cubiertas por depósitos marinos de la Formación Patagonia. Afloran en cercanías del cañadón Villegas, del mismo cuenco aluvional.

En el Oligoceno Superior al Mioceno, se destaca la Formación Patagonia, en las zonas de terrazas del Valle Inferior del Río Chubut. Son sedimentos pelíticos con arenas y poroclásticos (cinerita). Se la divide en Formación Gaiman (más antigua) y Formación Madryn, y contiene abundante fauna marina (Haller, 1981). Los espesores máximos alcanzan 95 a 200m (Fig. N°: 9).

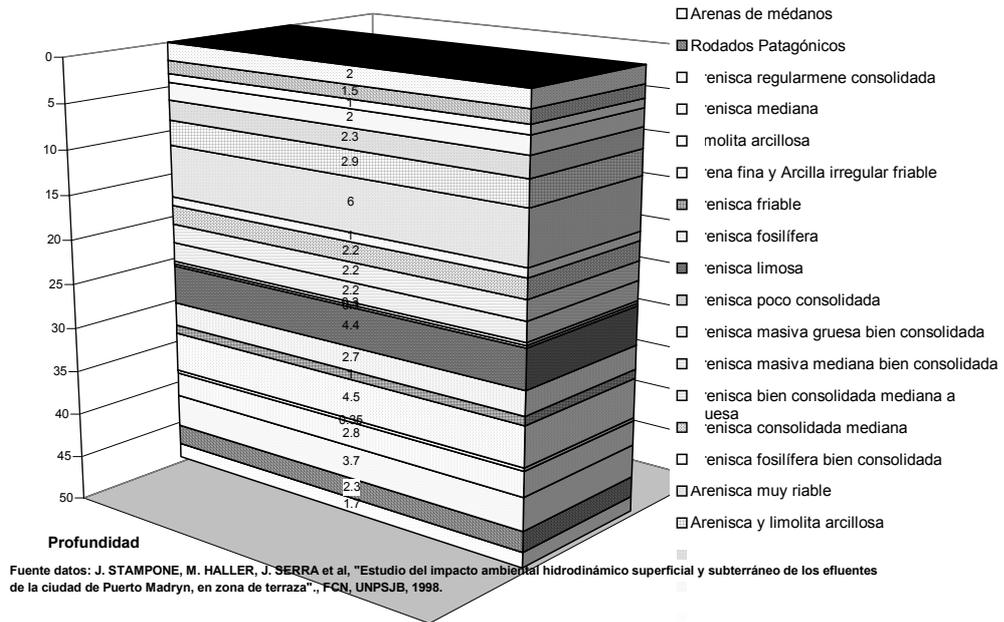
En el Plioceno al Pleistoceno, se cita la Formación de Montemayor, con que se denomina los depósitos de las gravas arenosas, comúnmente conocidas como *rodados patagónicos*. Estratos dominantes en las zonas de mesetas, con potencias de 1,5 a 6m y formados por grava gruesa redondeada o subesférica con matriz arenosa gruesa a fina. En algunos lentes con matriz arcillosa.

En el Cuaternario, se identifican depósitos del haloceno en cañadones y terrazas, que son sedimentos de gravas, arenas finas y arcillas, que ocupan los cauces y llegan a los valles. En bajos y depresiones, se encuentran depósitos aluviales y coluviales pelíticos.

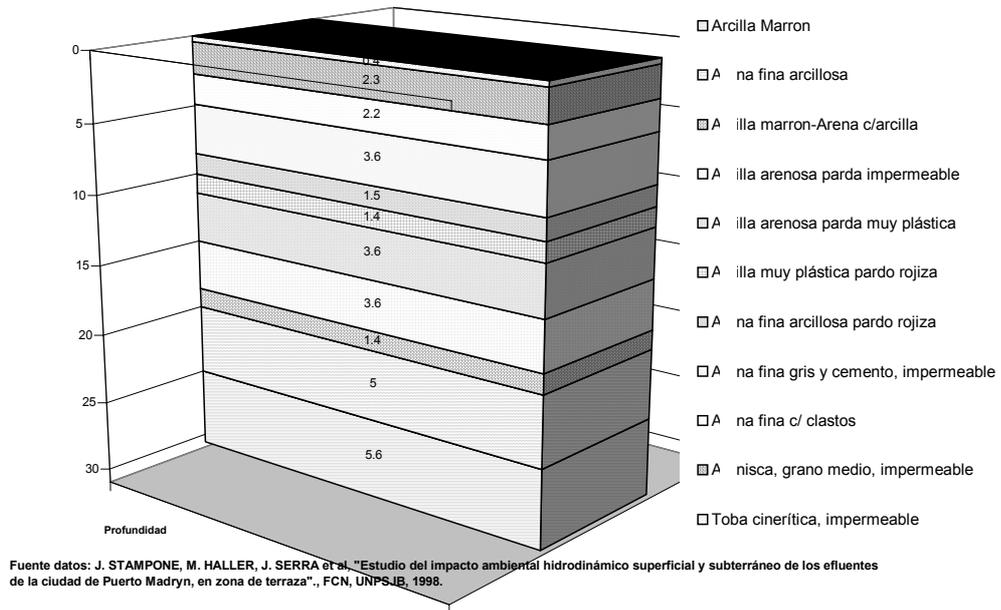
En períodos recientes, se citan los depósitos aluviales, como el Valle Inferior del Río Chubut, particularmente los potentes mantos de la zona quea desde el Dique Ameghino a Boca Toma y que alcanzan un hectómetro de ancho. Los depósitos coluviales son propios de terrazas, por remoción en masa en las bardas. En la composición de la superficie, los depósitos eólicos, de finos psamíticos orientados en la dirección de los vientos predominantes del oeste, son importantes por su extensión y movilidad. A sotavento de la vegetación, estos depósitos pierden movilidad y suelen denominarse depósitos fijos.

En los aspectos geomorfológicos, se destaca el mapa geomorfológico compuesto por el Lic. Gustavo Ichazo, en el marco del citado Proyecto de “Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas en el Valle Inferior del Río Chubut”.

**Región Patagónica costera central - Zona de contacto de costas y meseta**  
**Perfil Geológico Vertical tipo - (Formación Puerto Madryn)**



**Región Patagónica costera central - Zona de contacto de costas y meseta**  
**Perfil Geológico Vertical tipo en Fondo de Laguna en Terraza**



*Fig. N°: 9. Perfil geológico tipo*

## VII- METODOLOGIA INTEGRADA DE ESTIMACION DE CRECIDAS

### 1. CRECIDAS TORRENCIALES EN PAISAJE HIDRICO DE MESETA ( PHM - REGION PATAGONICA )

Para abordar el problema de estimación de crecidas torrenciales en un *paisaje hídrico de meseta (PHM)*, propio de la región semiárida patagónica -o similar-, es necesario investigar para estos ambientes cuales son las principales características geomorfo-hidrológicas comunes, sus diferencias y similitudes con problemas semejantes en cuenca de montaña y en área de llanura.

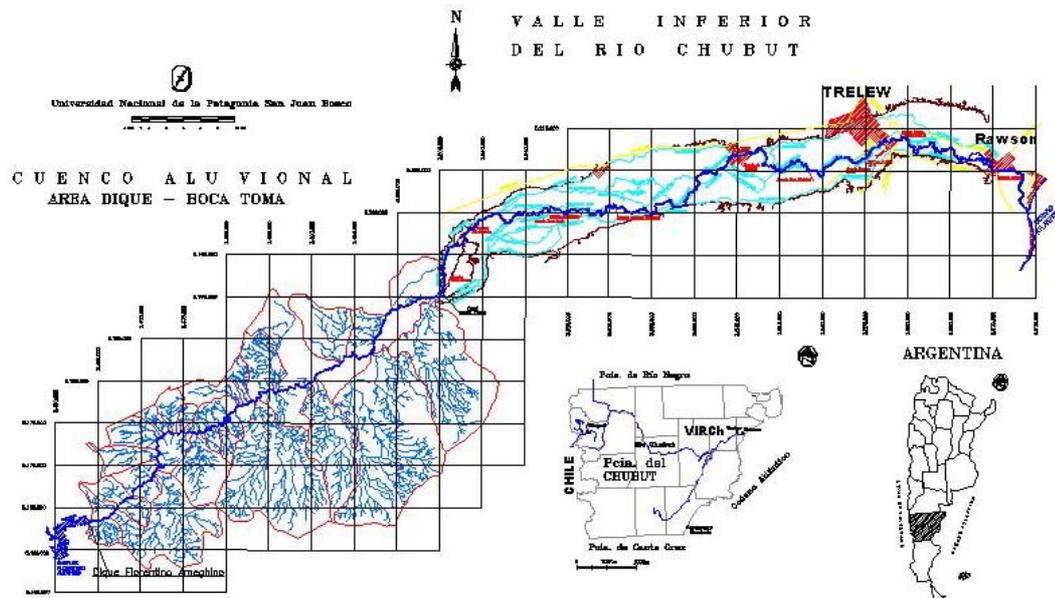
Se describen a continuación tales características, de las que se desprenden luego una proposición de clasificación. Esta clasificación, tendrá incidencia en la elección de las técnicas y procedimientos metodológicos para el análisis de estimación de caudales máximos.

#### 1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS COMUNES. GENERALES Y PARTICULARES.

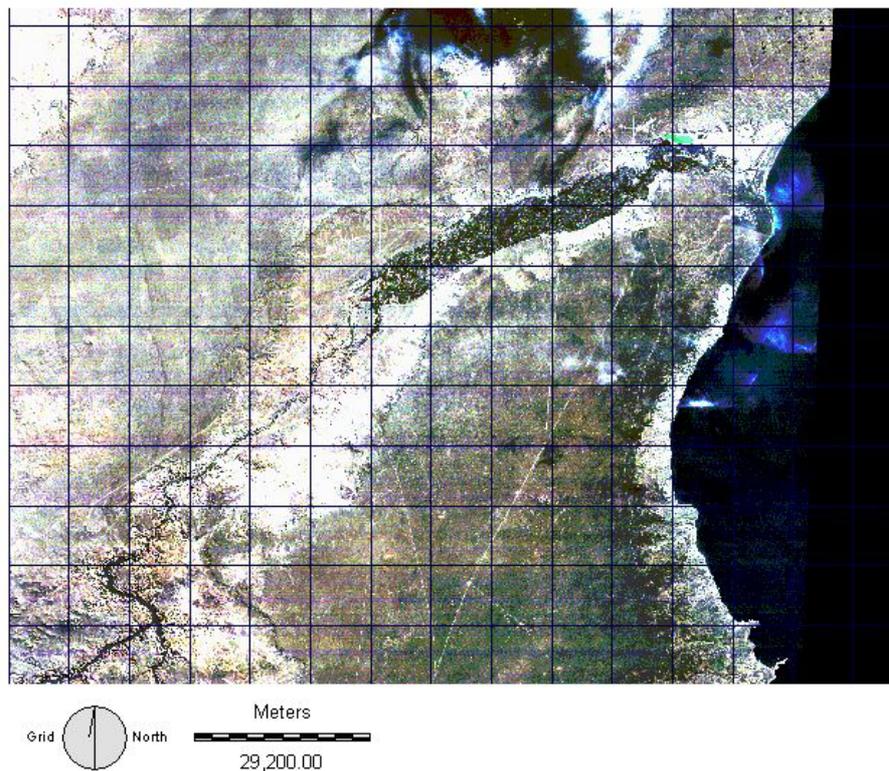
##### 1.1.1. Topografía – Morfología

En la presentación del problema, se expresa que la morfología en un paisaje de meseta tiene en general extensas superficies de suaves ondulaciones que coexisten con formas más o menos desordenada y errática de cerros y quiebres, lomadas, bardas, depresiones y mallines, cañadones, faldas escarpadas, afloramientos rocosos. Todos estos son componentes del paisaje que resultan de mayor intensidad y frecuencia en la zona de contacto entre la meseta y el valle de un curso de agua. Se destaca por ejemplo, el Río Chubut, cauce principal de la cuenca mayor de la región y su valle inferior, fuente de la mayor parte de las experiencias e información de apoyo que fundan esta investigación.

El paisaje moderno, resulta de las energías erosivas del viento y el agua, las que combinadas accionan en el modelado. La variabilidad en la resistencia de sus suelos define la susceptibilidad a la erosión por ambos agentes, y le confiere el fuerte contraste de sus formas entre las extensas pampas y las caprichosas formas de los afloramientos rocosos más resistentes, o sus pronunciados cañadones tallados en estratos sedimentarios del cuaternario.

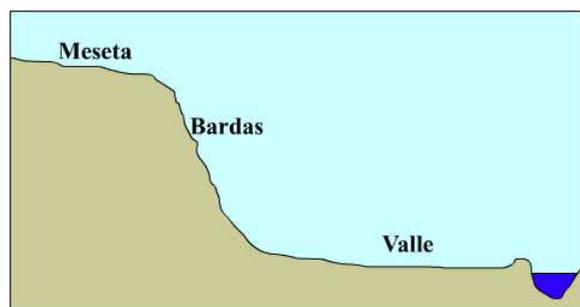


VIRCh Composicion color 123h - 24 04 98



**Fig. N°: 10. Ubicación del Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh). Vista IMG parcial del VIRCh (16/4/98)<sup>6</sup>: Se aprecia el Embalse F. Ameghino, el cuenco aluvional entre el Dique y Boca Toma y la región del VIRCh. (Serra et al, 1999)**

<sup>6</sup> Imagen LANDSAT TM 16/4/98. Fuente: imágenes digitales sin procesar provistas por la Dirección General de Catastro e Información Territorial de la Provincia del Chubut al Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, U. N. Patagonia San Juan Bosco para investigación y estudio de inundaciones en el Valle Inferior del Río Chubut



La zona de contacto *meseta-valle*, presenta particularidades geomorfológicas y una dinámica hídrica que la distinguen del paisaje de *meseta* o de *valle fluvial* al caracterizar una unidad hidrológica (Fig. N°: 11).

**Fig. N°: 11. Esquema meseta, bardas y valle**

En la región del VIRCh (Fig. N°: 10), su conformación tiene desniveles del orden de 20 a 50m en la zona intermedia y de hasta 200 metros en la alta meseta. La erosión hídrica talla los cañadones de pendientes escarpadas y drenajes bien estructurados, los que en ocasiones a su vez se ordenan en cuencas imbríferas torrenciales de sistemas de un orden mayor. Su red de drenaje, tiene manifestaciones diversas y pueden coexistir estructuras de sistemas hidrológicos *Típicos* o *No Típicos*.

Pero también, se identifican sistemas o *subsistemas mixtos (SHM)*, cuyas características no responden en plenitud a una u otra de las dos definiciones básicas y cuya proposición de clasificación se aborda en este trabajo. También se identifican subsistemas donde las características que lo definen son fuertemente dinámicas con alteraciones temporales erráticas de sus componentes; un caso particular de los SHM a los que se dará en llamar para diferenciarlos “*Sistemas Atípicos*”. Los cursos de aguas son generalmente temporarios, fuertemente erosionados, convergentes hacia lagunas temporarias más o menos encadenadas y ordenadas jerárquicamente hacia sistemas cerrados. O bien, subsistemas cuasi-cerrados, pero que convergen en años de extrema pluviosidad hacia cursos fluviales o sistemas de orden mayor.

En este trabajo, se aborda con especial atención estas características y se proponen sub-clasificaciones dentro de los sistemas mixtos que diferencian claramente las diversas componentes que integran un PHM.

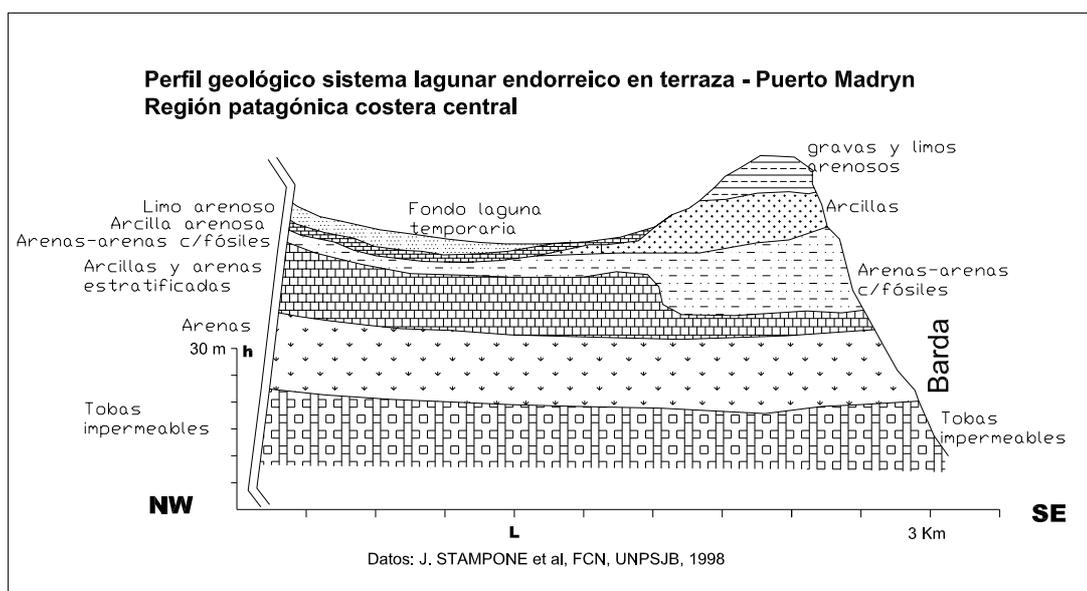
### **1.1.2. Suelos y Geología**

En general, se ha señalado ya que la geología regional costera se asienta en sedimentitas cenozoicas sobre las que descansan mantos sedimentarios de rodados patagónicos -conglomerados del pleistoceno-, en estratos que en ocasiones son de matriz arcillosa, o bien limo arenosa. También, de arenas, limos, arcillas de origen eólico, aluvial, coluvial, con predominancia de superficie de las arenas finas de voladuras. Estos estratos generalmente se apoyan en sustratos de sedimentitas más duras como limolitas, arcilitas, areniscas, hasta la roca firme impermeable (tobas). Meseta adentro, hacia el oeste, pueden verse en zonas de rocas volcánicas del terciario. Como en la región del Valle Medio del Río Chubut y la cuenca alta del Valle Inferior (*Area Aluvional Dique-Boca Toma*), predominan los afloramientos volcánicos de pórfidos. En los valles de

inundación y particularmente en el valle inferior, se encuentran suelos arenosos, limoarenosos y limoarcillosos, propios de planicies de inundación.

Con excepción de los estratos de gravas de matriz arcillosa, o los rocosos y tobáceos, los suelos en general están sometidos a procesos severos de erosión tanto hídrica como eólica y sujetos en consecuencia a procesos dinámicos de remoción, transporte y sedimentación permanente. Y en zonas de bardas, la potencia erosiva de los caudales torrenciales eroda los suelos más duros de las tobas y gravas arcillosas.

En la valoración de la infiltración, resulta importante disponer de información geológica y geomorfológica, preferentemente a escala local o regional. Es común encontrar unidades hidrológicas de escasa infiltración en suelos arcillosos o en los rodados de matriz arcillosa, y por el contrario, unidades de fuerte infiltración en cubiertas arenosas donde el sustrato impermeable es profundo.



**Fig. N°: 12. Perfil geológico tipo – Area Lagunar sobre Formación Puerto Madryn**

Esto es verificable aún en situaciones de vecindad. En efecto, dos cuencas torrenciales ubicadas en cercanías de Puerto Madryn, de geología y geomorfología similares, ambas localizadas en zona de bardas, cuasi-adyacentes, de similar tamaño (1.500 has), producen caudales superficiales y escorrentías marcadamente diferentes (Fig. N°: 12).

Esta particularidad se pudo constatar durante un monitoreo, realizado en una situación de emergencia hídrica generada por un mismo evento meteorológico extraordinario, la tormenta del 24 y 25 de Abril de 1998 con una precipitación total de 220mm en 54 horas de lluvia. (Stampone et al, 1998).

La primera de las unidades (Cuenco aluvional 2 de Puerto Madryn), tiene mantos superficiales arenosos, pero donde la erosión en su zona central alcanza en una gran extensión el sustrato de sedimentitas y tobas impermeables, y tiene un pequeño embalse producido por una presa de control de crecidas, que sirve de control y medición de los volúmenes embalsados y caudales erogados. Esta unidad hidrológica tuvo para esa tormenta un volumen de escorrentía estimado en un orden de un millón de hectómetros cúbicos.

El otro cuenco vecino, a pocos kilómetros al oeste de Puerto Madryn (Cuenco de Laguna de Planta de Tratamiento de Efluentes, en zona de terraza), drena hacia una laguna temporaria central, con alturas variables de 112 a 130 m/s/n/mar, y tuvo un orden de escorrentía inferior, equivalente a la quinta parte de lo escurrido en la primera cuenca.

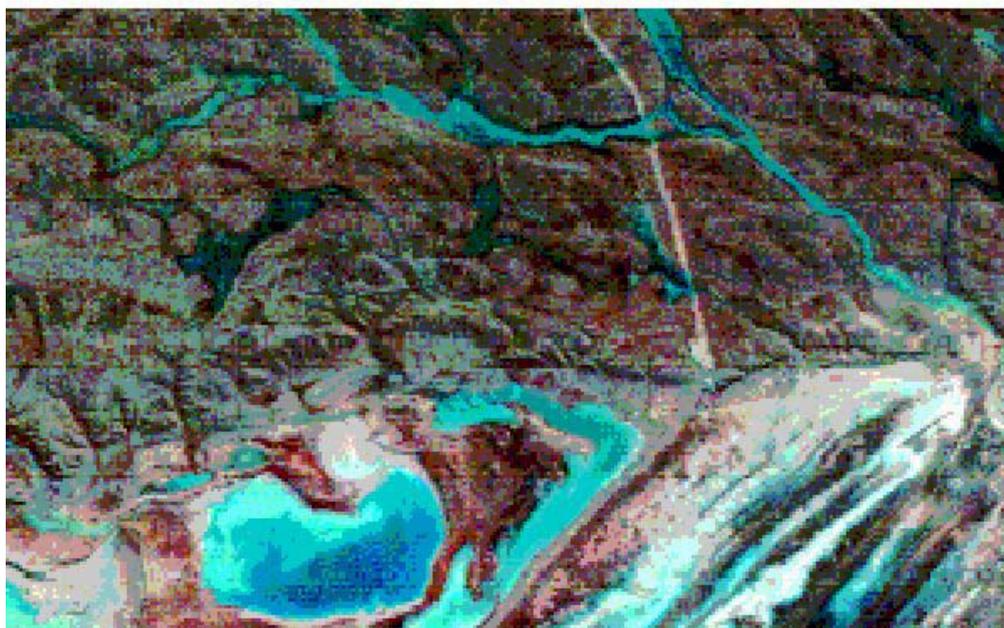
Para la misma tormenta, siendo éste un cuenco o sistema típico, de pendientes regulares y bien definidas, en el orden de 90 a 95% del agua precipitada no acusó flujos subterráneos hacia la laguna temporaria central. Se deduce que tal magnitud de agua caída, infiltrada y no escurrida, solo pudo tener como destino final la infiltración profunda hacia mantos arenosos de mayor potencia. De alcanzar el agua infiltrada el hidroapoyo de roca impermeable, a unos 50 metros de profundidad, este tiene marcada inclinación hacia el mar.

### **1.1.3. Cobertura vegetal y superficial**

La vegetación dominante es la estepa, con presencia de importantes superficies de suelos desnudos a causa de la salinización de las áreas más deprimidas o de la erosión eólica, hídrica o por actividades antrópicas como la ganadería y la explotación de minas y canteras.

En general, la vegetación tiene escasa incidencia en las retenciones por intercepción durante las lluvias. La vegetación es escasa y el subproceso de almacenamiento transitorio por intercepción no es relevante para la determinación del caudal pico y de la escorrentía. Más aún, si el objeto del cálculo es la estimación de caudales máximos, donde se ha de suponer como criterio de seguridad que la precipitación cae luego de lluvias recientes.

Pueden existir sin embargo, partes de un área hidrológica donde la vegetación alóctona o comercial sea importante, situación que se observa en forestaciones extensivas, valles regados con explotaciones de pasturas de implante (naturales también), hortalizas, montes frutales, parques y jardines.



*Fig. N°: 13. Composición color IMG al Norte de la ciudad de Rawson: Se aprecia que prevalece la vegetación arbustiva (estepa) en meseta. En detalle, la descarga de un cañadón en plena crecida extraordinaria del 24/4/98 sobre la planicie fluvio-márítima. La imagen muestra el sector de “El Sombrerito”, parte del paisaje lagunar y cordones litorales en coincidencia con las bardas que separan la terraza del valle a pocos metros al oeste del mar.*

En las zonas rurales, en la meseta, se destaca la influencia del desmonte progresivo y de la erosión consecuente por actividades ganaderas (cría extensiva de ganadería ovina).

También, aunque en menor medida, la explotación a cielo abierto de minas y canteras, donde los suelos desnudos son susceptibles de iniciar procesos de remoción y transporte por acción del agua y el viento y alterar las propiedades a la infiltración y almacenamiento (Fig. N°: 13).

En menor medida, puede considerarse la situación derivada tras incendios extensivos de campos, donde se altera severamente la cubierta vegetal y se modifican también los compuestos del horizonte superior de suelos debido a la alta producción de cenizas.

## **1.2. INFRAESTRUCTURA**

La región patagónica, por su baja densidad poblacional –algo menor de 1 hab/km<sup>2</sup>-, posee extensas regiones despobladas y desérticas. Esta densidad es variable, disminuye de Norte a Sur y en la zona central.

Sus economías son en general de tipo enclaves, concentradas en polos de desarrollo en derredor de sus principales ciudades, las que a su vez, se extienden en general a la vera de ríos y cursos de agua dulce o del litoral marítimo.

La mayor concentración de infraestructura se da en los conglomerados urbanos y sus parques industriales. Por esta causa, la antropización del paisaje está fuertemente

localizada en las ciudades y es mucho menor -a nulo- en el interior de la región y consecuentemente en zonas de meseta (las alteraciones antrópicas se dan aquí fundamentalmente por obras viales por la actividad ganadera).

REGION PATAGONIA CENTRAL: CLASIFICACION OBRAS INFRAESTRUCTURA															
Zonificación	Vial				Construcción y Serv.								Producción		
	Pavimentos urbanos o Inerurbanos	Autopistas y Rutas	Caminos de Tierra	Puentes y alcantarillas	Lagos y Lagunas Art.	Tajamares Agrop.	Canales Riego	Canales Drenajes	Rellenos	Parque4s y jardines	Edificación	Industrias / Parques Industriales	Redes y Cam. Serv.	Agrícola	Ganadera
<b>Costa</b>															
Urbana	MA	MA	MA	MA	A	No	B	MA	MA	MA	MA	MA	MA	B	No
Suburbana	A	A	A	A	R	R	A	R	A	A	A	A	A	R	R
Rural	R	R	R	R	R	A	B-No	B-No	B	B-No	B	B-No	B	A	MA
<b>Meseta</b>															
Urbana	No-B	B	A	A	R	B	B-No	B-No	R	A	R	R	A	B	B
Suburbana	No	R	R	R	B-No	R	R-B	B-No	B	R	B	B	B	R	A
Rural	No	B-No	B	B	B-No	A	B-No	No	No	B-No	B-No	B-No	B-No	A	MA
<b>Valle</b>															
Urbana	R	A	A	A	A	B	B	MA	A	A	A	A	A	R	B
Suburbana	No	R	R	R	R	R	MA	A	R	A	R	R	R	A	A
Rural	No	B	B	B	B-No	A	A	R	B-No	B-No	B-No	B-No	B	MA	MA
<b>Cordillera</b>															
Urbana	MA	MA	MA	MA	A	No	B	A	R	MA	MA	MA	MA	B	B-No
Suburbana	R	A-R	A-R	A-R	R	R	R-A	A	B	A	A	A	A	R	R
Rural	No	B	B	B	B	A	B-R	B-No	No	B-No	B-No	B-No	B-No	A	MA
Ref.: MA, Muy Alto A, Alto R, Regular B, Bajo MB, Muy Bajo , No, Nada															

**Cuadro Nro.: 2. PHM: Desarrollo y densidad de Infraestructura tipo**

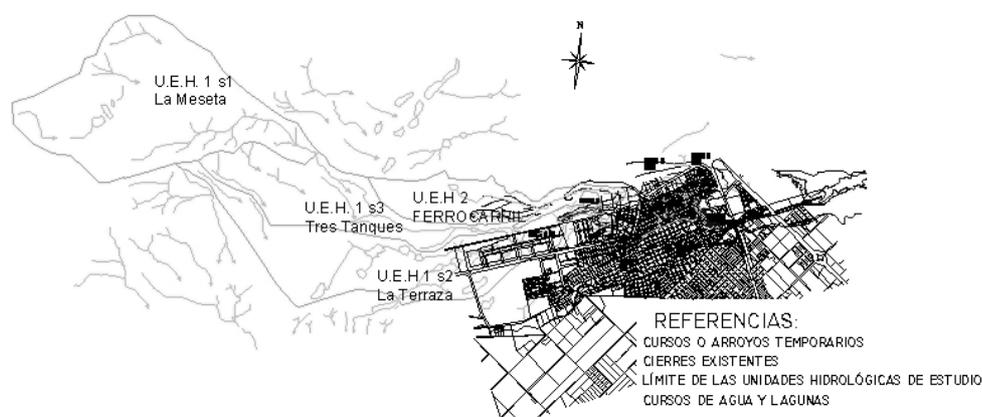
En el Cuadro Nro.: 2 se efectúa para la región patagónica central una clasificación del tipo y densidad de la infraestructura que pueda tener incidencia en la alteración de partes del ciclo hidrológico. En general, pueden aceptarse como indicadores para toda la región patagónica:

En las áreas fuertemente impactadas por actividades antrópicas de infraestructura urbana, éstas alteran fundamentalmente las componentes de la cubierta superficial. Como ocurre en todos los espacios urbanos, las construcciones edilicias, pavimentos y veredas disminuyen la infiltración de los suelos, aumentan el coeficiente de escorrentía y disminuyen los tiempos de concentración de la onda de crecida pluvial. Los parques y jardines, por el contrario suelen favorecer una mayor infiltración.

En las localidades asentadas en valles y mesetas, las alteraciones antrópicas tienen un mayor impacto sobre las alteraciones del paisaje hídrico.

En efecto, rellenos y excavaciones producen severos cambios en sus componentes, en un paisaje muy susceptible de modificar líneas preferenciales de escurrimiento, reducir o suprimir bajos inundables y antiguos cauces. En ciudades con un elevado índice de crecimiento, estos cambios son tan significativos en tiempo y espacio que los excedentes pluviales presentan mecanismos caóticos de disipación y escurrimiento.

Una muestra de ello es la ciudad de Trelew, construida en bajos y depresiones entre la terraza intermedia del valle y el valle inundable a la vera del cauce inferior del Río Chubut. Por su gran magnitud y gravísimos daños, entre otras inundaciones recientes se destacan las crecidas de Mayo de 1992 y Abril de 1998.



**Fig. N°: 14. Esquema de U.E.H. e Infraestructura urbana al pie del Cañadón del Parque Industrial al norte de la ciudad de Trelew<sup>7</sup>**

Además de la ocupación de bajos y depresiones por la infraestructura barrial, se da la particularidad de obras que constituyen “diques” que ciegan las salidas naturales de importantes cañadones (Fig. N°: 14). Grandes barrios de viviendas obstruyen por ejemplo las salidas del Cañadón del Parque Industrial de la ciudad de Trelew, del A° La Quinta en Comodoro Rivadavia, de los cuencos aluvionales en el Parque Industrial de la ciudad de Puerto Madryn, en el cañadón Baraibar en Gaiman, o del cañadón Dolavon en esta Localidad, todas ellas de la Provincia del Chubut. Las inundaciones provocadas por crecidas de estos cañadones urbanos sobre estos populosos barrios y sectores fabriles, tienen el agravante de serlo con corrientes torrenciales de agua.

<sup>7</sup> Serra, Juan, Malnero, A. et al. “Estudio de Refacciones y Mejoras al Sistema de Presas del cañadón del P.I. de Trelew, DICH – UNPSJB, Marzo 2000.

## 2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS Y SUB-SISTEMAS HIDROLÓGICOS BÁSICOS O UNIDADES DE ESTUDIO HIDROLÓGICO (UEHs)

En la problemática aluvional de las terrazas patagónicas, los dos sistemas hidrológicos básicos están presentes (Ref. Cap. *Métodos y Procedimientos Conocidos para el Cálculo de Caudales Máximos en Cuencas Torrenciales*, SHT y SHNT). Una u otra clasificación, le cabe a una unidad hidrológica cuando existen características claramente definidas o preponderantes de una sobre la otra.

Pueden también identificarse la existencia de *Sistemas Hidrológicos Mixtos (SHM)*, donde coexisten ambas tipologías básicas, en proporciones impactantes como para ser consideradas como tales, y en manifestaciones simples o más complejas.

Aún constituyendo *Sistemas Mixtos o Complejos*, se admite el uso del vocablo “*cuenca*” para referirse a los sistemas de orden mayor que conservan la propiedad fundamental de los SHT de identificar una “*envolvente*” de la superficie tributaria. No así para los subsistemas que lo componen, a los que se ha dicho se prefiere referir como *Unidades Hidrológicas de Estudio (UEHs)*.

Profundizando los conceptos básicos propuestos por Fertoni (1978, op. cit.), se propone a continuación una clasificación para las principales conformaciones de los componentes de sistemas y subsistemas hidrológicos de los PHM. Esta clasificación incorpora sub-categorías simples y otras derivadas de estructuras más complejas.

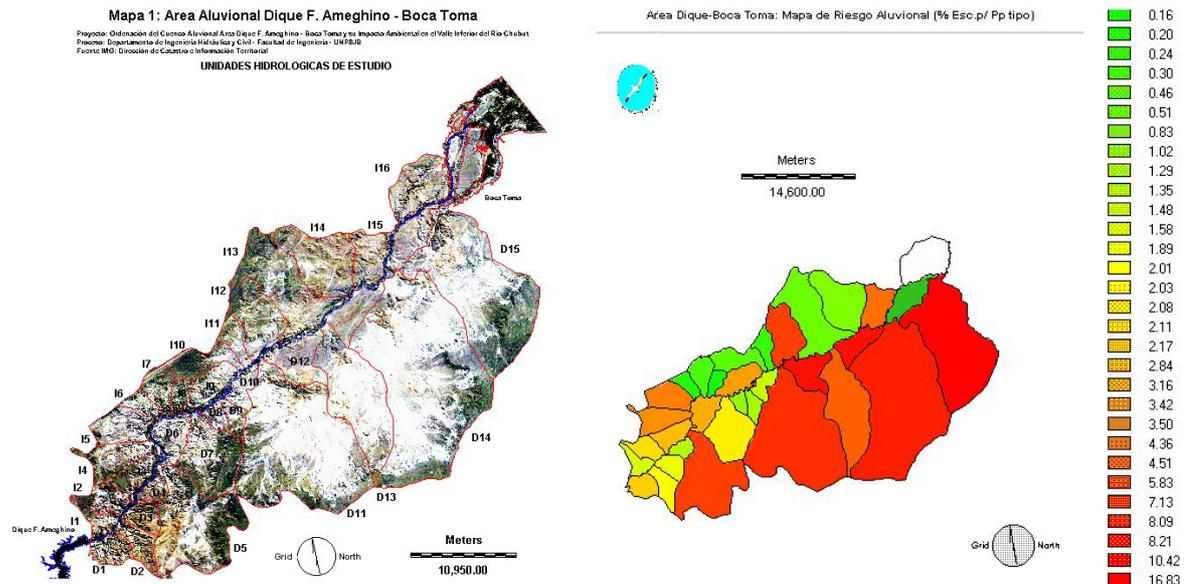
### 2.1. SISTEMAS HIDROLÓGICOS TÍPICOS (SHT)

En pampas en la meseta, pueden presentarse sistemas o subsistemas hidrológicos típicos o cuencas, en tanto dado un punto de síntesis o sección de control, puede identificarse una envolvente o divisoria de aguas y una red de escurrimiento que asume las características de linealidad, organicidad y jerarquía hacia un punto de síntesis o sección de control determinado. Tales sistemas se presentan en planos de pendientes marcadas y generalmente son sistemas abiertos que convergen hacia sistemas mayores.

Con más frecuencia, resulta identificarlos en zonas de contacto *meseta-valle* o *bardas*, hasta el ápice del cono de deyección.

En efecto. En nuestra zona de estudio, tales SHT son identificables en distintas dimensiones. Por caso, en cuencas suburbanas pequeñas como el Cañadón Baraibar, de 170 has, en la localidad de Gaiman, Chubut, ubicado en la región de contacto entre la zona de la denominada meseta intermedia y el Valle Inferior del Río Chubut.

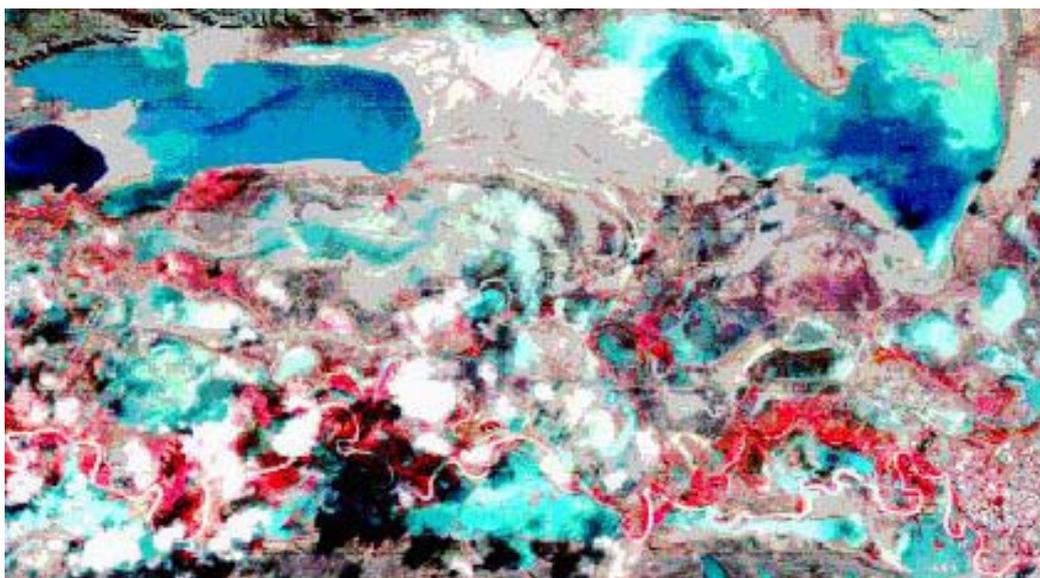
O también en sistemas de mayores dimensiones, como el Cuenco *Aluvional Area Dique-Boca Toma*, de una extensión cercana a los 1.000 km<sup>2</sup>, donde se identifican 32 unidades hidrológicas que descienden transversalmente al cauce del Río Chubut, desde la meseta al valle, aguas abajo del Dique Florentino Ameghino (Fig. N°: 15).



**Fig. N°: 15. Paisaje característico de un SHT, Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma, VIRCh – IMG: Subdivisión de Cuencos aluvionales y Mapa de Riesgo Aluvional. (Serra et al, 1999).**

## 2.2. SISTEMAS HIDROLÓGICOS NO TÍPICOS (SHNT)

En las pampas -de superficies más planas- y en los valles, coexisten sistemas o subsistemas hidrológicos cuyas características son propias de área de llanura. Sus componentes no son lineales, ni organizados ni jerárquicos. Los escurrimientos no son su estructura de disipación principal sino que aparecen componentes importantes de almacenamiento, con lagunas temporarias y permanentes y drenajes erráticos y dinámicos. Son claramente SHNT (Fig. N°: 16).



**Fig. N°: 16. Paisaje característico de un Sistema Hidrológico No Típico (SHNT). VIRCh: área lagunar entre Trelew y Rawson durante una crecida extraordinaria en 1998.**

Una muestra de este paisaje, lo constituye el sistema de Lagunas I a V, al Este del Valle Inferior del Río Chubut, entre los ejidos de Trelew y Rawson. También, una diversidad de pequeños subsistemas a lo largo de éste y otros valles.

### 2.3. SISTEMAS HIDROLÓGICOS MIXTOS

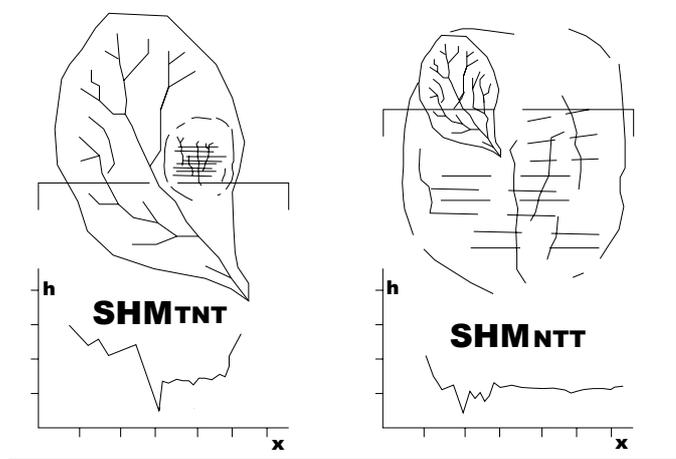
En general, en pampas de meseta suele encontrarse un paisaje compuesto, cuyas conformaciones sistémicas pueden sumar la combinación simple de ambos sistemas básicos o bien lograr manifestaciones más complejas.

Un sistema hidrológico es *mixto* (*SHM*), cuando ambas configuraciones coexisten en proporciones e impacto sensibles a la conformación de la estructura de disipación de los excedentes hídricos.

En sus formas simples, es mixto cuando uno está incluido en el otro de mayor orden. En su forma más compleja, ambos sistemas presentan manifestaciones compuestas o manteniendo partes de las propiedades combinadas de una u otra caracterización básica.

Se presentan a continuación distintas formas básicas de sistemas mixtos y complejos y sus subsistemas.

#### 2.3.1. Sistema Hidrológico Mixto Típico ( $SHM_{TNT}$ )



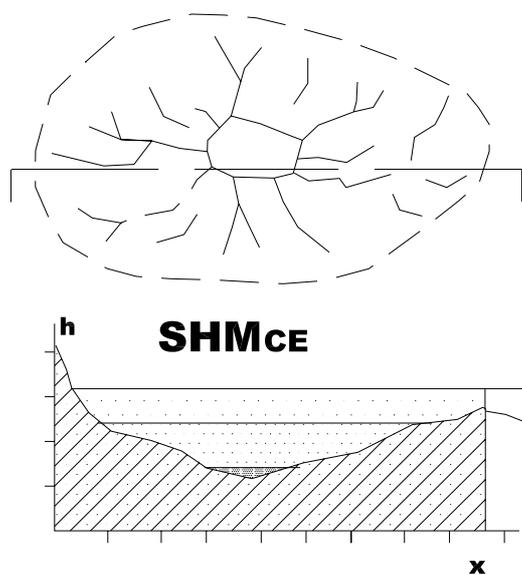
Un sistema hidrológico mixto es *Típico-No Típico* ( $SHM_{TNT}$ ), cuando la conformación sistémica mayor corresponde a la de un sistema hidrológico Típico que incluye en su superficie tributaria un área No Típica (Fig. N°: 17).

Fig. N°: 17. Esquema de  $SHM_{TNT}$  y  $SHM_{NTT}$

#### 2.3.2. Sistema Hidrológico Mixto No Típico ( $SHM_{NTT}$ )

Un sistema hidrológico mixto es *No Típico-Típico* ( $SHM_{NTT}$ ), cuando la conformación sistémica mayor corresponde a la de un Sistema Hidrológico No Típico que incluye en su área de aportes pluviales una cuenca tributaria o Típica menor. La imagen anterior del paisaje lagunar es un ejemplo de ello, un subsistema No Típico inserto en un SHT de orden mayor.

### 2.3.3. Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Cuasi-Endorreico (SHM<sub>CE</sub>)



Un subsistema de un sistema hidrológico mixto es *cuasi-endorreico* (SHM<sub>CE</sub>), cuando puede identificarse una unidad de comportamiento espacial dentro de una frontera que define una superficie tributaria de lluvias y crecientes ordinarias a extraordinarias, con una red de drenaje débilmente lineal, escasamente organizada y generalmente no jerárquica, cuya disipación de excedentes hídricos se resuelve por almacenamiento en su región central y que puede resultar desbordada en crecientes extraordinarias, para integrarse a un sistema lagunar o encausado de orden mayor (Fig. N°: 18).

**Fig. N°: 18. Esquema de SHM-CE**

Este concepto, atribuye carácter “temporal” a un contorno o frontera tributaria, definido en una porción de espacio, físicamente determinable, pero acotada a una porción de tiempo identificable. A diferencia del concepto primario de “divisoria” en una “cuenca”, o del concepto moderno de “envolvente” en un sistema típico, en esta definición deja de ser una línea de continuidad física “estática” para ser temporalmente dinámica.

Estas dos cualidades de los subsistemas o unidades hidrológicas mixtas *cuasi endorreicas*, son propias de esta región patagónica y sinérgicas para la generación de escorrentías en condiciones de humedad extrema. La primera, es propia del paisaje de meseta (concepto físico); la segunda, lo es del ambiente hidrometeorológico de clima semiárido (concepto temporal).

Es común distinguirlos en paisajes de llanura, integrados en subsistemas mayores que conforman “lagunas encadenadas”. Pero en este concepto introducido, se trata además de distinguir componentes parecidas a un SHT, donde por su particular morfología puedan sugerir una divisoria de aguas bien definida, marcados taludes, en casos hasta una red de drenaje temporario bien conformada, y que pueden confundir y llevar al analista a considerarlo una “cuenca” o sistema independiente cuando no lo es.

En efecto. Si bien el SHM<sub>CE</sub> es una conformación común en paisajes de meseta, se presentan a modo de ejemplos dos casos seleccionados.

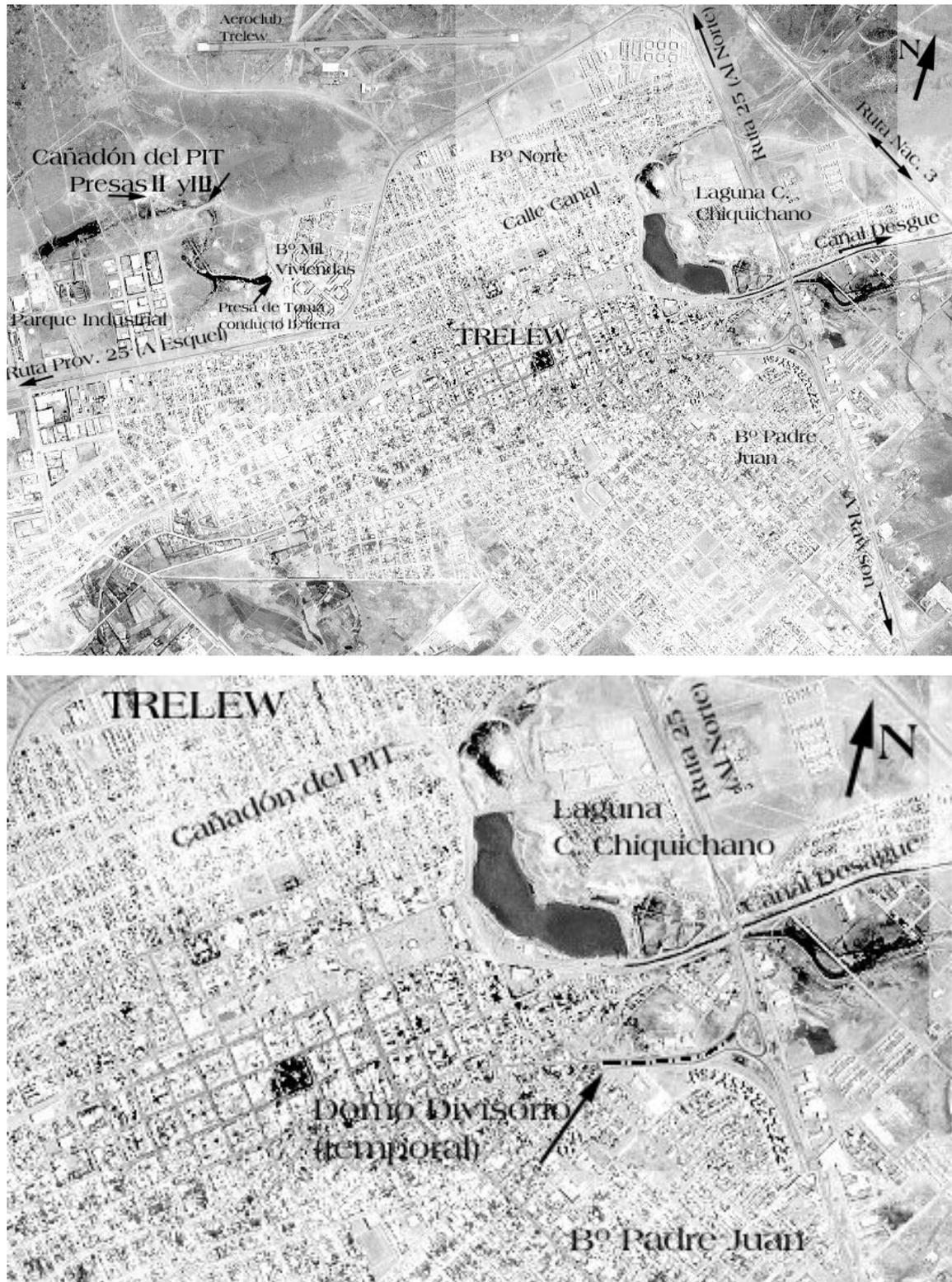
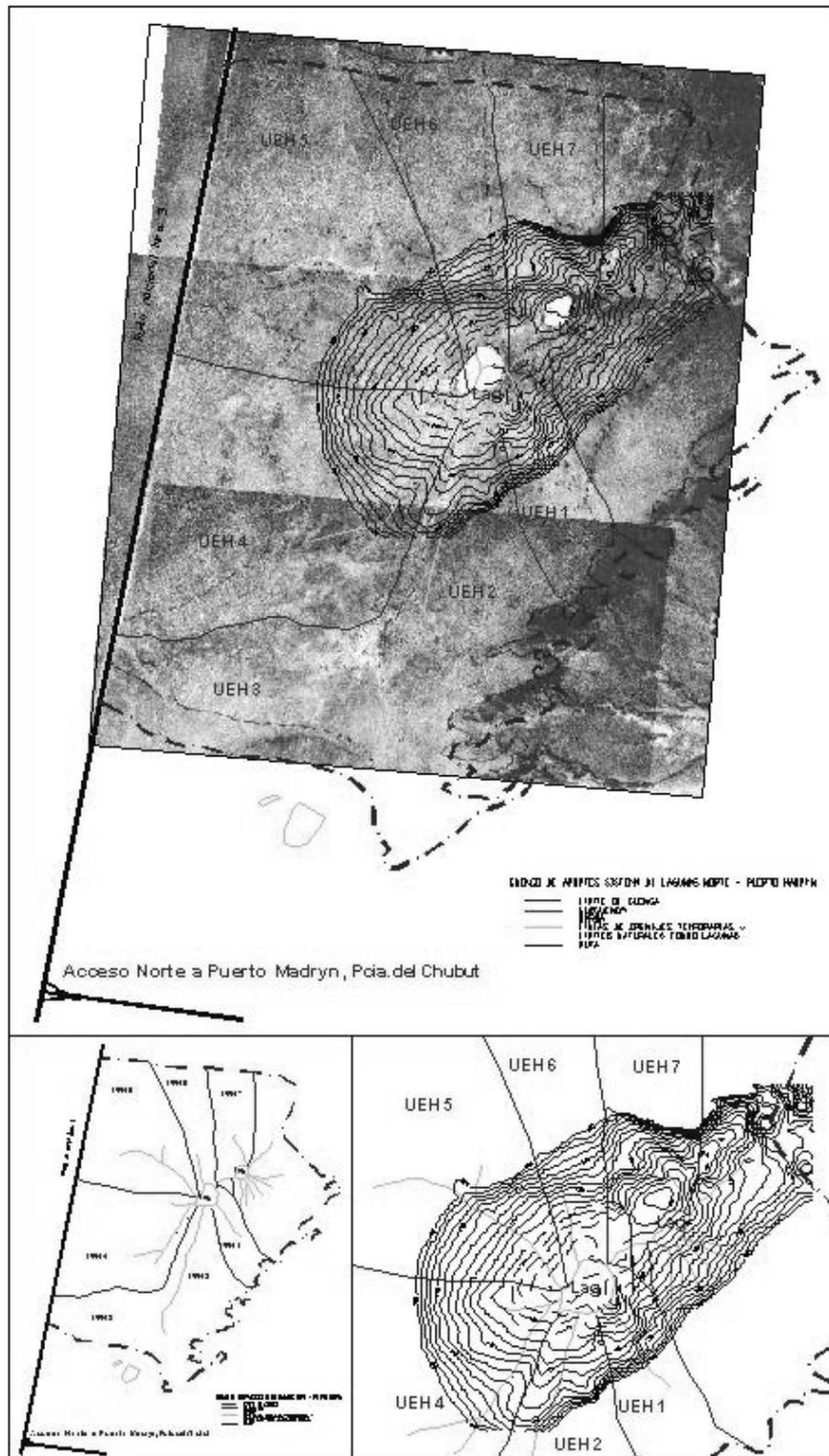


Fig. N°: 19. SHM<sub>CE</sub>: Trelew, Chubut, U.E.H. Laguna C. Chiquichano, Vista aérea y Detalle de borde Sur en área urbana



**Fig. N°: 20. . Ej. SHM-CE; Puerto Madryn, Chubut, Argentina: Esquema y Foto Aérea de Sistema Lagunar Cuasi-Endorreico; sobre Meseta, al NW del Ejido Urbano**

Un caso singular, lo constituye la cuenca de la Laguna Chiquichano (Fig. N°: 19). en la ciudad de Trelew. Esta pequeña cuenca urbana, ubicada al norte de la ciudad, recibe en períodos de lluvia las aguas del “Cañadón del Parque Industrial” y de pequeñas subunidades hidrológicas vecinas en zona de bardas (taludes fuertes), que delimitan un espacio geográfico de contorno o frontera urbano claramente definido. La zona sur de este contorno divisorio, ha sido considerada por muchos años por distintos técnicos como “divisoria de aguas”. Sin embargo, en la crecida extraordinaria de 1998 esta loma fue superada –quizás por única vez en la historia de la ciudad-, para integrarse a una depresión vecina donde radica unos de los barrios de mejor infraestructura unifamiliar de la ciudad, el Barrio Padre Juan, inundando cientos de viviendas, en parte con tirantes cercanos a los 2m.

Otro ejemplo de SHM<sub>CE</sub>, se muestra en la Fig. N°: 20 y Fig. N°: 21, correspondiente a



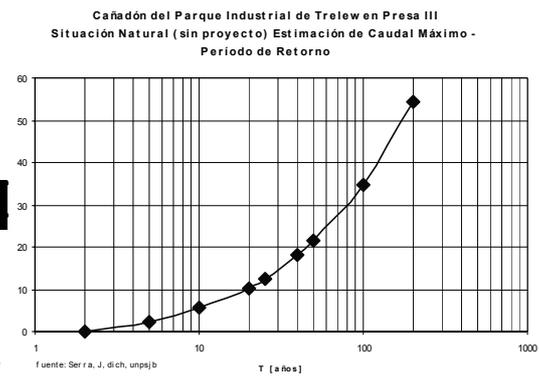
un subsistema lagunar en cercanías de la ciudad de Puerto Madryn, (Esquema de las Sub-Unidades Hidrológicas y de sus componentes; el mismo esquema sin la imagen aérea y en mayor detalle el área lagunar propiamente dicha).

**Fig. N°: 21. . Ej. SHM-CE, Puerto Madryn, Chubut, Argentina: vista ampliada**

En ambos ejemplos, la cualidad temporal del contorno divisorio es clara, y es aplicable a la resolución de problemas usuales de gestión de uso y control del agua. Por ejemplo, en un estudio de caudal máximo, es muy diferente el área de aportes hídrico a considerar según sea el objeto. Uno, si se trata de un problema que admite resolución para caudales de crecidas de reducidas recurrencias (ej., alcantarilla urbana). Otro distinto, si tratara de planificación de desarrollo urbano, donde intervendrá en el análisis y cálculo una superficie de aportes mayor, en correspondencia a volúmenes y caudales extraordinarios o excepcionales.

Este concepto temporal, es importante en la región de meseta patagónica, donde el módulo pluviométrico es reducido y las lloviznas y lluvias son generalmente de baja intensidad, con chubascos intensos pero cortos y aislados o de escaso desarrollo. Pero estas características de años hidrológicos normales a extraordinarios, contrastan fuertemente con la ocurrencia extraordinaria a excepcional de eventos meteorológicos localizados o generalizados con lluvias de alta intensidad y duración.

En el gráfico, puede apreciarse una fuerte diferencia entre los caudales de crecidas ordinarias, extraordinarias y excepcionales para el cuenco del PIT en Trelew (Fig. N°: 22).



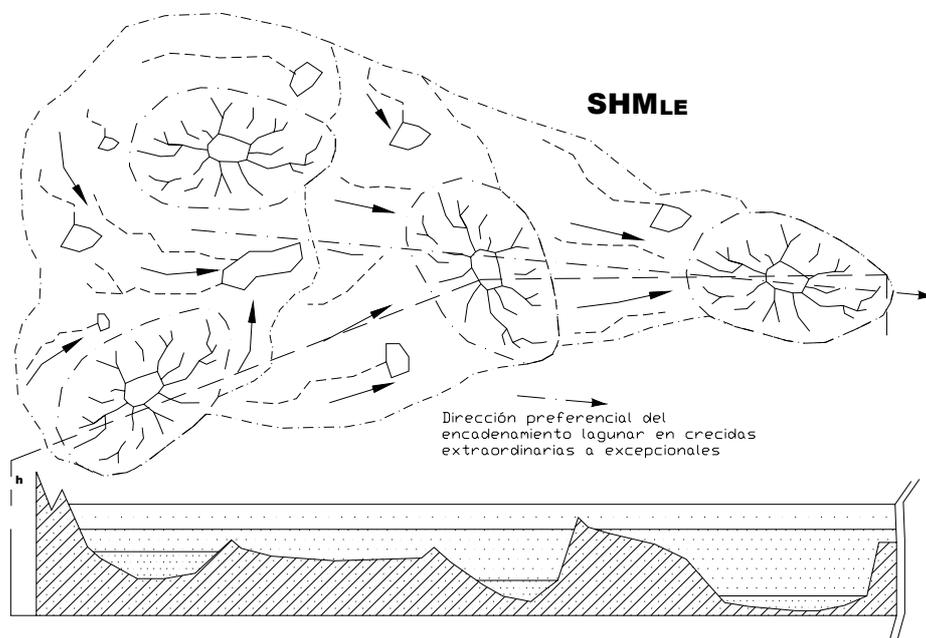
**Fig. N°: 22. Caudales máximos esperados en el Cañadón del Parque Industrial de Trelew para recurrencias crecientes**

### 2.3.4. Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Lagunar Encadenado (SHM<sub>LE</sub>)

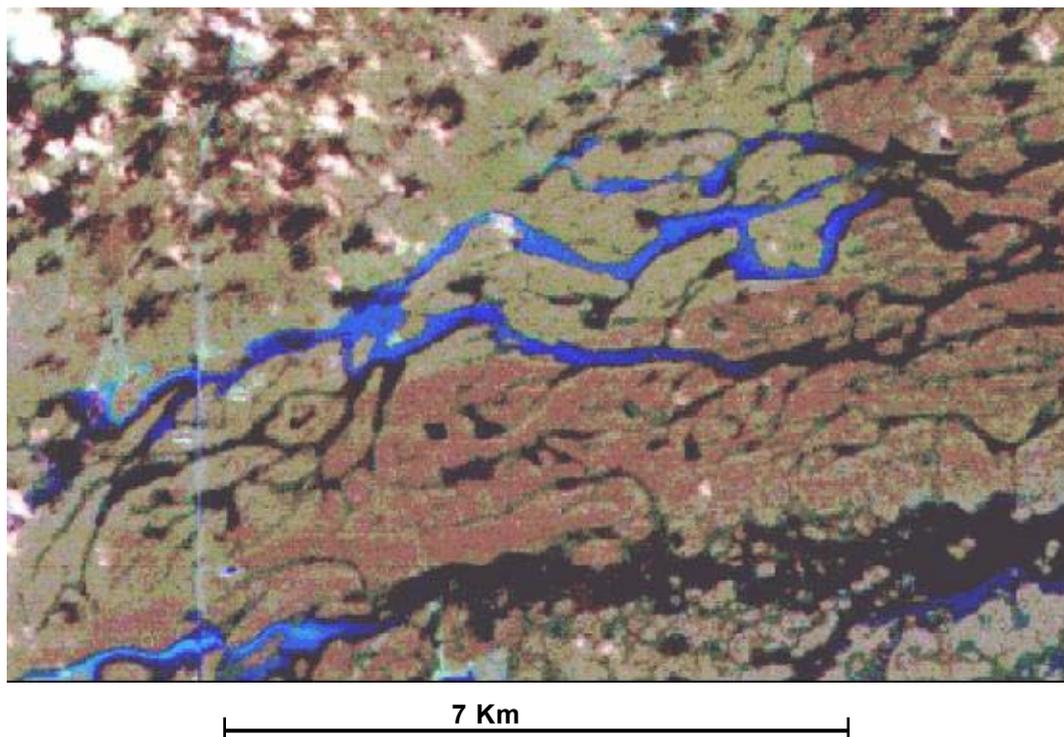
Un *Subsistema Lagunar Encadenado* (SHM<sub>LE</sub>), de un SHM, se compone de dos o más subsistemas cuasi-endorreicos y adyacentes.

En algunos casos y condiciones, la intensidad y ubicación de una tormenta intensa y de reducido tamaño en este tipo de paisajes puede ser determinante de la composición e integración del “trenzado” lagunar (chubasco en “mangas”).

En su conformación (Fig. N°: 23, Fig. N°: 24, Fig. N°: 25) estos subsistemas suelen encadenarse en una dirección estructural (alineamiento geológico) y converger a sistemas de orden mayor, abiertos o cerrados (endorreicos).



**Fig. N°: 23. Esquema de Sistema Hidrológico Mixto, Subsistema Lagunar Encadenado. (SHM-LE)**



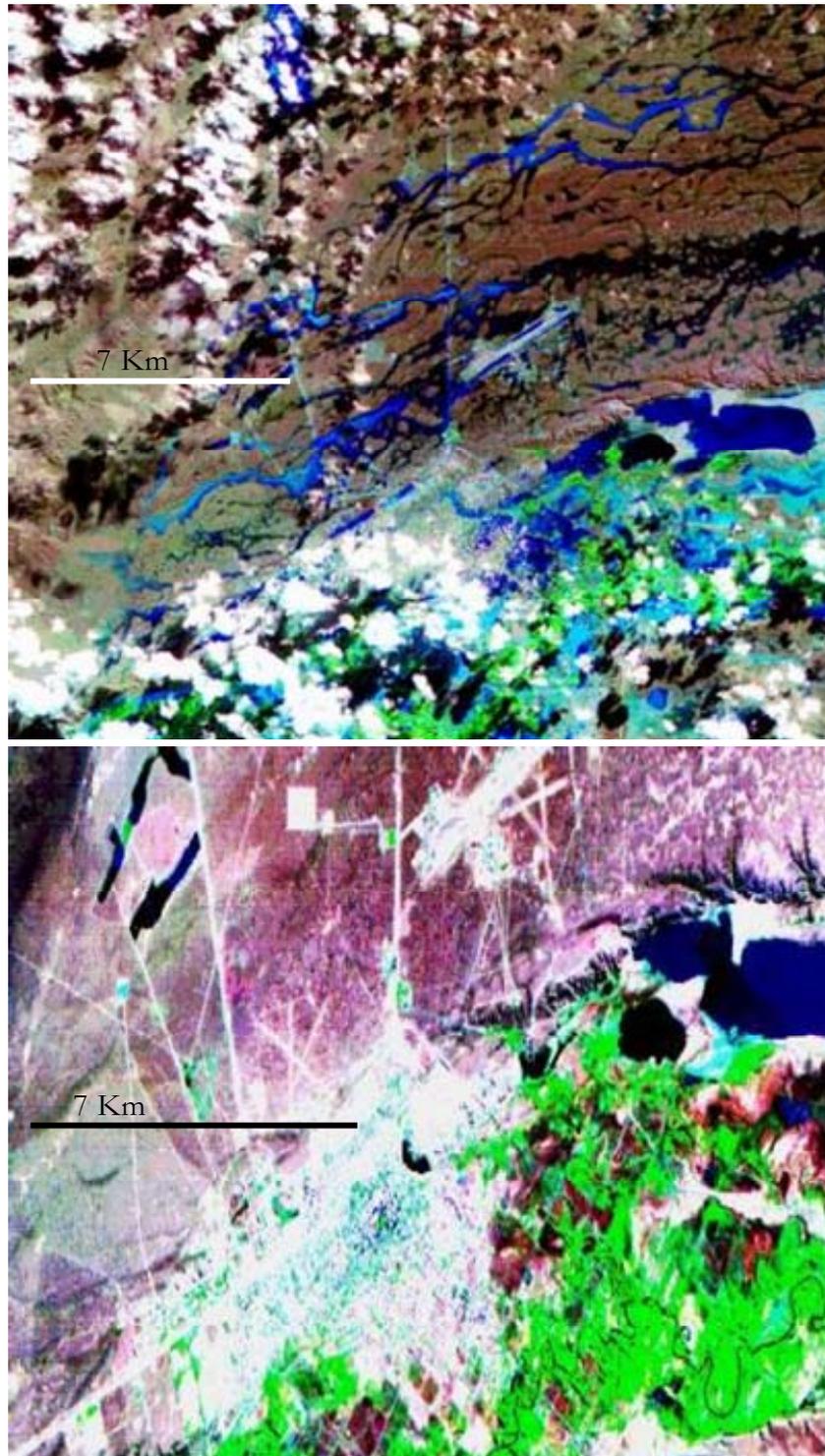
*Fig. N°: 24. Ej. SHM<sub>LE</sub> – (Subsistemas Cuasi Endorreicos y Lagunar Encadenado), Activos, en la tormenta del 24/4/98 (máxima tormenta extraordinaria registrada, 254mm en 54 horas). Recorte de IMG p/ el sector de la Meseta Intermedia (al Norte de Trelew, Chubut). A la izquierda, -en una débil línea vertical- la Ruta Nac. Nro. 3, cortada por la corriente.*

### 2.3.5. Sistema Hidrológico Mixto: Subsistema Atípico (SHM<sub>AT</sub>)

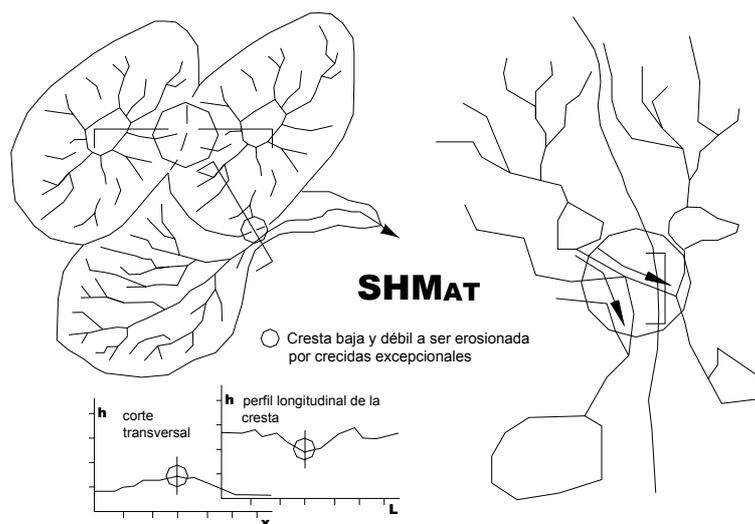
Se dará en denominar atípicos (SHM<sub>AT</sub>), aquellas unidades hidrológicas que por sus características geomorfológicas particulares y en sinergia con la ocurrencia de eventos de pluviosidad extrema y recurrencia excepcional, producen en sus componentes y por erosión severa alteraciones físicas localizadas o linealizadas, y modifican sustancialmente la estructura de disipación de la superficie tributaria (Fig. N°: 26).

Un primer caso de estos sistemas surge casi inmediato de considerar como unidad hidrológica de análisis la porción espacial de los grandes conos de deyección que suelen presentarse al pie de un gran cuenco o cañadón de meseta en su descenso al valle fluvial. Muchas veces, están fuertemente antropizados por la infraestructura urbana o rural.

Sin embargo, existen otros paisajes de meseta que merecen esta clasificación. En pampas con suelos granulares friables, donde combinan pequeñas planicies con componentes lineales de suaves ondulaciones, puede ocurrir que la concentración errática de un chubasco de pequeña extensión pero muy intenso y duradero (tormentas extraordinarias a excepcionales) produzca concentraciones torrenciales localizadas, de flujos intensos y gran potencia erosiva. En ocasiones, resulta la alteración severa del modelado con nuevas trazas y dimensiones geométricas de drenajes superficiales. Esta nueva conformación puede quedar activa a posteriori para lluvias de menor intensidad y duración, o bien desactiva y sujeta al atrofiamiento por efecto de la sedimentación eólica.



*Fig. N°: 25. Imágenes Satelitales de la ciudad de Trelew y alrededores. Superior: recorte de Imagen del 24/4/98, (máxima tormenta extraordinaria registrada, 254mm en 54 horas). Inferior: Recorte de un área similar del 16/4/98, en escala ligeramente menor y 1 semana antes de la tormenta.*



**Fig. N°: 26. Esquema de Sistema Hidrológico Mixto, Subsistema Atípico (SHM-AT)**

En algunas circunstancias extremas, las aguas torrenciales alcanzan la montura de la suave frontera de la superficie tributaria. Y si la geología de la misma presenta suelos susceptibles de ser erosionados, el torrente puede “cortar” tal divisoria, modificar su rumbo y alterar sensiblemente la estructura de la red de drenaje. En casos, se ha comprobado el cambio del destino final de las aguas del torrente. Tales divisorias son consideradas con “*debilidad hidrológica estructural*”. Dos ejemplos afirman este concepto.

Uno, el denominado Cañadón aguas arriba del B° Mil Viviendas, Trelew, en la zona suburbana de la ciudad. Este cañadón, se extiende en zona de bardas sobre la terraza intermedia al norte de la ciudad de Trelew y en forma paralela a esas bardas, en dirección W-E, hacia el mar.

Al cañadón, llegan las aguas pluviales de un sistema lagunar encadenado en la terraza, que proviene de las bardas de la alta meseta entre Gaiman y Trelew. Hacia el sur del cañadón, está la ciudad de Trelew, ubicada en una gran depresión en el valle mismo del Río Chubut. La geomorfología muestra que tiempo atrás, el cañadón proseguía su rumbo W-E, hacia un sistema de lagunas mayor y en dirección al mar.

En tiempos recientes, ha producido el “corte” hacia el sur en su débil divisoria (Sector del “Barrio Mil Viviendas”, en la ciudad de Trelew), para tomar rumbo N-S y su descenso luego hacia la denominada Laguna Chiquichano.

Otro ejemplo, lo constituye el sistema lagunar de la terraza intermedia al Norte y hacia el Este de la ciudad de Trelew, con línea preferencial de flujo en dirección Oeste-Este, hacia el mar.

Este sistema, de casi 30 km de extensión y con desagüe natural al mar, es “cortado” en las bardas de contacto con la planicie aluvial del Río Chubut en su tramo final por cordones litorales o bancos de sedimentos marinos modernos que obran de

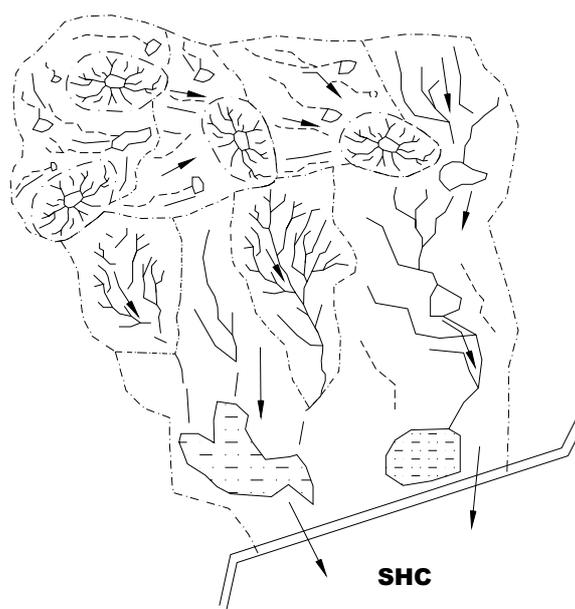
“divisorias”, dispuesto paralelos a la costa marítima, en dirección norte-sur y a unos 2km de la costa.

Estos cordones, forzaron el cambio de rumbo de las aguas en crecidas extraordinarias hacia el sur, alcanzando luego de 10km de recorrido en planicies el Río Chubut, a pocos metros de su desembocadura en el mar en cercanías de la ciudad de Rawson. (Fig. N°: 27).



**Fig. N°: 27. Crecida extraordinaria 24/4/98:** al Norte (arriba): Cañadón El Sombrero, drenaje de la Meseta Intermedia. Al Este, el O. Atlántico. Al Oeste, Laguna El Salitral y final del sistema lagunar del VIRCh. Al SW, la ciudad de Rawson. De Norte a Sur, entre la playa y la Ruta Nac. 3 la planicie fluviomarítima (descarga natural del Cañadón El Sombrero), delimitada entre cordones litorales.

#### 2.4. SISTEMAS HIDROLÓGICOS COMPLEJOS (SHC)



Los sistemas hidrológicos *complejos*, o *compuestos*, son un caso particular de sistemas mixtos. En los que un área hidrológica identifica una envolvente tributaria generalmente definida, donde se manifiesta la coexistencia de distintos sistemas y subsistemas, en combinación con el sesgo temporal que suma la alternancia climática por la aparición de fenómenos meteorológicos extremos localizados o generalizados.

Estos sistemas, son una característica muy común en las áreas hídricas de meseta.

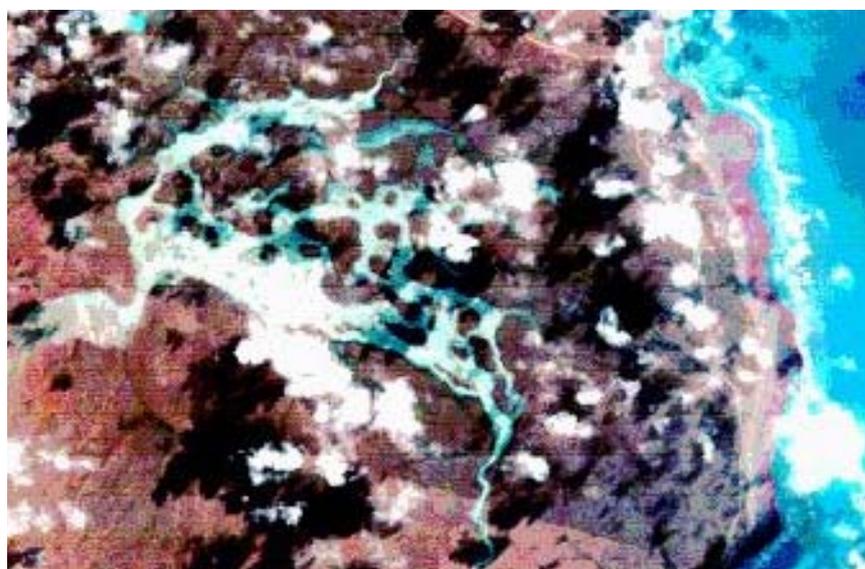
**Fig. N°: 28. Esquema de Sistema Hidrológico Complejo (SHC)**

Explican la fenomenología torrencial de alternancia entre largos períodos en que los excedentes hídricos se resuelven en subsistemas cuasi cerrados –no estacionales, sino de años hidrológicos completos-, y los cortos lapsos de torrencialidad excepcional, con “*encadenamientos*” lagunares y de pequeños cursos en una dirección estructuralmente condicionada por la geología regional. El tamaño, complejidad y combinación de componentes, sugieren considerarlos una categoría especial dentro de los sistemas torrenciales mixtos de meseta (Fig. N°: 29; ej. de casos en Fig. N°: 29 y Fig. N°: 30).

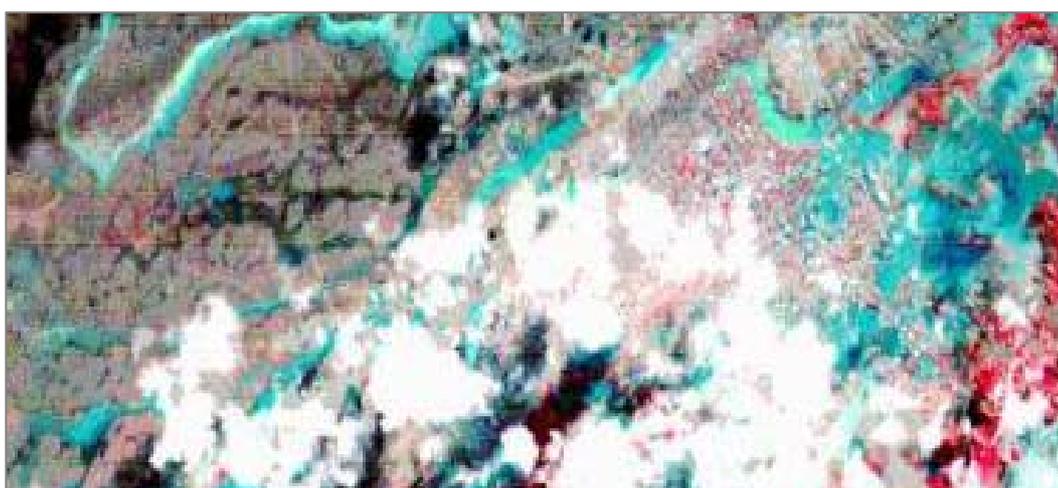
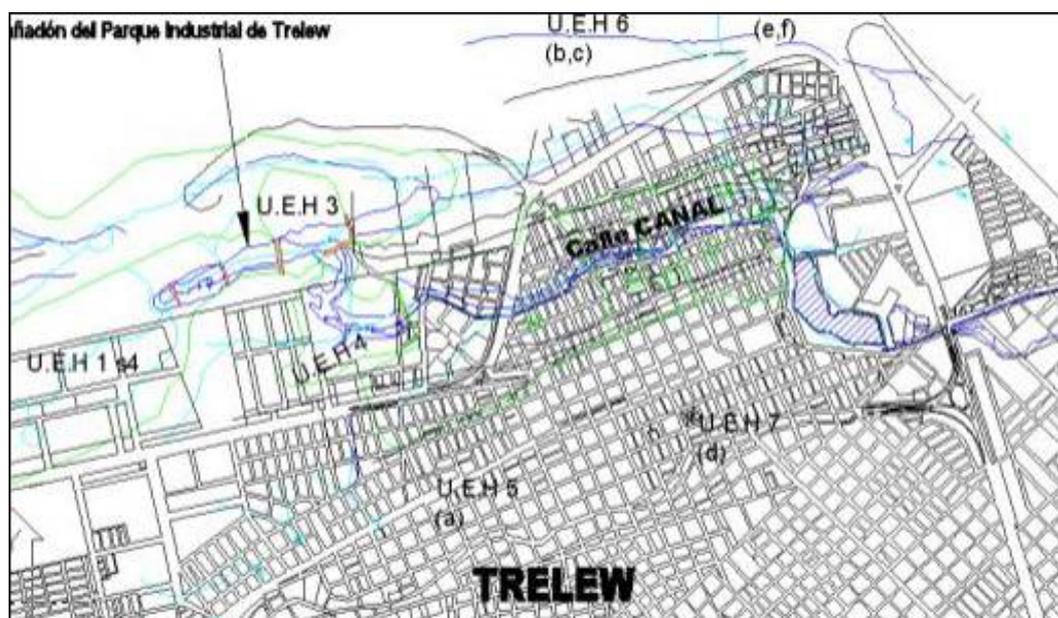
Se asemeja con los sistemas típicos, en cuanto por lo general, tienen una envolvente tributaria definible para un punto de síntesis dado. Se diferencian, en que su estructura de disipación no guarda similitud estricta de linealidad, organización y jerarquía, y en consecuencia, su punto de síntesis no guarda el principio de continuidad de las clásicas cuencas. Por lo general, su estructura de drenaje superficial dispone de elementos lineales, algo organizados y poco o nada jerarquizados.

Con los sistemas No Típicos, se asemejan además porque la estructura de disipación no encauzada es significativa, con componentes de almacenamiento y disipación por infiltración y evaporación importantes.

Se diferencia de ambos sistemas en la variabilidad temporal que pueden tener sus componentes. Y también por la variabilidad espacial de algunos de ellos, aunque esta última propiedad no sea común a todos los sistemas complejos.



**Fig. N°: 29. SIC: Cañadones en Playa Magaña. Descarga al mar en crecida extraordinaria del 24/4/98. Las aguas que drenan de la alta meseta al Oeste, se concentran en la terraza intermedia en desordenados y erráticos encadenamientos lagunares para “cortar” en su descarga al mar las costas acantiladas compuestas de rodados patagónicos superficiales, estratos arenosos, areniscas y afloramientos de tobas más profundas.**



**Fig. N°: 30.** SHC: Cañadón del Parque Industrial de Trelew; PIT; 1) El Cañadón del PIT en su tramo final, en el área urbana. Frontera de aportes en crecidas ordinarias. 2) Recorte de IMG Satelital del área urbana y suburbana para la tormenta extraordinaria del 24/4/98. (Frontera y área de aportes en crecidas extraordinarias a excepcionales Ref. Gráfico 4).

### 3. PROCESOS HIDROLÓGICOS Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS

En análisis de los *procesos hidrológicos*, sea con el concepto clásico de *sistema* donde la cantidad de materia es constante, o bien de *volumen e control* para un volumen fijo y determinado, interesa encontrar las relaciones funcionales que *transforman* en espacio y tiempo al ciclo del agua en el mismo.

### 3.1. U.E.H. GENERAL

Se supone para un caso general una Unidad de Estudios Hidrológico (UEH) dada. El sistema, podría interpretarse a partir de un volumen de control, delimitado en su frontera por una *superficie de control* imaginaria. Esta superficie envuelve al paisaje, y puede interpretarse si se proyecta verticalmente una línea imaginaria continua de frontera de la UEH (que puede ser o no una *divisoria de aguas*), y se delimita por dos planos horizontales: uno superior por sobre la superficie de contacto del medio físico y la atmósfera y otro plano inferior por debajo del sustrato impermeable. En la Fig. N°: 31, se observa un esquema posible del volumen de control y su superficie. A la izquierda, un sistema hidrológico típico elemental (proyección vertical de la divisoria de aguas) y a la derecha, para una unidad de estudio hidrológico cualquiera o caso general (proyección de una línea imaginaria o de “*frontera*” que puede o no coincidir -parcial o totalmente- con la proyección vertical de una divisoria de aguas):

Nivel 7: Salidas e Informes:

- Hidrograma y Tabla detallada por UEH.

#### *Volumen de control para una UEH cualquiera (caso general)*

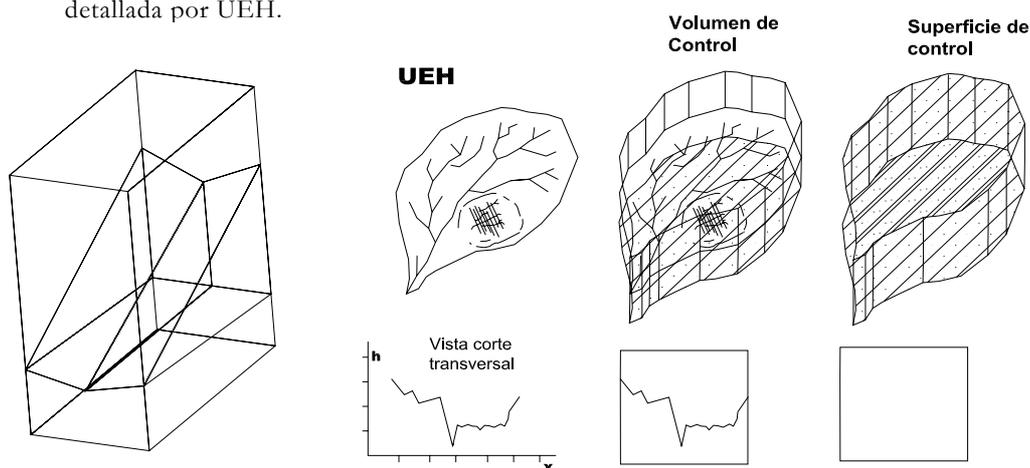


Fig. N°: 31. Volumen y Superficie de Control para una UEH. Caso general.

#### 3.1.1. Principio de continuidad

De acuerdo a la *ecuación de continuidad*, derivada de la aplicación de la conservación de masa, se tiene:

$$(XII) \quad \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \rho dv = - \iint_{S.C.} \rho \vec{V} d \vec{A} \quad ; \quad \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} dv = - \iint_{S.C.} \vec{V} d \vec{A} \quad ; \quad \text{para } \rho = Cte$$

De acuerdo a esta ecuación, la tasa o velocidad de cambio de la cantidad de agua (masa) por unidad de tiempo, dentro de la UEH, es igual a la pérdida por flujo o caudal de agua (flujo de masa), que traspasa la superficie de control.

La ecuación siguiente, deducida de la anterior para fluidos de densidad constante -caso del agua- y flujo impermanente, -muy común en el análisis de escurrimientos en canales y cauces naturales-, puede también aplicarse a este caso.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (\text{XIII})$$

El primer término de la igualdad, expresa para un instante dado la variación de volumen de agua por unidad de tiempo dentro de la UEH. Los dos términos a la derecha de la igualdad, expresan los flujos totales de “entradas” y de “salidas” a través de la superficie de control de la UEH; y ambos términos, representan el flujo total de agua a través de ésta.

Se interpreta aquí, que “S”, almacenamiento, es la cantidad o volumen total de agua dentro de la UEH. Para las variables que representan los distintos componentes del ciclo hidrológico, es la suma de agua en los reservorios o componentes siguientes:

- $S_{It}$  , Almacenamiento por Intercepción de lluvias o en la masa vegetal (transitorio);
- $S_A$  , Almacenamiento superficial (cuerpos de agua -lagos y lagunas; mallines, bañados y esteros; charcos-; y en flujos encausados y mantiformes, permanentes o temporarios);
- $S_{ss}$  , Almacenamiento sub-superficial;
- $S_{st}$  Almacenamiento subterráneo, en acuíferos libres y confinados;

En sentido estricto, también componen S otras formas de almacenamiento -animal y vegetal, por caso-, que en términos prácticos aquí no se consideran; sino, en la forma de sus consumos (abastecimiento poblacional, rural, agropecuario, industrial, etc), los que pueden derivar o no fuera de su frontera.

El flujo que ingresa ( $I_t$ ) al sistema a través de la superficie de control es principalmente por precipitación ( $dP/dt$ , para “P” expresada en unidades de volumen), y entendida por tal a toda forma atmosférica del agua que ingresa al sistema. Pero la UEH, puede admitir otras formas de ingresos que deben adicionarse para componer la totalidad de los flujos entrantes:

- $I_{sf}$ , Flujo de ingresos superficiales (encausados y mantiformes);
- $I_{ss}$ , Flujo de ingresos sub-superficiales;
- $I_{st}$ , Flujo de ingresos subterráneos;

El flujo saliente a través de la superficie de control ( $Q_t$ ), está determinado por la suma de todas las formas de flujo saliente y es una característica del proceso de transformación dentro del sistema. Generalmente, este flujo está principalmente

determinado por escorrentías ( $Q_E$ ) es decir, por caudales superficiales de agua que “salen” del sistema. Pero también, componen el flujo saliente:

- $Q_{Ev}$ , Flujo de Evapotranspiración,
- $Q_{Fp}$ , Flujo de Infiltración profunda (percolación), hacia capas inferiores al plano o base del V.C..

En sentido estricto, debería incluirse en el análisis teórico otras formas de flujo entrante y saliente, que en sentido práctico se desprecia –ej: animales en tránsito hacia y desde la frontera-

### 3.1.2. Ecuación de momentum

La ecuación de momentum, que aplica el principio de conservación de la cantidad de movimiento, establece que la resultante o sumatoria de todas las fuerzas actuantes, es decir la variación de la cantidad de movimiento total respecto al tiempo, es iguala a la suma de la variación de la cantidad de movimiento respecto del tiempo en el interior del volumen de control –integral temporal-, más el flujo o tasa de cantidad de movimiento a través de la superficie de control que expresa el término de la integral de superficie.

$$\sum F = \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} \vec{V} \rho dv + \iint_{S.C.} \vec{V} (\rho \vec{V}) d\vec{A} \quad \text{(XIV) Ecuación integral de momentum, en flujo impermanente}$$

Si bien esta ecuación puede simplificarse para flujos más simples, como el flujo permanente (caso común en la hidráulica de canales), en el caso del sistema que modela el ciclo hidrológico en una UEH el flujo es claramente impermanente.

Ahora bien, puede admitirse en general, que el flujo neto de cantidad de movimiento a través de la superficie de control de la UEH es nulo en los planos superior e inferior (de haber percolación, este flujo de cantidad de movimiento hacia capas profundas es despreciable).

La superficie vertical, puede a su vez ser dividida en superficial y subterránea. En este supuesto, el flujo de cantidad de movimiento a través de la superficie de control subterránea, también es despreciable (velocidades muy bajas).

Se deduce aquí, que el principio de cantidad de movimiento en el estudio de UEHs puede resultar importante de considerar en cauces torrenciales donde las velocidades y los cambios de velocidades son significativos, y en los desplazamientos de grandes masas de agua con variaciones importantes de secciones y consecuentemente de velocidad.

### 3.2. PROCESOS HIDROLÓGICOS EN UN SHT

En un SHT o cuenca, el volumen de control surge de proyectar en vertical la divisoria de aguas. Los límites superior e inferior son -por simplicidad- una proyección horizontal de la superficie de la cuenca. Este volumen de control, puede ser subdividido en dos partes claramente identificadas: una porción de espacio superficial-atmosférica y una porción de espacio subterránea. Las variables de almacenamiento, entradas y salidas para la ecuación de continuidad, tienen las siguientes características:

- $S_{It}$  , Almacenamiento por Intercepción de lluvias o en la masa vegetal (transitorio). Puede ser de magnitud importante en cuencas de vegetación densa, pero en PHMP su valor es muy reducido.
- $S_A$  , Almacenamiento superficial (cuerpos de agua -lagos y lagunas; mallines, bañados y esteros; charcos-; y en flujos encausados y mantiformes, permanentes o temporarios). Este valor decrece con la mayor pendiente de cauces y faldeos. En PHMP suele alcanzar valores importantes, por sus depresiones y sus extensos planos.
- $S_{ss}$  , Almacenamiento subsuperficial. Su importancia depende de las características particulares de los suelos superficiales. En general, para PHMP asume valores muy reducidos y se lo analiza integrado al flujo subterráneo.
- $S_{st}$  Almacenamiento subterráneo, en acuíferos libres y confinados. Es muy variable de una cuenca a otra y en las sub-unidades de la misma. Constituye uno de los parámetros de mayor dificultad de ajuste de un modelo de simulación porque los caudales producidos son muy sensibles a su variación. En general en PHMP, los suelos de la capa superior son mantos potentes de suelos granulares, con gran capacidad de retención de agua de infiltración. Estos mantos pueden tener matriz arcillosa o lentes de arcillas superficiales o intermedios que disminuyan sensiblemente la infiltración de las aguas superficiales.

El flujo que ingresa ( $I_t$ ), es principalmente por precipitación ( $dP/dt$ , para “P” expresada en unidades de volumen), siendo reducidos a despreciables las otras formas de ingresos a la cuenca. En sentido estricto, cabría adicionar flujos del subálveo si la divisoria de aguas superficiales no coincide con la divisoria de aguas subterráneas.

El flujo saliente a través de la superficie de control ( $Q_t$ ), está determinado principalmente por *flujos superficiales y subterráneos* (escorrentías).

El flujo de salidas por *evapotranspiración* es importante en períodos de análisis prolongados. Pero no es significativo cuando se analizan períodos cortos. En efecto, en el supuesto de estudios de crecidas máximas en pequeños y medianos torrentes, el estudio se realiza durante el período de lluvias hasta algunas horas o unos pocos días después. En dicho período, generalmente cargado de humedad ambiente, la evapotranspiración es muy reducida o cercana a cero. Aún en el supuesto de alcanzar

algunos mm/día, en el período de análisis tales pérdidas no son significativas en relación a las lluvias máximas que se investigan.

El flujo de salidas por *infiltración profunda* debe ser analizado para cada caso en particular. En PHMP este valor puede ser significativo, dependiendo de las características geológicas del sustrato.

### 3.3. PROCESOS HIDROLÓGICOS EN UN SHNT

En un SHNT, o de llanuras, la aplicación del concepto de *divisoria de aguas* es inapropiada por cuanto esta envolvente es difusa, errática, y generalmente indeterminada. Resulta más apropiado definir el volumen de control proyectando en vertical una región o *frontera* de análisis, y entre dos planos paralelos. Se interpreta aquí que la *línea de frontera* que proyecta al *volumen de control* asume para el trazado preferentemente las siguientes características:

- diferencia unidades hidrológicas de distintas características morfo-hidrológicas;
- interpreta que la transferencia de *flujos superficiales en manto* –no encausados- a través de esta frontera es reducida a nula en períodos de lluvias ordinarias a extraordinarias; se acepta la posibilidad de transferencia mantiforme en crecidas extraordinarias a excepcionales;
- generalmente, es trazada con auxilio de planos geomorfológicos y topográficos, y el auxilio de fotointerpretación e interpretación satelital;

En estos sistemas, la transformación en tiempo y espacio del agua en el ciclo hidrológico tiene marcadas diferencias con el caso anterior.

En efecto, la producción de excedentes de escorrentía es significativamente menor, y en ciertos casos puede resultar muy reducida o nula. Las pérdidas del sistema se dan principalmente por flujos de evapotranspiración y se destaca la gran amplitud y variabilidad de sus componentes de almacenamiento. Las variables de *entradas*, *almacenamiento* y *salidas* para la ecuación de continuidad, por definición, asumen las siguientes características:

- El *almacenamiento por Intercepción* de lluvias o de retención transitoria en la masa vegetal es de magnitud importante en UEHs de vegetación densa, pero no en el caso más general de PHMP, donde ya se ha dicho que asume un valor muy reducido.
- El *almacenamiento superficial* y el *almacenamiento subterráneo* son una característica de estos ambientes, por su gran capacidad y variabilidad temporal, estacional, interanual.

El flujo que ingresa ( $I_t$ ), es principalmente por precipitación ( $dP/dt$ , para “P” expresada en unidades de volumen). Pero debe también considerarse las otras formas de ingresos a la UEH, por flujo superficial, subsuperficial o subterráneo, dependiendo de cada situación en particular y del trazado de la frontera del volumen de control.

El flujo saliente a través de la superficie de control ( $Q_t$ ), es reducido y pueden existir flujos salientes subterráneos de importancia si las características de su perfil geológico permiten fugas por percolación.

El flujo de salidas por *evapotranspiración* constituye la salida principal del sistema. Si el sistema es cerrado y no admite flujos de salidas por percolación, se admite que el flujo de pérdidas del sistema está conformado exclusivamente por las atmosféricas.

### **Almacenamiento-Inundación**

Por ello, estos sistemas se caracterizan por su fuerte variabilidad temporal y espacial, según el régimen, estacionalidad e inter-anualidad de las lluvias. En períodos cortos y húmedos donde las salidas atmosféricas son reducidas, la inundación (almacenamiento superficial), es la principal y la más natural respuesta del paisaje a las energías hídricas.

Siendo la *inundación* una forma de *almacenamiento*, “suprimir” la inundación es disminuir por acción antrópica el almacenamiento. Esto, modifica en consecuencia el mecanismo de transformación dentro del sistema, altera el equilibrio existente y modifica de forma equivalente el comportamiento de los restantes componentes. Esta transformación no será puramente “Hidrológica” sino que implicará alteraciones de distribución tempoespacial de energías, que afecta además a la biomasa vegetal<sup>8</sup>. En general, en el tratamiento de inundaciones se procura modificar la componente de escurrimientos (incremento del flujo de escorrentías superficial y subterránea a través de obras de canalizaciones y drenajes), lo cual acarrea además la consecuente alteración de los componentes de áreas hidrológicas vinculadas aguas abajo. Tales obras suelen tener cierta efectividad en precipitaciones de recurrencias bajas y medias, y ser inefectivas en recurrencias altas a excepcionales. La “eliminación” de la inundación” en estas condiciones, –y a veces, simplemente pretender su control-, suele ser una abstracción.

### **3.4. PROCESOS HIDROLÓGICOS EN PHM**

Los diferentes tipos de flujos de *entradas* y *salidas* y las variaciones temporales de *almacenamiento*, en los sistemas hidrológicos mixtos y sus variantes, tienen características variables e intermedias en función de las propiedades que los definen. En el cuadro siguiente, se resumen estas relaciones y la magnitud de las variables para Sistemas y Procesos Hidrológicos en PHM, y que constituyen propiedades que en su conjunto diferencian a uno u otro sistema.

---

<sup>8</sup> Ferttonani, M., (Centro Regional Litoral, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, Santa Fé, Argentina), desarrolló en la década de 1980 y hasta mediados de la década de 1990, importantes estudios de investigación en zona de llanuras que introducen y difunden el concepto de energía de paisajes y su modelo de energía en el estudio hidrológico.

**Cuadro Nro.: 3. Clasificación de los Sistemas y Subsistemas Hidrológicos Mixtos. Características que los definen.**

Sistema	UEH o Subsistema	Síntesis	Envolvente	Movilidad de la envolvente		Red Drenaje		
				Espacial	Temporal	Linealidad	Organización	Jerarquía
Sistemas Hidrológicos Básicos (Miguel Fertonani, G. Caamaño, et al) :								
<b>Típico (SHT)</b>	---	Puntual de Continuidad	Sí	No	No	Si	Si	Si
<b>No Típico (SHNT)</b>	---	No Puntual o Areal discontinuo	No	---	---	No	No	No
Sistemas Mixtos y Complejos en Terrazas (J. Serra):								
<b>Mixto (SHM)</b>	Típico-No Típico (TNT)	Puntual de Cuasi-Continuidad	Si	No	No	Si/No	Si/No	Si/No
	No Típico-Típico (NTT)	No Puntual o Areal discontinuo	No	---	---	No/Si	No/Si	No/Si
	Cuasi-Endorreico (CE)	Areal Unico	Si	No	Si ó No	Si	Si ó No	No
	Lagunar Encadenado (LE)	Areal Múltiple	Si ó No		Si	Si ó No	No	No
	Atípico (AT)	Temporal Indeterminado	---	Si	Si	Si ó No	Si ó No	No
<b>Complejos (SHC)</b>	---	Singular	Si	No ó-Si	Si	Si ó No	No	No

**Cuadro Nro.: 4. Sistemas y procesos hidrológicos de ambientes torrenciales en paisajes hídricos de meseta en la región patagónica (PHMP)**

SISTEMAS Y PROCESOS HIDROLÓGICOS, EN AMBIENTES HÍDRICOS TORRENCIALES PARA PAISAJES DE MESETA DE LA REGIÓN PATAGÓNICA (PHMP)																
Cuadro comparativo de Flujos de Ingresos y Egresos y variaciones temporales de almacenamiento (*)																
Sistema	UEH o Subsistema	Flujos de Ingresos					Variaciones temporales de Almacenamiento (dS/dt)					Flujos de Egresos				
		$I_p=(dP/dt)$	$I_{sr}$	$I_{ss}$	$I_{st}$	$I_{sr}$	$S_{st}$	$S_A$	$S_{ss}$	$S_{sr}$	$Q_{Es}$	$Q_{Ev}$	$Q_{Ep}$			
Típico (SHT)	---	Si		x		x	X / XX			X		XXX		X		x / X
No Típico (SHNT)	---	Si	X / XX	x / X		X	XXX			X / XX		x / X		XXX		x / X
Mixto (SHM)	Típico-No Típico (INT)	Si		x		X	X / XXX			X / XX		XX		XX		x / X
	No Típico-Típico (NTT)	Si	X / XX	x / X		X	XX / XXX			X / XX		X		XXX		x / X
	Cuasi-Endorreico (CE)	Si	x	x		X	XXX			XX		x		XX		x / X
	Lagunar Encadenado (LE)	Si	x	x		X	XXX			XX		X / XX		XX		x / X
Complejos (SHC)	Atrípico (AT)	Si	X / XX	x / X		X	X / XX			X		x		X / XXX		x / X
	---	Si	/ XX	x / X		X	X / XXX			X / XX		x / X		X / XXX		x / X
<b>Referencias:</b> Pp Flujo de Precipitaciones (en todas su formas) I <sub>sr</sub> Flujo de ingresos superficiales (encausados y mantiformes) I <sub>ss</sub> Flujo de ingresos sub-superficiales I <sub>st</sub> Flujo de ingresos subterráneos S <sub>it</sub> Almacenamiento por Intercepción de lluvias o en la masa vegetal (transitorio) S <sub>A</sub> Almacenamiento superficial (cuerpos de agua -lagos y lagunas; mallines; bañados y esteros; charcos-; y en flujos encausados y mantiformes, permanentes o temporarios) S <sub>ss</sub> Almacenamiento sub-superficial S <sub>st</sub> Almacenamiento subterráneo, en acuíferos libres y confinados Q <sub>Es</sub> Flujo por escorrentías superficial, subsuperficial, subterránea; encauzado o mantiforme Q <sub>Ev</sub> Flujo de Evapotranspiración Q <sub>Ep</sub> Flujo de Infiltración profunda (percolación), hacia capas inferiores al plano o base del V.C..																
Ref: Nulo / no corresponde Min. a Nulo Reducido Importante Principal / Muy Importante																

#### **4. LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO, EN PHM**

La fenomenología torrencial y el estudio de máximas crecidas adquieren complejidad por la gran cantidad de variables que intervienen en su análisis.

Se ha visto que existe una diversidad de métodos para el estudio de máximas crecidas. Muchos de ellos, son de aplicación para pequeñas y medianas unidades hidrológicas. De éstos, muchos también pueden ser utilizados para la estimación de crecidas en ambientes que reúnen características similares a los de meseta en la región patagónica o PHM.

La selección de la metodología para el estudio de caudales máximos involucra tres aspectos básicos: la *finalidad*, la *información técnica* y la *certidumbre* de los resultados

La finalidad, delimita el problema y establece restricciones, porque está asociada a una acción en la naturaleza y al impacto que esta acción provoca en el medio. O bien, a la reacción del medio por obras o acciones ya ejecutadas.

La información técnica, porque es la fuente de datos para resolver el problema por uno u otro método. Muchas veces, la información disponible debe ser complementada con relevamientos de campo y laboratorio cuyo costo y tiempo de realización compiten en la selección del método para satisfacer una finalidad determinada.

La certeza de los resultados, porque el grado de error o incertidumbre de éstos, guarda relación con las exigencias metodológicas que la finalidad de la obra u acción necesita, y a su vez, con la mayor inversión en recursos y tiempo de dedicación al cálculo.

Estos tres aspectos hacen a la selección del método o conjunto de métodos –de hecho puede optarse por más de uno-, según se desprende del siguiente análisis.

##### **4.1. LA FINALIDAD DEL ESTUDIO**

La finalidad del estudio condiciona la selección del método. De hecho, no podría por ejemplo, determinarse el caudal de diseño de un vertedero para una gran presa a partir de un simple cálculo expeditivo o empírico. El grado de incertidumbre o error propios de estos métodos proyectan sus resultados con una alta probabilidad de sobredimensionar, o bien de subdimensionar sus estructuras.

En el caso de obras hidráulicas, la magnitud, el costo, la complejidad, la seguridad, la vida útil, los daños tangibles e intangibles en caso de falla parcial o generalizada, son indicadores para seleccionar algunos y descartar la aplicación de otros métodos.

En general, para las grandes obras hidráulicas, se acepta la necesidad de establecer el caudal de diseño a partir de métodos estadísticos basados en series de datos hidrométricos. La extensión mínima de la serie, también debe guardar aquí relación con la magnitud de la obra.

En muchos países, para la construcción de presas, existe legislación que exige el cumplimiento de normas que relacionan el tiempo de retorno con la crecida de diseño. Por ello la metodología debe descartar aquellos métodos que no proporcionan esta información y con un grado de certeza acorde a la magnitud de la misma.

Además, es común disponer del aforo y registros hidrométricos de los emplazamientos de posibles presas, o de puntos cercanos, que permita el cálculo por métodos estadísticos. En nuestro País, la constante labor de Agua y Energía Eléctrica (AyEE) desde mediados de siglo XX -hoy la Secretaría de Recursos Hídricos- proveen de información de una amplia red hidrométrica nacional que comprende a las cuencas principales de vertiente atlántica, pacífica o endorreica en la Argentina. Se suman a ellos, las bibliotecas técnicas del INA (Instituto Nacional del Agua), Universidades Nacionales, las Direcciones de Hidráulica o Recursos Hídricos Provinciales, organismos técnicos municipales y otras entidades técnicas de jurisdicción nacional o provincial.

Muchas obras hidráulicas menores, aun de cierta complejidad pero de magnitud intermedia, pueden ser abordadas por métodos indirectos si no se dispone de datos. Esto es posible, siempre que una eventual rotura -parcial o generalizada- por superación del caudal de diseño no presuponga pérdidas humanas y daños cuantiosos. Pequeños diques de almacenamiento, azudes de nivelación, canalizaciones, protección de márgenes y corrección de torrentes, obras de ordenación de cuencas y vertientes, canales colectores, pequeños y medianos puentes, alcantarillas, vados, redes de drenajes pluviales urbanos, pueden ser bien resueltos por métodos hidrológicos clásicos, por simulación lluvia-caudal, y aún en casos, por métodos expeditivos o bien empíricos. Se incluyen aquí también, estudios de planificación de uso de espacios urbanos o rurales, de inundación en valles y costas de cursos de agua, estudios de impacto ambiental básicos o aplicados.

A modo de guía, se presenta en el cuadro una clasificación de obras u acciones en relación con los tipos de método de cálculo y orden de preferencia recomendados. Debe tenerse presente que la finalidad, guarda relación también con la información para la resolución del problema, en tanto delimita la asignación de recursos y plazo de ejecución del estudio.

**Cuadro Nro.: 5. PHM: Selección de métodos de cálculo y finalidad**

Tipo de Obra / Estudio	Descripción	Impacto en el medio por superación caudal de diseño	Método
Obras Hidráulicas Mayores	Presas y sus vertederos en general, puentes en grandes ríos,	Presupone pérdidas de vidas humanas y/o grandes pérdidas por daños	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadístico</li> <li>▪ Modelos Hidrológicos Distribuidos y Pseudodistribuidos de base física</li> </ul>
Obras Hidráulicas Menores Planificación del Uso de Espacios / EIA	Pequeños diques y azudes, protección de márgenes y corrección de torrentes, obras de ordenación de cuencas y vertientes, canales colectores, pequeños y medianos puentes, alcantarillas, vados, drenajes pluviales urbanos	No presupone pérdidas de vidas humanas. Daños importantes a reducidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadístico</li> <li>▪ Correlación</li> <li>▪ Hidrometeorológicos</li> <li>▪ Hidrológicos convencionales (Isocronas, Hidrograma unitario)</li> <li>▪ Modelos Hidrológicos Distribuidos y Pseudodistribuidos de base física</li> </ul>
Obras Hidráulicas pequeñas	Puentes y alcantarillas menores, vados, drenajes pluviales urbanos	Daños menores	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadístico</li> <li>▪ Correlación</li> <li>▪ Hidrometeorológicos</li> <li>▪ Hidrológicos convencionales (Isocronas, Hidrograma unitario)</li> <li>▪ Modelos Hidrológicos Distribuidos y Pseudodistribuidos de base física</li> <li>▪ Directos</li> <li>▪ Empíricos</li> </ul>

#### 4.2. LA INFORMACIÓN TÉCNICA

Una primera clasificación del problema, es sobre la disponibilidad de información hidrométrica. Las Unidades Hidrológicas que cuentan con información hidrométrica suficiente para el tratamiento estadístico, pueden encontrar a partir del cálculo estadístico y la teoría de probabilidades la relación funcional para caudales máximos y escorrentías con el período de retorno o recurrencia asociada

Si bien existen métodos indirectos perfeccionados, que pueden ofrecer un buen grado de apreciación de esos estimadores, los métodos estadísticos se imponen sobre los métodos indirectos por su mayor confrontación con la realidad observada. En general, siempre que exista información hidrométrica, se prefiere la aplicación de métodos de procesamiento estadístico. Sin embargo, hay una fuerte tendencia actual al uso de modelos hidrológicos distribuidos, con basamento físico, de última generación, donde los caudales máximos son inferidos a partir de la precipitación máxima posible y probable (PMP) sobre modelos digitales de terreno (DEM, Digital Elevation Models).

En unidades hidrológicas con pocos datos hidrométricos, los métodos de correlación hidrológica pueden ofrecer solución si éstos pueden encontrar una buena correlación con datos de mayor extensión de otra unidad hidrológica.

El problema que plantea este trabajo, se limita a unidades hidrológicas sin registros de niveles en los cursos de agua ni aforos, o bien con escasez de esos datos hidrométricos y topográficos.

La información técnica fácilmente disponible, es decir aquella que surge de una rápida recopilación de antecedentes, da el perfil de limitaciones que se dispone para seleccionar métodos. Identifica y orienta con ello la búsqueda de información adicional.

En algunos casos, producida la recopilación de información la selección del método puede ser resuelto sin más. Pero no es el caso más común. Por lo general, se requerirán relevamientos complementarios en campo o en laboratorio, que completarán los datos necesarios de uno u otro método.

Los gastos en estas campañas y el tiempo de realización constituyen una limitante que compite con la precisión del método a aplicar, ya que en general, a más información y calidad de los datos, habrá más precisión o menor incertidumbre. Inversamente, si se restringe la inversión en la información complementaria, habrá probablemente mayor incertidumbre en el resultado, mayor sobre-dimensionamiento o sub-dimensionamiento en las obras u acciones a proyectar, o en las reacciones a evaluar.

Podría sostenerse que hasta una a década a década y media atrás, los métodos hidrológicos de isócronas o método racional, o métodos de hidrogramas unitarios, en su aplicación convencional, eran los métodos preferibles para la resolución de problemas en cuencas sin datos hidrométricos. Los métodos de simulación matemática lluvia caudal se reservaban para problemas de cierta envergadura con buena información física de la unidad hidrológica y los métodos expeditivos y empíricos comenzaban a ser desechados por el alto grado de incertidumbre y confiabilidad en sus resultados. En los años recientes, como consecuencia del crecimiento tecnológico y particularmente de la industria electrónica, ha cobrado un vertiginoso impulso la industria de instrumental, equipamientos y medios para relevamientos en el campo de los recursos naturales. Hoy es común disponer de imágenes satelitales, fotografías aéreas y hasta de planos con relevamientos topográficos, catastro, trazados viales y de servicios.

También de mapas temáticos geomorfológicos, geológicos, de suelos, pendientes, cobertura vegetal y otros, que han permitido un gran avance y preferencia de los métodos hidrometeorológicos por simulación lluvia-escorrentía, particularmente, de los modelos basados en modelos digitales del terreno (DEM).

**Cuadro Nro.: 6. PHM: Selección de métodos de cálculo según su Información Técnica**

ESTIMACION DE CRECIDAS MAXIMAS EN AMBIENTES TORRENCIALES DE LA MESETA PATAGONICA															
METODOS DE CALCULO Y RELEVAMIENTO DE INFORMACION TECNICA															
Item	Información	Estadístico	Correlación	Hidrometeorológicos Simulación Lluvia Caudal				Hidrológicos convencionales / agregados					Modelos Hidrológicos Distribuidos y	Directos	Empíricos
				HEC-HMS (*)	GAIMAN-TORDISE	RAWSON (Áreas Llanas)	modelos simples	Racional	Rac./Isocronas	Triangular	Sneyder	Williams			
Hidrometría	Serie de caudales extensas	XX													
	Serie de caudales parciales o cortas		XX	x	x							x	X		
	Aforos y mediciones hidrométricas volantes		X	X	X	x						x	X	XX	
	Niveles y datos de interés de crecidas históricas		x	X	X	X	X	x	X	x	x	X	X	XX	
Precipitación	Precipitaciones diarias (serie histórica)			x	x								XX		
	Precipitaciones Diarias Máximas Anuales			X	XX		x						XX		
	Pluviogramas / Estudios IDR - PDR			X	XX	X	x	x				x	XX	x	
	Tormentas seleccionadas			XX	X	x	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	x	
Temperatura	Serie datos diarios ó Max Min Med mensual			X	X								X		
Humedad/PR	Serie datos diarios ó Max Min Med mensual			x	x								x		
Vientos	Serie datos diarios ó Max Min Med mensual			x	x								x		
Evaporación	Serie datos diarios ó Max Min Med mensual			X	X		x					x	x		
IMG Satelitales y Fotos Aéreas	Digital, todas las bandas			X	X								XX		
	Composición color área de estudio			X	X		x	x	x	x	x	X	XX		
	Fotogramas Escala regional			X	X	x	X	X	X	x	x	X	X		
	Fotograma Escala detalle			x	x	X	x		x			x	x		
Geomorfología	Mapa geomorfológico, nivel detalle			x	x								X		
	Mapa geomorfológico, nivel semidetalle			X	X	x	x	x	X			x	X		
	Mapa Divisorias, red drenajes, cuerpos de agua, comp.	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	XX	XX
Topografía	Relevamientos planialtimétricos detalle			x	x	x							X		
	Relevamientos planialtimétricos semidetalle			x	x	X			X			x	XX		
	Relevamientos planimétricos			X	X	X	x	X	X	x	x	X	XX		
	Perfiles longitudinales cauce principal			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Cotas de puntos singulares			XX	XX	XX	XX	X	X	X	X	X	x	XX	
Catastro y Servicios	Relevamientos catastrales / Sup. cub. edif.			X	X	X	x	X	X	x	x	x	x		
	Trazados viales			X	X	X	X	X	X			x	X		
	Trazas de servicios y caminos (gas, luz, cloacas, agua)			x	x	x			x			x	X		
Suelos	Mapa de suelos, nivel detalle			x	x										
	Mapa de suelos, nivel semidetalle			X	X		x	x	x			x	X		
	Análisis de suelos en puntos singulares			x	x	x		X	X	x	x	X	X		
	Ensayos de infiltración			X	X	X	x		x			X	X		
Cobertura vegetal	Mapa de vegetación, nivel detalle			x	x	x							x		
	Mapa de vegetación, nivel semidetalle			X	X	x	x					X	X		
	Datos en zonas singulares / Caract. General			X	X	X	X	X	X	X	X	X	x		
Geología	Mapa geológico regional			X	X		x					X	X		
	Mapa geológico de detalle			x	x							x	x		
	Perfiles Geológicos en secc. Singulares			X	X				x			X	x		
	Caracterización general			X	X	X	X	x	X	x	x	X	x		

Referencias: Clasificación de la Información disponible o relevante: XX: Requerible; X: Recomendable; x: opcional

En ciertos casos, la aplicación de estos métodos puede requerir de información adicional de campo o de laboratorio, con una inversión relativamente baja en relación al objeto o finalidad del estudio.

### 4.3. LA CERTIDUMBRE Y CALIDAD DE RESULTADOS

Dependiendo de las particularidades de cada caso y de la información técnica y calidad de la misma, en la siguiente tabla y a modo de guía indicativa se sindicaron los grados de preferencia de tipos de métodos en función de la calidad de resultados:

**Cuadro Nro.: 7. PHM: Guía indicativa de Métodos y Calidad de Resultados**

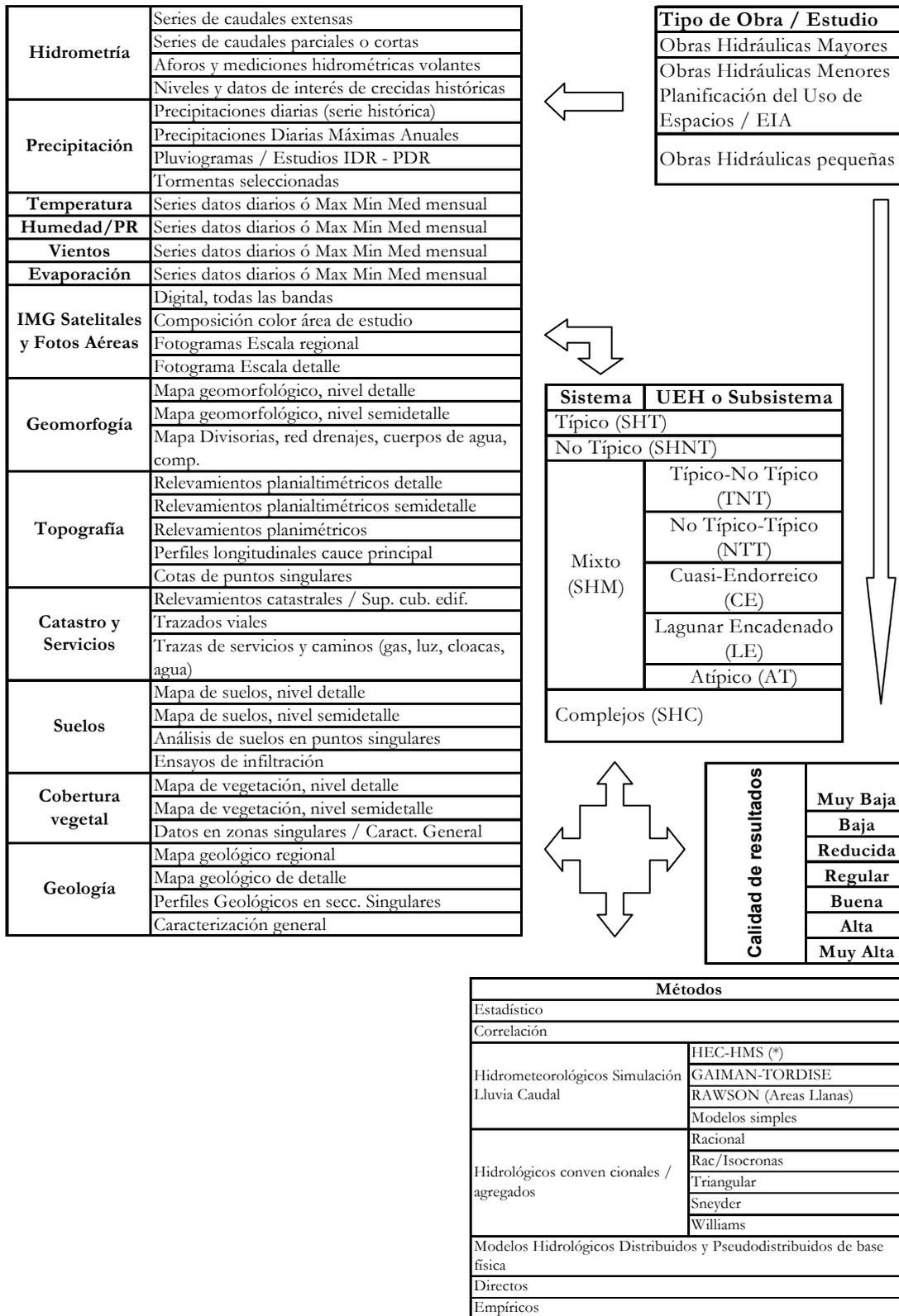
Método	Calidad de resultados						
	Muy Baja	Baja	Reducida	Regular	Buena	Alta	Muy Alta
Estadístico						X	X
Correlación				X	X	X	
Hidrometeorológicos			X	X	X	X	
Hidrológicos convencionales (Isocronas, Hidrograma unitario)			X	X	X		
Modelos Hidrológicos Distribuidos y Pseudodistribuidos de base física					X	X	X
Directos		X	X	X			
Empíricos	X	X	X				

Los métodos Directos en campo y Empíricos solo dan una idea de magnitud y se utilizan para la resolución de problemas simples donde no se dispone de información. Un ejemplo, cálculo de alcantarillas en caminos secundarios. En problemas más complejos, estos métodos se utilizan para apreciar el orden de magnitud de los caudales, previo a la aplicación de métodos de mejor resolución.

Los métodos hidrometeorológicos tipo lluvia-caudal, permiten un buen grado de aproximación en la estimación de crecidas máximas, cuando se dispone de suficiente información de alimentación y calibración de submodelos y modelos.

La modelación hidrológica agregada poco a poco va siendo desplazada por la modelación distribuida. Los modelos distribuidos, de base física, necesitan poca información hidrométrica histórica pero requieren de relevamientos topográficos que permitan generar modelos topográficos digitales. Permiten interactuar con GIS, CAD y otras aplicaciones, dar mayor información por celda y obtener resultados cercanos al caudal máximo físicamente probable.

**Cuadro Nro.: 8. PHM: Guía para la selección de métodos de cálculo del caudal máximo.**



## VIII- MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS MÁXIMAS Y SUS RESULTADOS EN PHMP

Como ya se ha señalado, existe una diversidad de modelos de simulación hidrológica que han demostrado su validez para la determinación del caudal máximo a partir de la lluvia de proyecto.

De los modelos agregados se destacan entre otros HYMO, ARHYMO, y muy particularmente un modelo que se ha difundido mucho en los últimos años, el HEC HMS, una versión actualizada del original HEC1.

El HMS, *Hydrologic Modeling System*, es producido por *Hydrologic Engineering Center, US Federal Government* producto con derechos reservados pero de dominio público (public domain). En su versión más reciente, bajo sistema operativo Windows, el sistema interactúa con una interfase gráfica para el manejo de los componentes a simular (laderas, cauces, redes de cauces, reservorios) y permite optar por diferentes submodelos de cálculo de las pérdidas (intercepción, evaporación, infiltración) y de propagación en laderas y de la onda de crecida en cauces. Sus resultados son expuestos en formato de tabla y gráficos en cada una de las componentes básicas modeladas.

De los modelos distribuidos, se han citado modelos en expansión como TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979, op. cit.), KINEROS (Michaud, 1994, op. cit.) o CASC2D for WMS (Julien, Saghafian y Ogden, 1995, op. cit.), aunque se desconocen aplicaciones en PHMP.

Como experiencias directamente relacionadas con este trabajo de investigación, se presentan seguidamente dos modelos seleccionados. Uno, el modelo GAIMAN -y sus complementos, modelos PRESAS y TORDISE-, un clásico simulador vectorial, del tipo agregado, cuyo desarrollo se iniciara hace dos décadas y evolucionara hasta su última versión (2000), base de cálculo de innumerables estudios y proyectos de obras hidráulicas concluidas o en planes de ejecución en la región. Otro, el modelo PIXEL, un modelo distribuido, de celdas o raster, formulado conceptualmente en el año 1999 y actualmente en desarrollo y experimentación.

### 1. MODELO GAIMAN-TORDISE

El modelo GAIMAN, -y sus aplicaciones de complemento PRESAS y TORDISE-, son herramientas desarrolladas originariamente para el análisis de crecidas máximas y

determinación de la tormenta de diseño en UEHs propias de pequeños y medianos cañadones en zonas de meseta de la región central patagónica.

### **1.1. RESEÑA HISTÓRICA.**

El modelo GAIMAN, tuvo su origen en la antigua Dirección General de Estudios y Proyectos del Ministerio de Economías Servicios y Obras Públicas de la Provincia del Chubut.

Su diseño inicial, se efectuó en el marco de un estudio realizado en 1983 para el control aluvional de la cuenca de un pequeño cañadón suburbano, el Cañadón Baraibar. Un cañadón ubicado en zonas de bardas, al norte de la ciudad de Gaiman -a unos 40km al Oeste de la ciudad capital, Rawson-, y que desagua al Río Chubut a través de su casco urbano (Fig. N°: 32).

El cuenco del Cañadón Baraibar tiene una extensión de 170 Has y por las características geomorfológicas, hidrológicas, su tamaño, e 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 PC de oficina, la antigua Olivetti P6060 con soporte en disco flexible de 8”.

Desde entonces, tuvo una actualización y mejora continua por la suma de experiencias y el mayor conocimiento de parámetros de submodelos que se experimentaba a través de distintas aplicaciones.

Hasta 1985, con esa versión del modelo se calcularon tormentas y caudales de diseño en esa cuenca (SHT) y en otras como el cañadón de las “1008 Viviendas” de la ciudad de Comodoro Rivadavia, los Cuencos Aluvionales uno (1) a cinco (5) de Puerto Madryn”, o del “Cañadón del Parque Industrial (PIT)” que drena sobre populosos barrios de la ciudad de Trelew (PIT).

Con la aparición de la PC-XT 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, y se lo readapta para generalizarlo al uso de cuencas torrenciales regionales de mayor complejidad, en lenguaje GWBasic de DOS para IMB-PC. (Serra y Clérico, 1989).

Posteriormente, es utilizado por dos proyectos de investigación, uno referido al estudio de crecidas aluvionales en el Valle Inferior del Río Chubut y otro específicamente del cuenco Aluvional que se desarrolla entre el Dique F. Ameghino y el paraje de Boca Toma. 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.

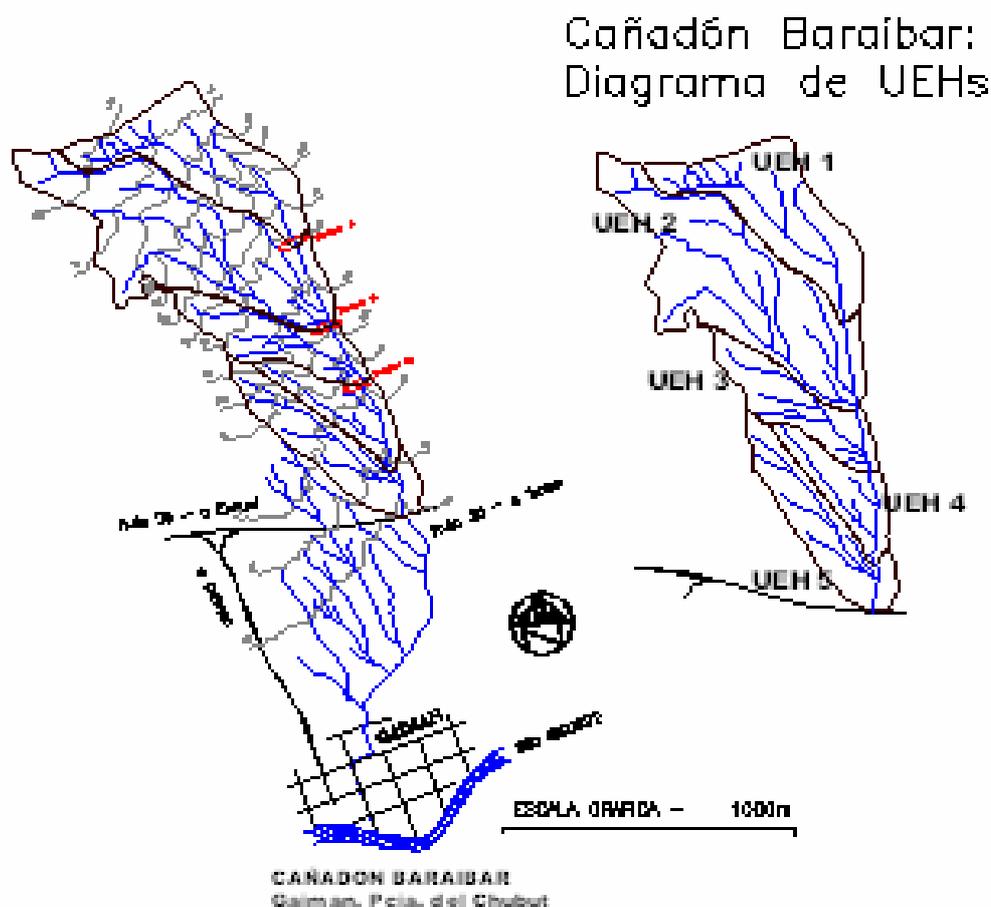
En el año 2000, tuvo su última actualización de versión, incorporando subrutinas y formatos especiales para la carga de variables y parámetros salida de resultados tabulados y en formato gráfico.

A diferencia de otros modelos o de su formato original en DOS, se ha preferido continuar con el formato VBA Excel bajo Windows, por la versatilidad para la presentación de datos de entrada y de resultados, facilidad de graficación y de intercambio de datos con otros programas.

El modelo no tiene uso comercial ni licencia, y desde entonces, su uso se ha limitado al ámbito del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de origen.

Además de los ejemplos ya citados, entre las aplicaciones más importantes se destacan las incluidas en las obras del “Plan de Obras de Emergencia de Control de Crecidas Aluvionales”, Informe de Revisión, Volumen 1 a 8, del 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.

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”.



*Fig. N°: 32. Cañadón Baraibar (Ubicación de Presas A, B y C de Laminación de Crecidas). A la derecha, diagrama de UEHs para sección de control en Ruta 25.*

## 1.2. REQUISITOS Y CAPACIDADES DEL MODELO GAIMAN

Esta herramienta, formulada inicialmente para el Cañadón Baraibar y posteriormente aplicado en otras cuencas similares, es un clásico modelo determinístico-agregado de lluvia caudal, de simple aplicación para sistemas y subsistemas típicos o cuencas (SHT), particularmente útil en UEH de zona de bardas. Las características morfo-hidrológicas descritas para los PHMP, definen las condiciones de borde del modelo. Con algunas limitaciones, puede aplicarse a diversos casos de SHM.

En general, se pretende resolver problemas de análisis de crecidas máximas que suponen escasez o ausencia de datos hidrométricos y que también es escasa la disponibilidad de datos e información física relevada de la cuenca.

La concepción y desarrollo del GAIMAN selecciona y pondera en grado diferente los distintos submodelos de simulación matemática que resuelven el balance hidrológico de

una UEH e impactan en el hidrograma de crecidas máximas, siendo sus principales suposiciones:

### 1.2.1. Aspectos físicos

- UEH pequeñas a medianas. Escaso desarrollo del cauce principal, (tiempos de concentración muy cortos).
- Intercepción reducida (vegetación arbustiva a suelos desnudos)
- Retención superficial baja a moderada (faldas de taludes bien conformados con escasas depresiones)
- Infiltración variada según los suelos, pero predominan los suelos superficiales de matriz arcillosa.
- Aporte subterráneo reducido, sin impacto relevante en la conformación del hidrograma de crecida (flujo de base nulo o despreciable).
- Red de drenaje bien conformada (temporaria, activa solo en crecidas)

### 1.2.2. Aspectos climáticos

- Clima semiárido, Precipitación anual<sup>9</sup> y media mensual baja.
- Pocas y aisladas tormentas de importancia durante el año hidrológico. Presencia de tormentas extraordinarias y excepcionales producidas generalmente por centros estacionarios de baja presión en zona costera del Océano Atlántico Sur, de muy baja 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 subcuenca).
- Ecuaciones de precipitación/intensidad, duración y recurrencia de tormenta conocidas (PDR / IDR)

En general, la incorporación de nuevas funciones o mejoras en los submodelos 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. Un ejemplo, es la valoración de las retenciones superficiales y de intercepción en cuencas medianas con sectores de reducidas pendientes y de depresiones.

---

<sup>9</sup> Precipitación anual de referencia de 180 mm.

### 1.2.3. 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  $Q_pDR$  / EDR / CDR (matrices de Caudales pico, escorrentías, coeficientes de escorrentía simulados).
- Entorno de soporte de la aplicación de simple importación y exportación de datos

### 1.3. COMPONENTES DE MODELADO

El GAIMAN es un modelo lluvia-caudal determinístico, del tipo agregado, discreto en tiempo y espacio. La unidad de superficie menor del cálculo agregado es la *Unidad Hidrológica de Estudio* UEH, en que se divide a una “cuenca” o unidad hidrológica mayor e independiente, tipo SHT. La UEH es pues la menor unidad de cálculo donde se resuelven para cada período de tiempo el balance de agua y se calcula el hidrograma o paralelogramo elemental de escorrentía y su propagación hasta la salida o síntesis de la cuenca.

El modelo a su vez, puede iterar el proceso de cálculo para un grupo de varias cuencas aportando hacia un cauce central -o bien de un sistema lagunar-, o de dos grupos de cuencas (uno para cada margen) que aportan a un cauce central (Fig. N°: 33).

Un ejemplo de este esquema de agrupamiento es la simulación del sistema del Cuenco Aluvional del área comprendida entre el Dique F. Ameghino y Boca Toma, en el VIRCh, Chubut, (Ref. Gráf. 1 y 5, y punto 2.1.), donde se modelan 32 unidades hidrológicas en dos grupos de 16 para cada margen del Río.

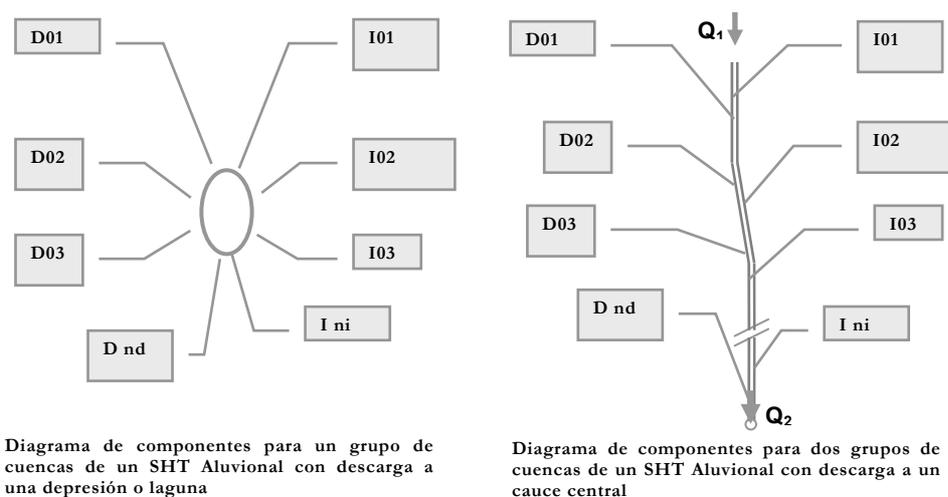


Fig. N°: 33. Diagrama de componentes de un SHT aluvional

#### 1.4. SUBMODELOS Y ALGORITMOS BÁSICOS DE CÁLCULO A NIVEL DE UEH

Para el cálculo de caudales máximos en cuencas torrenciales, el modelo parte de los algoritmos básicos del *método de los paralelogramos de escorrentía*, formulado tres décadas atrás por Monteanu (López Cadenas y Soba Baro, 1982, op. cit.).

Para mejorar el procedimiento de cálculo a nivel de cuenca y su integración en unidades hidrológicas de orden mayor, el GAIMAN agrega discretización areal y temporal de variables y parámetros. Las lluvias admiten distintas funciones de distribución en el tiempo y en el espacio, basadas en suposiciones teóricas o en tormentas reales e incorpora nuevas rutinas para el cálculo de los distintos subprocesos y también de propagación de la onda de crecida

##### 1.4.1. Balance hidrológico - Lluvia Neta

La ecuación del balance hidrológico y en un período “ $\Delta t$ ” dado, queda definida por la siguiente expresión:

$$(XV) \quad S = P - Z - I$$

S = Lámina de escurrimiento directo [mm]

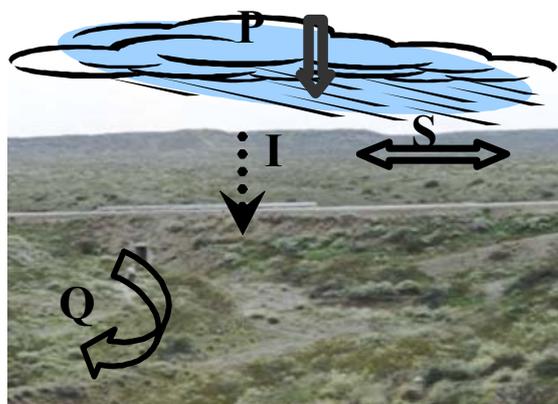
P = Precipitación [mm]

Z = Intercepción y Retenciones Superficiales [mm]

I = Infiltración [mm]

### 1.4.2. Distribución de la Precipitación (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 “ $P_0$ ” caída durante la tormenta admite la subdivisión en cinco intervalos iguales e independientes del paso de cálculo del modelo que representan la distribución temporal de la tormenta.

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

**Fig. N°: 34. Logotipo identificador del modelo <Gaiman>**

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 tablas de distribución, incluidas la lineal o uniforme, distribución propuesta por F. López Cádenas (Fig. N°: 35), y distribuciones de tormentas regionales medidas y seleccionadas. Particularmente, se destacan las tormentas extraordinarias en el VIRCh del 12 de Mayo de 1992 y del 24/25 de Abril de 1998. La primera, de gran extensión y mediana intensidad, con centro en el cuenco Aluvional del Area Dique-Boca Toma.

La segunda, concentrada en la región costera pero de gran intensidad y duración (máxima tormenta histórica registrada), totalizó un registro en la ciudad de Trelew de 254mm en 54 horas de lluvia, superando en más del doble a la máxima tormenta diaria registrada hasta la fecha.

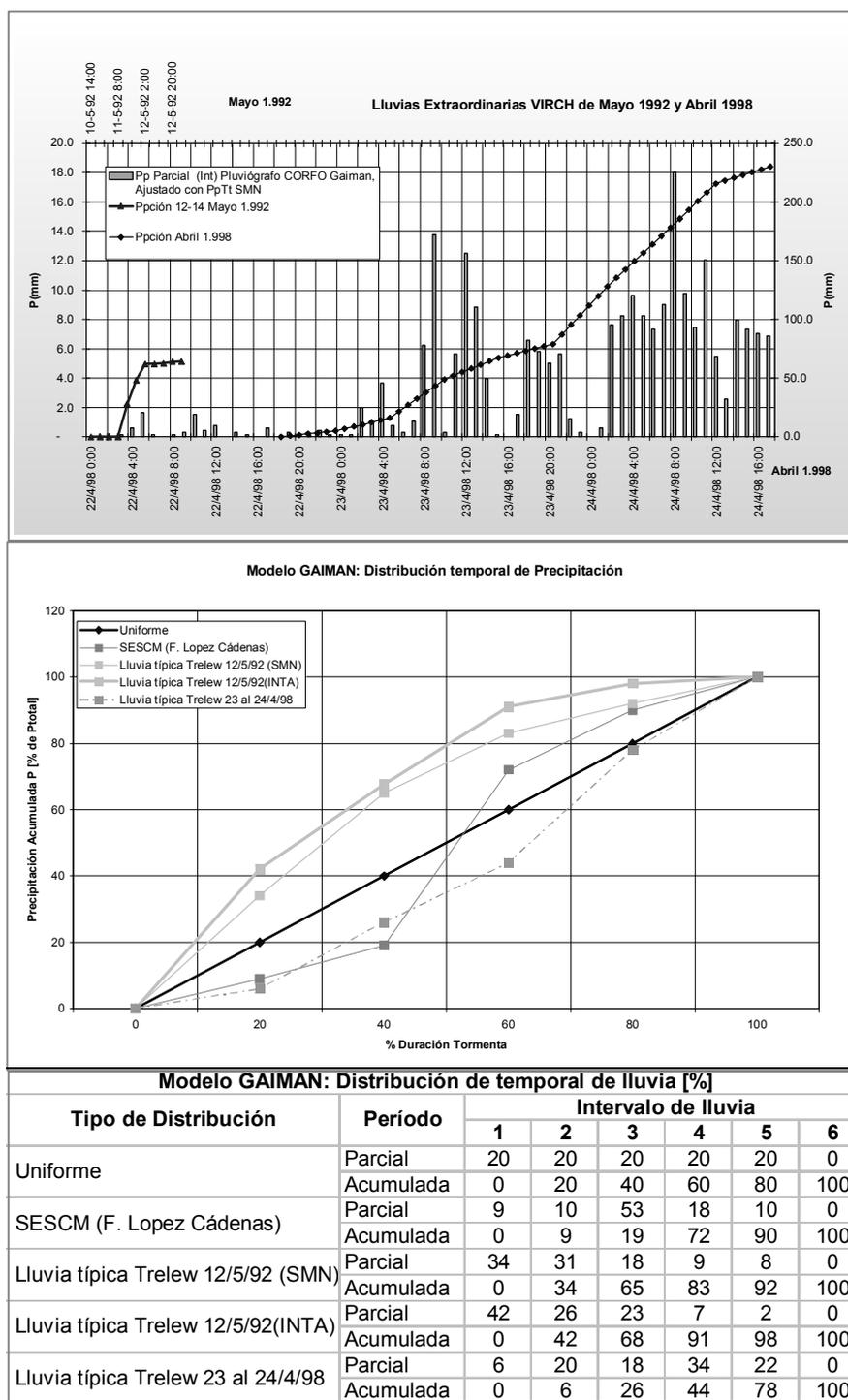


Fig. N°: 35. Modelo GAIMAN: Tormentas extraordinarias seleccionadas en el VIRCh y Distribución temporal de lluvias tipo

### 1.4.3. Retenciones Superficiales (Z)

Descripción		<sup>10</sup> Boldakov	
Terreno Liso, sin vegetación; roca		1	
Terreno liso, débilmente enyerbado		2	
Terreno con microdepresiones 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>PHMP: valores de Z experimentados en cuencas del VIRCh y Puerto Madryn<sup>11</sup></b>			
Cobertura vegetal/Superficial		Morfología	
		Pendientes débiles /Microdepresiones	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

**Cuadro Nro.: 9. 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

<sup>10</sup> Boldakov, E.V., Cantidad de precipitación retenida por la vegetación y por las microdepresiones del terreno, Rumanía, (López Cadenas y Perez Soba, op. cit.)

<sup>11</sup> N. de A.: Resumen de experiencias de calibración de simulación de escorrentías en cañadones del VIRCh y Puerto Madryn, en estudios, proyectos e informes de investigación, período 1984 a 2002.

depresiones suaves y homogéneas puede utilizarse Z como de evaluación conjunta de la interceptación y el almacenamiento superficial.

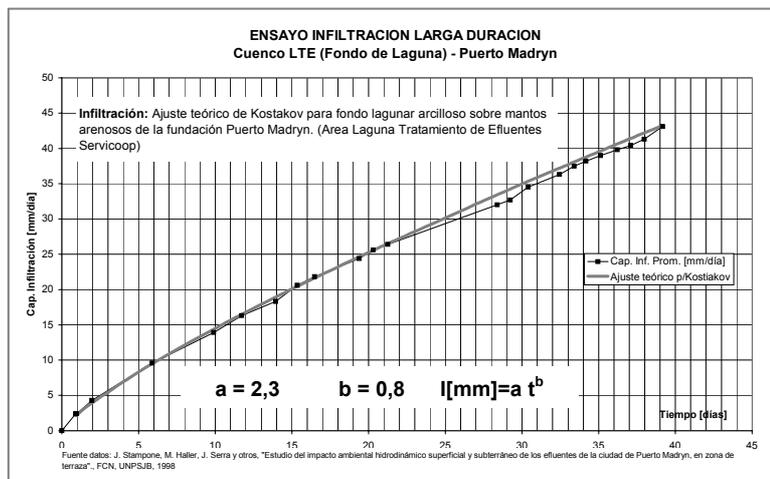
Este parámetro interviene en la calibración del modelo, particularmente de la curva de subida del hidrograma y se estima en base a coeficientes propuestos por distintos investigadores o bien adoptando las experiencias en PHMP estimadas a partir de calibraciones de tormentas medidas, según se muestra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

#### 1.4.4. Infiltración (I)

Para la estimación de la infiltración I [mm] en una UEH en un período de cálculo se utiliza el submodelo propuesto por Kostiakov (XVI) . Este es el parámetro de mayor sensibilidad del modelo.

El ajuste, se efectúa con una red de infiltrómetros que miden este proceso en distintos suelos representativos de la UEH o por defecto, utilizando curvas características de suelos recomendados por distintos autores o de funciones teóricas suelos característicos experimentados en PHMP.

$$(XVI) \quad I = a * t^b$$

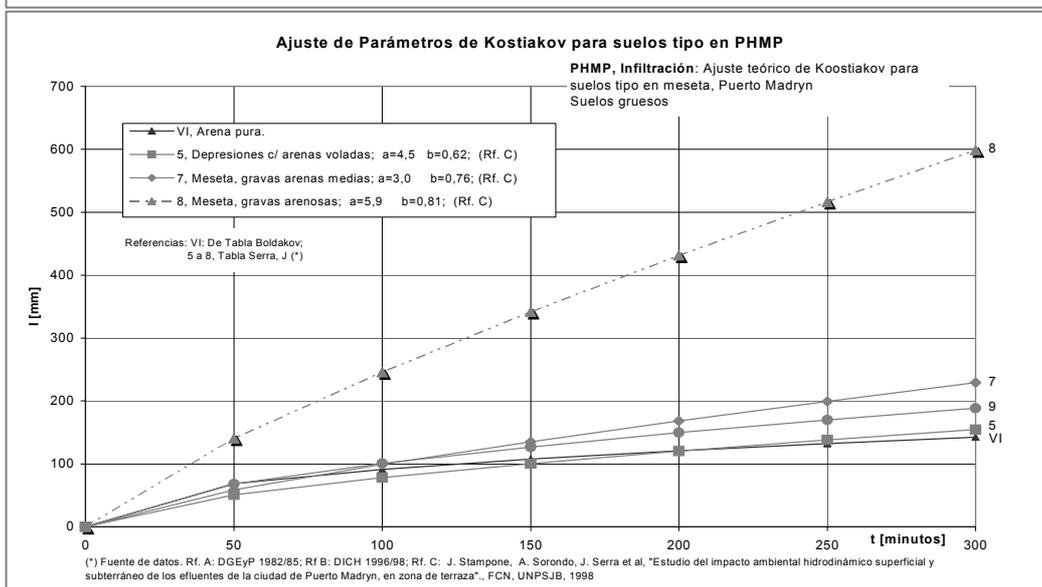
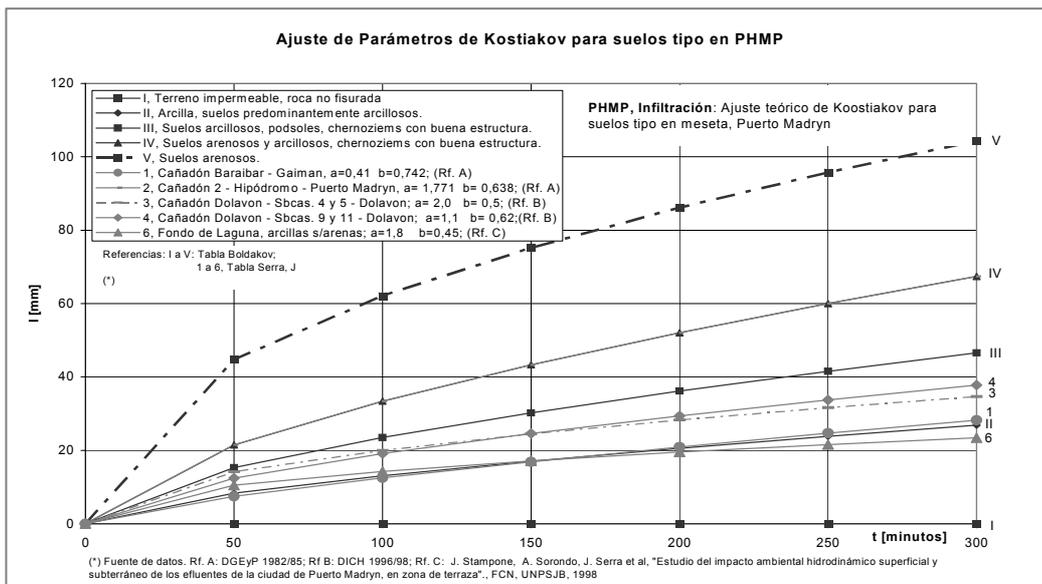


El Ensayo de caso en Fig. N°: 36, verifica con una Infiltración Básica Ib cercana a 1mm/día.

La expresión de mejor ajuste de Kostiakov resulta (XVII) :

$$(XVII) \quad I = 2,3 * t^{0,8}$$

**Fig. N°: 36. Ensayo de larga duración. Fondo de laguna, área de Meseta, Zona de Puerto Madryn. (Ref.: Fig. N°: 20)**



**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	1, Cañadón Baraibar - Gaiman, a=0,41 b=0,742; (Rf. A)
II, Arcilla, suelos predominantemente arcillosos.	2, Cañadón 2 - Hipódromo - Puerto Madryn, a= 1,771 b= 0,638; (Rf. A)
III, Suelos arcillosos, podssoles, chernoziems con buena estructura.	3, Cañadón Dolavon - Sbcas. 4 y 5 - Dolavon; a= 2,0 b= 0,5; (Rf. B)
IV, Suelos arenosos y arcillosos, chernoziems con buena estructura.	4, Cañadón Dolavon - Sbcas. 9 y 11 - Dolavon; a=1,1 b= 0,62;(Rf. B)
V, Suelos arenosos.	5, Depresiones c/ arenas voladas; a=4,5 b=0,62; (Rf. C)
VI, Arena pura.	6, Fondo de Laguna, arcillas s/arenas; a=1,8 b=0,45; (Rf. C)
Referencias: I a VI, Tabla de Boldakov	7, Meseta, gravas arenas medias; a=3,0 b=0,76; (Rf. C)
1 a 9, Serra J. (*)	8, Meseta, gravas arenosas; a=5,9 b=0,81; (Rf. C)
	9, Meseta, gravas con arenas y finos menores; a= 7,3 b= 0,57; (Rf. C)

(\*) 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

**Fig. N°: 37. 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.**

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 tabla y gráficos del Fig. N°: 37 y su tabla siguiente.

#### 1.4.5. Cálculo del Caudal parcial aportado por la UEH en el período de cálculo

El cálculo del caudal sigue el procedimiento básico de la fórmula racional:

$$Q\left[\frac{m^3}{s}\right] = 0,167 * \frac{S[mm]}{T[\min]} * A[Has] \quad ; \quad E[m^3] = Q\left[\frac{m^3}{s}\right] * T[\min] * 60$$

En la expresión, S es la Lluvia directa o neta estimada en el período, T el *paso* de tiempo de cálculo del modelo, A la superficie de aportes de la UEH y 0,167 un factor de conversión de unidades para expresar el caudal Q en m<sup>3</sup>/s, E, la Escorrentía en m<sup>3</sup>.

#### 1.4.6. Propagación de Q en el período de cálculo, desde la UEH al Punto de síntesis de la cuenca C

El método de propagación adoptado para el hidrograma elemental, desde el pié de la UEH hasta la salida de la cuenca es el método lineal de los paralelogramos de escorrentía.

##### *a. Método de propagación directa de los paralelogramos de escorrentía*

En el esquema de la Fig. N°: 38, cada paralelogramo representa la escorrentía (S) de cada UEH causada por una Lluvia Neta P<sub>v</sub>, 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 T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> 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.

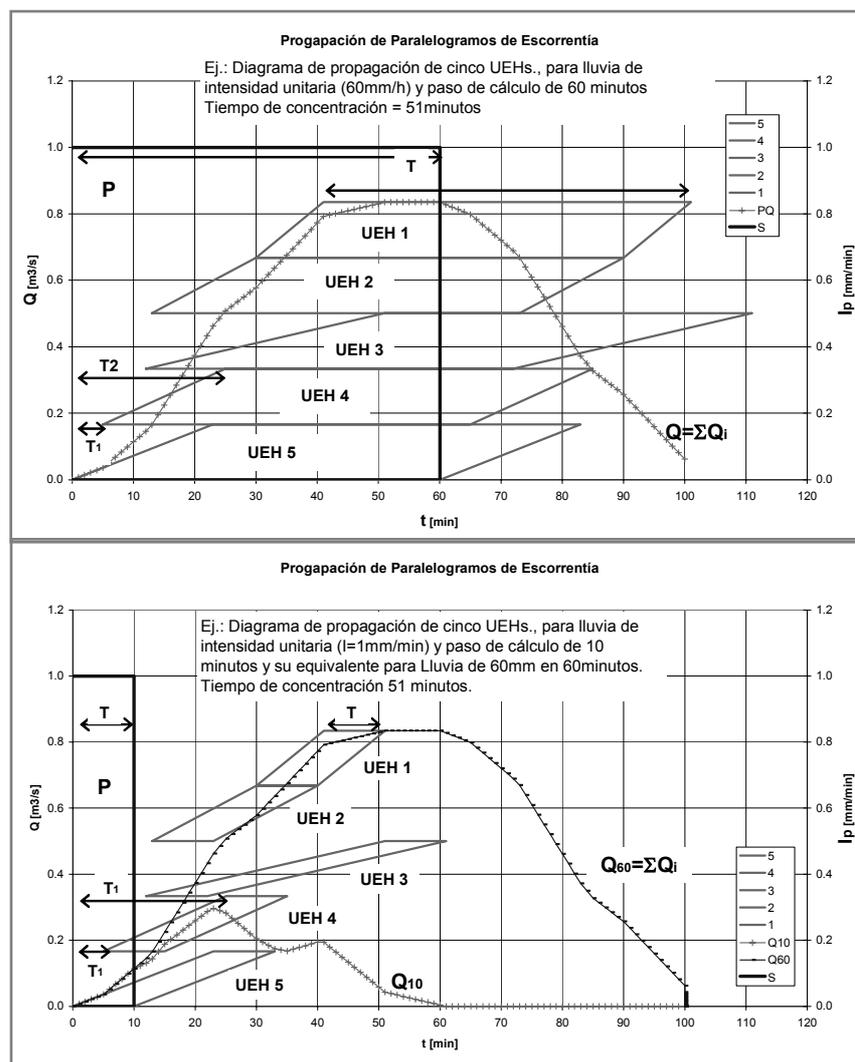


Fig. N°: 38. Diagrama de Propagación, (paralelogramos de escorrentía): Esquema un período de cálculo, para una lluvia unitaria (1mm/minuto) en cinco UEHs unitarias, de tiempos desplazados y en. Comparación de un “paso” de cálculo similar al tiempo de concentración y un “paso” de  $1/6 T_c$ .

De acuerdo a la Teoría del Hidrograma Unitario, los hidrogramas resultantes para cada cuenca y para cada período de cálculo son acumulados en sus respectivas bandas temporales para la obtención del hidrograma resultante de la lluvia total ingresada.

En el diagrama de bloques del Fig. N°: 40, puede observarse el procedimiento de cálculo y sus nidos de iteraciones a nivel de cuenca.

Finalizado el cálculo del hidrograma para una lluvia completa y una cuenca dada, el modelo puede repetir el procedimiento para un grupo de cuencas.

**b. Propagación por el método de la onda cinemática de Muskingum Cunge**

Los caudales de un grupo de cuencas obtenidos al pie o salida de cada una, si descargan a un cauce principal o Río, pueden ser propagados a una sección de control única

ubicada aguas abajo. Para la propagación en cauce el GAIMAN utiliza los algoritmos conocidos del método cinemático de *Muskingum Cunge* de traslación de ondas de crecidas en cauces naturales, que modela el almacenamiento volumétrico de la creciente (Fig. N°: 39).

Sus parámetros de ajuste son dos. La constante de almacenamiento “K”, que 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 otro parámetro es “x”, adimensional, con valores que varían en un orden de 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 río en el cálculo.

$$Q_{S_2} = C_0 * Q_{E_2} + C_1 * Q_{E_1} + C_2 * Q_{S_1}$$

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 “C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>” 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, ( C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>)=1

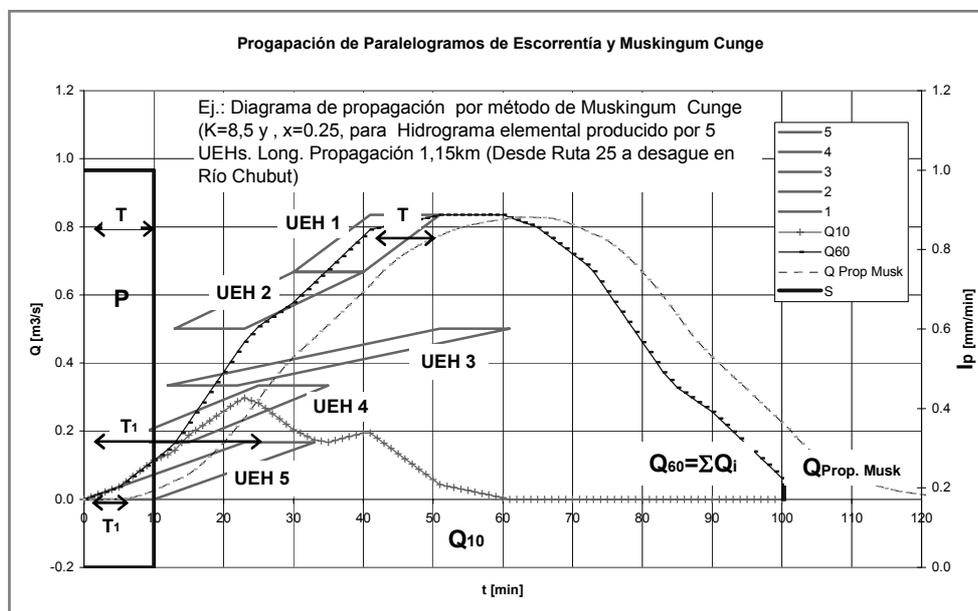


Fig. N°: 39. Diagrama de propagación de Hidrograma Elemental producido por un grupo de UEHs hasta un punto de tramo de Río o cauce principal distante aguas abajo.

En el modelo GAIMAN, los parámetros “K” y “x” son ingresados como datos para cada cuenco independiente en función de las características morfológicas del cauce principal, de la celeridad estimada para la onda de crecida y de la longitud del tramo.

Con la propagación de la onda de crecida, el modelo perfecciona el desplazamiento de la onda integrada por el aporte de varios cuencos hasta el punto o sección de interés común en el Río. En versiones particulares del modelo, se incluye esta función como opción de propagación dentro de cada UEH con la finalidad de obtener una mejor atenuación de la forma del hidrograma en la salida de cada cuenco.

Debe tenerse presente, que la propagación directa del método de los paralelogramos produce un desplazamiento de la onda y no su atenuación. El método cinemático de Muskingum Cunge produce ambos efectos.

En Fig. N°: 40 y Cuadro Nro.: 10 se resume el diagrama de bloques de los principales procesos de iteración y cálculo del modelo, incluidos los nidos que reproducen el cálculo cuenca a cuenca y tormenta a tormenta de diferentes duraciones y períodos de retorno.

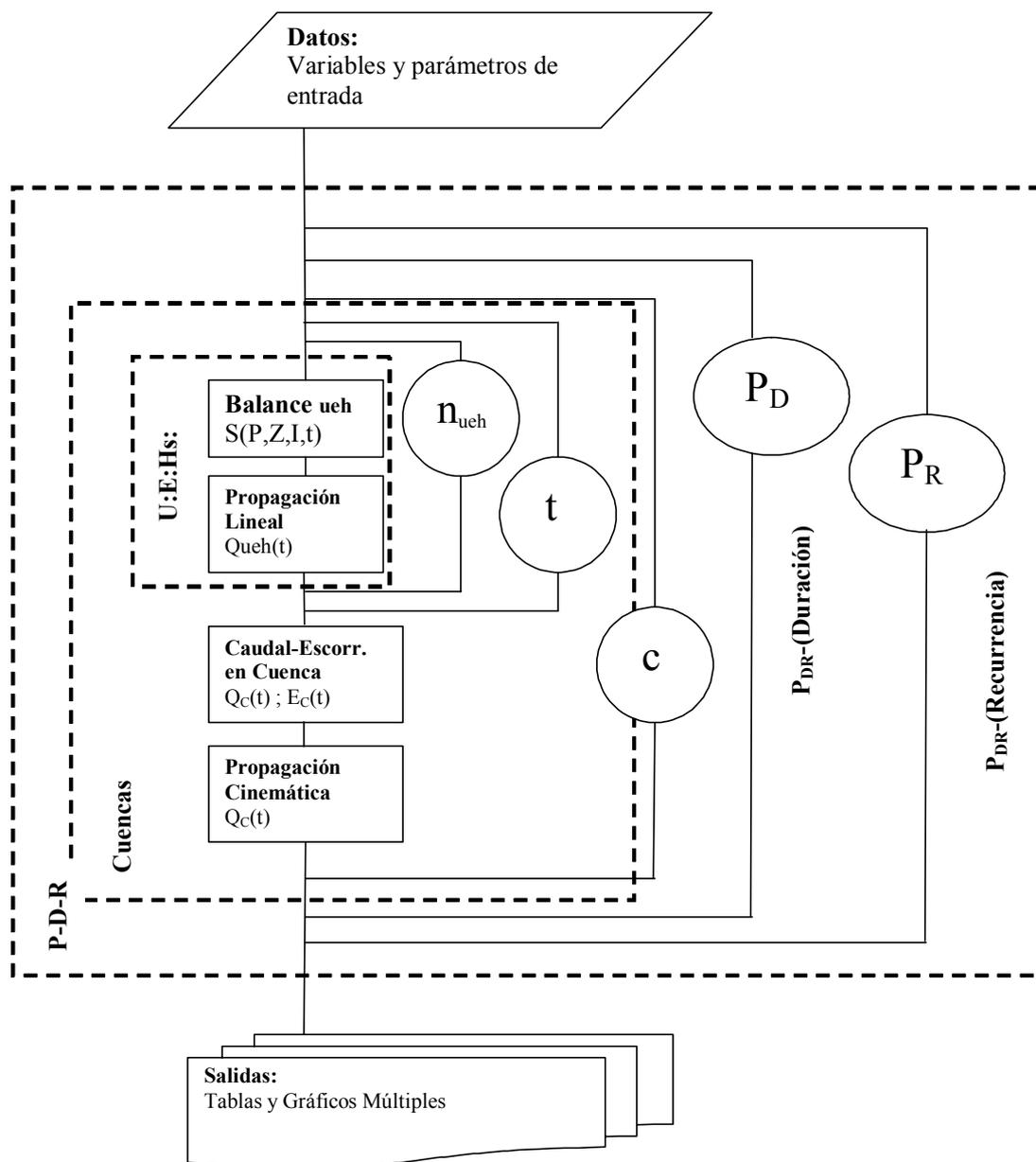
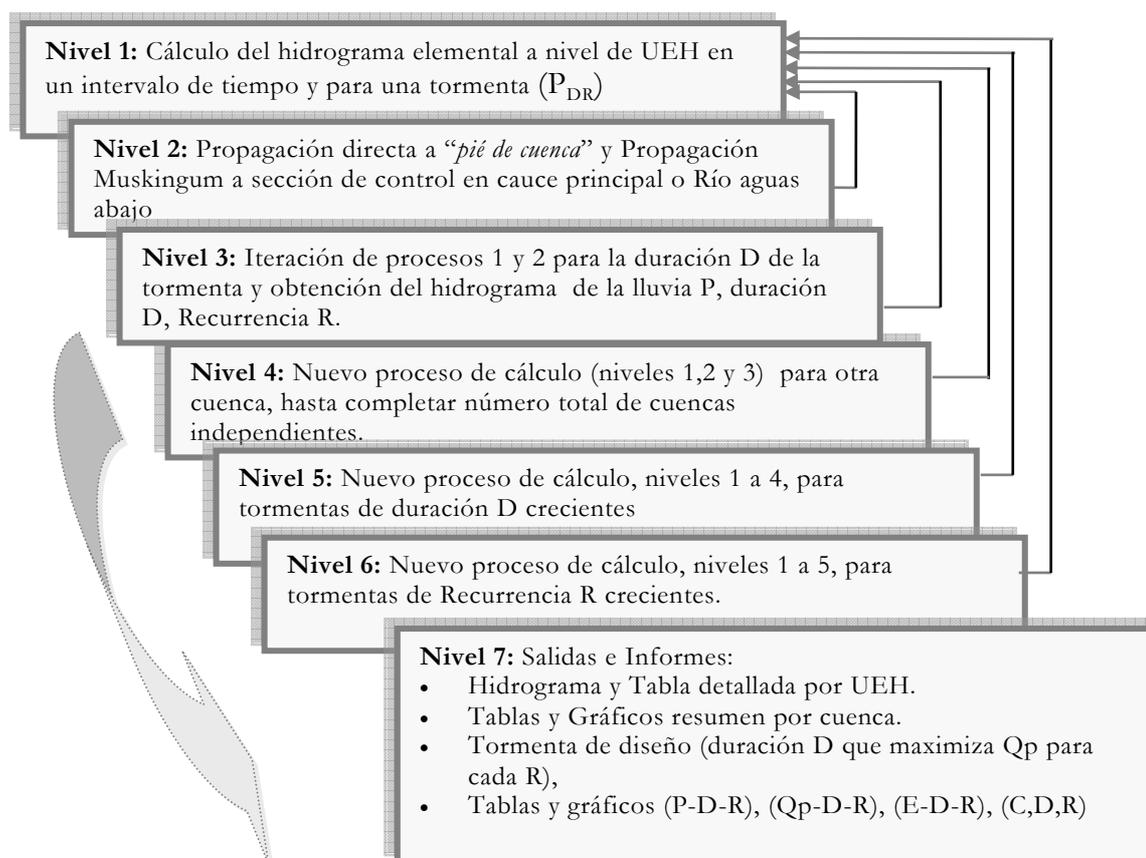


Fig. N°: 40. GAIMAN- TORDISE: Diagrama de Bloques de Proceso



**Cuadro Nro.: 10. Diagrama de niveles de cálculo y procedimientos**

Referencias: P (Precipitación); t, (tiempo, en intervalos o *pasos* de cálculo); Z (Retenciones Superficiales); I (infiltración);  $Q_{UEH(t)}$ , caudal UEH en el período instante “t”,  $n_{UEH}$ , número de subcuencas o unidades de estudio hidrológico; c, cuenca;  $Q_{c(t)}$ , Caudal de cuenca en el instante “t”,  $E_{c(t)}$ ;  $P_D$ , Tormenta de precipitación “P” y duración “D” para una recurrencia dada.  $P_R$ , Tormentas de Precipitación y Duración para Recurrencia “R” años.

### 1.5. NIDOS DE TORMENTAS, PROGRAMA TORDISE

El GAIMAN corre para tormentas individuales, pero se integra con una herramienta auxiliar, el TORDISE. El sistema permite el estudio de Caudales Máximos y la determinación de la Tormenta de Diseño a partir de las ecuaciones de tormentas o tablas de Precipitación [mm] – Duración [min] y Recurrencia [años], (Tablas PDR), que representan a lluvias sintéticas derivadas del estudio de tormentas regional. La configuración del programa permite seleccionar Duraciones y Recurrencias estándar sobre las que se desea modelar o presentar informes de salidas. El modelo corre primero una misma tormenta en una cuenca. Luego, toma otra cuenca independiente

hasta completar el número de cuencas. Completada la simulación de una tormenta en todas las cuencas, se incrementa la duración de la tormenta de una misma recurrencia. Finalmente, incrementa la recurrencia o retorno para repetir el procedimiento de todas las PDR solicitadas.

Terminado los procesos, se obtienen como resultados el hidrograma (gráfico y tabulado) de cada cuenca y las tablas y gráficos que resumen los caudales pico, escorrentía y coeficientes de escorrentía para cada cuenca y para cada tormenta.

De estos gráficos, puede obtenerse la tormenta de diseño de cada recurrencia, es decir, la duración  $D$  de tormenta que maximiza el caudal pico.

Con esta información, produce el gráfico de Caudales Máximos para la tormenta de diseño seleccionada de cada recurrencia .

En esta región, se dispone de abundante información hidrometeorológica y datos históricos de PHMP, que permiten contar con información de tormentas extraordinarias de distinta ubicación y extensión y estudios de tormentas (PDR) que se actualizan periódicamente.

## 1.6. CALIBRACIÓN

Siendo el GAIMAN un modelo de tipo lluvia-caudal para la estimación de *crecidas máximas* en cuencas torrenciales de *cursos temporarios*, la calibración del sistema admite simplificaciones de simulación hidrológica que acotan el problema, por cuanto se suponen:

- Condiciones previas de humedad en la cuenca cercana a la Infiltración Básica (Ib);
- Caudal inicial nulo (aunque el modelo admite como dato un caudal inicial mayor que cero);
- Condiciones previas de humedad en retenciones superficiales reducidas a medias;
- Lluvia generalizada en todo el cuenco (tipo agregado), aunque el modelo admite discretizar la lluvia en tantas áreas como UEHs se haya subdividido la cuenca.
- 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);

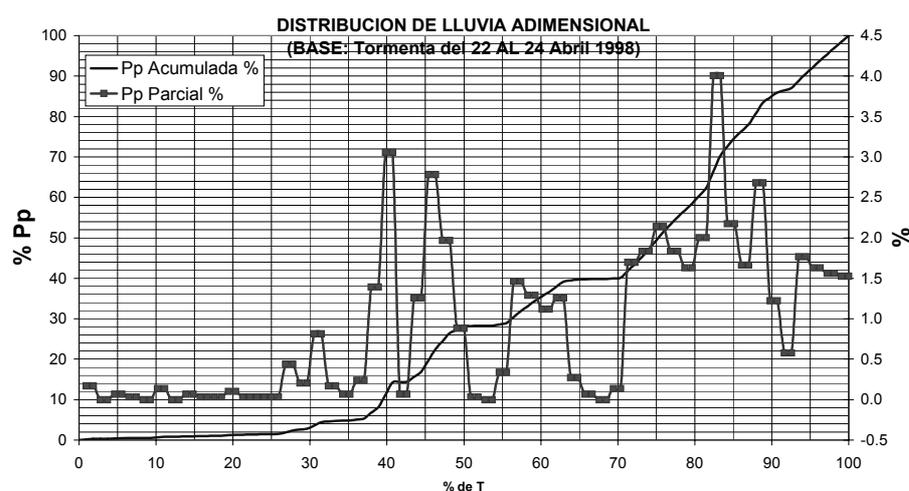
Con estas suposiciones y los parámetros de entrada definidos para la simulación, la carga de datos y calibración sigue el siguiente orden conveniente:

- Carga de datos físicos de la cuenca, basados en mediciones físicas directas:

- UEHs: Longitudes de trayectorias más cercanas y más lejanas en *ladera* y cauce de *primero*, *segundo* y *tercer* orden, hasta el pié de la cuenca y *longitud de propagación* por cauce principal aguas debajo de esta sección hasta la sección de control final.
- Area de las UEHs
- Carga de parámetros estimadores de Propagación:
  - UEHs: Velocidad media de la “gota” en ladera y en cauces de primero, segundo y tercer orden: Se sugiere considerar las características morfológicas del tramo de cauce para tormentas extraordinarias. Puede aproximarse por mediciones directas o bien por estimaciones teóricas recomendadas por distintos autores o basadas en experiencias previas en PHMP. El modelo incluye tablas y fórmulas de aproximación de distintos estos estimadores.
  - UEHs: Ajuste de velocidades en ladera y cauces: Para el tiempo de concentración obtenido por el método de propagación directa, se aconseja efectuar un ajuste que resulta de incrementar o decrementar proporcionalmente estas velocidades de viaje de la “gota” para ajustar el tiempo total a un tiempo de concentración equivalente al que se obtiene con la fórmula del Método de California utilizado por el S.C.S. u otro criterio similar.
  - Ajuste de parámetros de Muskingum Cunge ( $K,x$ ): Para la determinación de estos estimadores se siguen los pasos de determinación práctica propios de este método cinemático, muy difundido en la bibliografía clásica de Hidrología. En su defecto, suele estimarse a partir de la celeridad de la onda de crecida, y ésta, en función de la velocidad media de las aguas en el cauce y la morfología del tramo.
- Carga de parámetros de evaluación de las Retenciones:
  - UEHs, retenciones Superficiales ( $Z$ ): Como primera aproximación, se utilizan valores tabulados recomendados por distintos autores o de experiencias previas en PHMP que se encuentran tabuladas en el modelo ( Ref. Cuadro Nro.: 9);
  - UEHs, Retenciones por Infiltración: El modelo utiliza un parámetro de humedad inicial equivalente al “t” de lluvia para alcanzar ese estado de humedad. En PHMP este parámetro se adopta en un mínimo de 50 minutos y un máximo de 200 minutos (o tiempo equivalente desde el inicio del ensayo de infiltración a humedad teórica “cero”). Los parámetros “a” y “b” de la *Ecuación de Kostiakov* se ajustan a los

obtenidos de los ensayos de infiltración en las respectivas UEHs. En su defecto, se los estima en base a las características granulométricas de los suelos con las curvas de ajuste propuestas para los suelos tipo. (Ref. Fig. N°: 37). Estos parámetros, son los más sensibles en la calibración del modelo y merecen mayor atención y medición en suelos de matriz arenosa.

- Otros Parámetros auxiliares:
  - Corresponde informar el *Número de Cuencas*; el *Número de UEHs* por cada Cuenca; el *Paso* de cálculo del modelo; el *Número de períodos* de cálculo; el *Número de subdivisiones del Paso* para los informes de salida (hidrograma);
  - Títulos y Subtítulos que generaran los informes;
- Variables de entrada:
  - Precipitación: El modelo admite el ingreso de una tormenta (PDR) o de una tabla de tormentas PDRs para su simulación integrada;



**Fig. N°: 41. Ej.: Distribución de Tormenta en el VIRCh s/ Mayo 1998 (adimensional)**

- Función de distribución: Corresponde seleccionar la función de distribución temporal de la tormenta. Una distribución no uniforme con concentración de la lluvia al final de la tormenta dará como resultado caudales mayores. En PHMP, se usan lluvias tipo de la región (Mayo 1992, Abril 1998, Fig. N°: 41);
- Corridas de calibración
  - Efectuada la carga de datos, se observan y comparan los resultados con un hidrograma medido. En su defecto, con puntos de paso conocidos (aforos durante una tormenta). En muchos pequeños cuencos, no es posible disponer en la etapa de calibración de hidrogramas o datos de

aforo; en este supuesto, se aconseja comparar parámetros con cuencas vecinas en PHMP similares.

- Los ajustes de *escorrentía* pueden efectuarse en primera aproximación con los parámetros “a” y “b” de Kostiakov, y seguidamente con el parámetro “Z”.
- Los ajustes de *forma del hidrograma*, de su *tiempo de concentración*, o del tiempo de “LAG”, pueden efectuarse corrigiendo los parámetros de *velocidad media* de la gota en *ladera* y *cauces de primer, segundo y tercer orden* de cada UEH.

Siendo que en general las UEHs no disponen de datos hidrométricos y dado la incertidumbre que es propia de los métodos de simulación en estas condiciones, se aconseja utilizar el modelo GAIMAN y comparar sus resultados con otros métodos similares que permitan inferir un rango de certeza para los valores obtenidos.

El GAIMAN, por ser un modelo “abierto”, ofrece un ágil manejo de la información de *entrada y salida*, con los datos “a la vista”, en formato de tablas y gráficos, que facilitan el ingreso, modificación, importación y exportación de datos.

Otra ventaja respecto a otros modelos y métodos, es la integración de tormentas que brinda un abanico de resultados para un espectro de PDR muy amplio.

La comparación con otros métodos, puede reducirse a seleccionar tormentas tipo, cercanas a la de diseño que se intenta modelar.

### **1.7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN GAIMAN TORDISE**

Como ejemplo de corridas de explotación, en la sección Apéndice (Fig. N°: 42), se detalla una actualización de simulación para el Cañadón Baraibar -inspirador dos décadas atrás de este modelo-, en la sección de control de su cruce por Ruta Nacional Nro. 25.

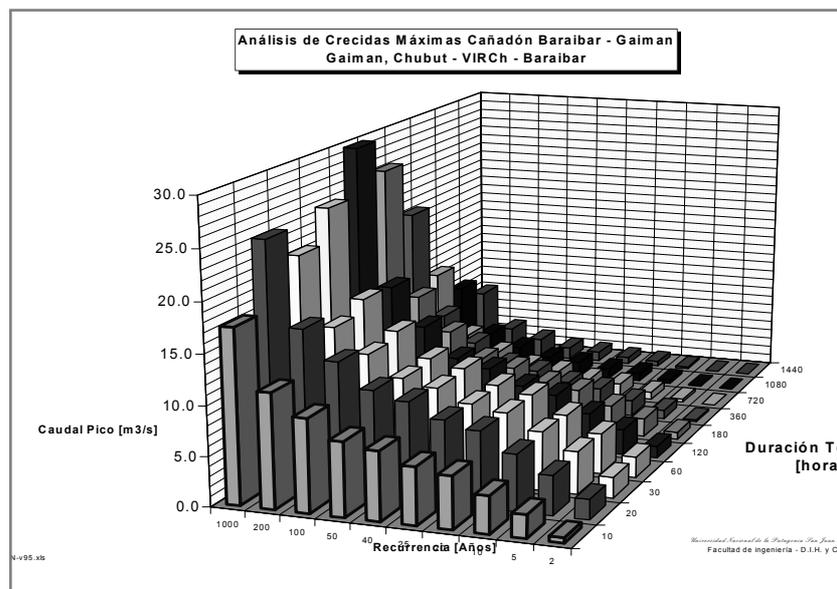
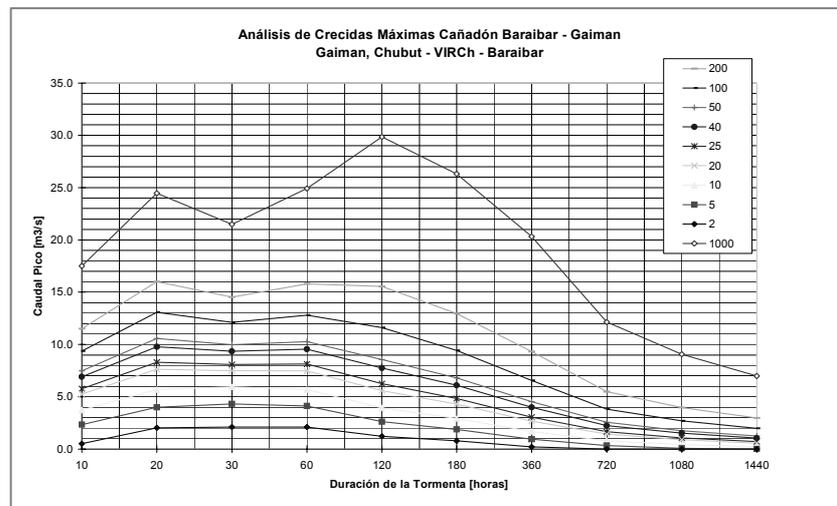
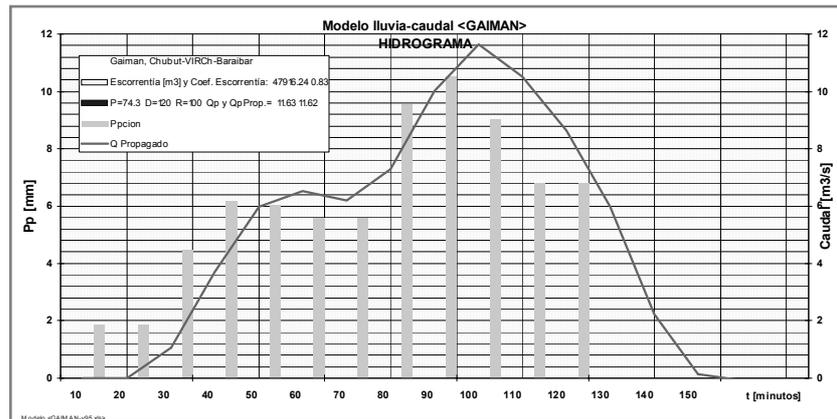


Fig. N°: 42. Ejemplo de salidas seleccionadas para corrida de explotación del modelo GAIMAN en Cañadón Baraibar, ( $P=74,3\text{mm}$ ,  $D=120$  minutos,  $R=100$  años)

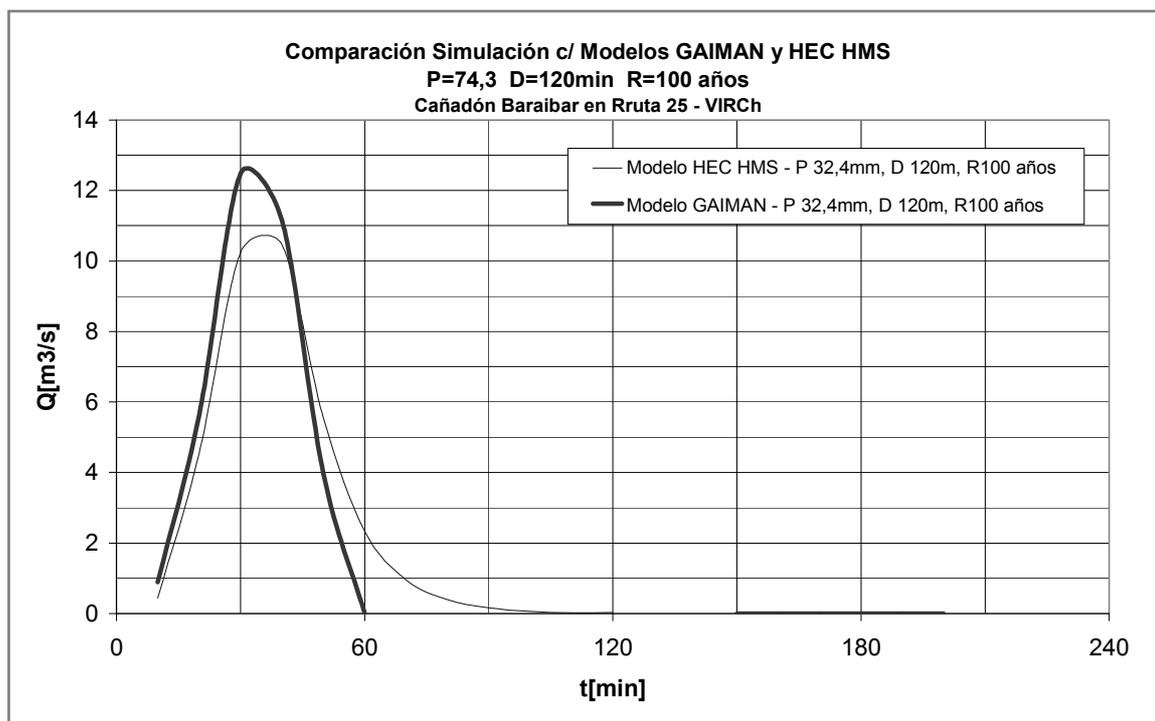
En el mismo apéndice, se presentan pantallas de configuración, carga de títulos, parámetros físicos de las UEHs, precipitación y otros datos de entrada.

Seguidamente, hidrogramas obtenidos en formato tabla y gráfico y los ábacos de Caudal Pico-Duración Recurrencia, de Escorrentía y de Coeficientes de Escorrentía integrados para un abanico de 100 tormentas sintéticas PDR, con el gráfico final de selección de caudales máximos por recurrencia.

### 1.8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS (MODELO HEC HMS)<sup>12</sup>

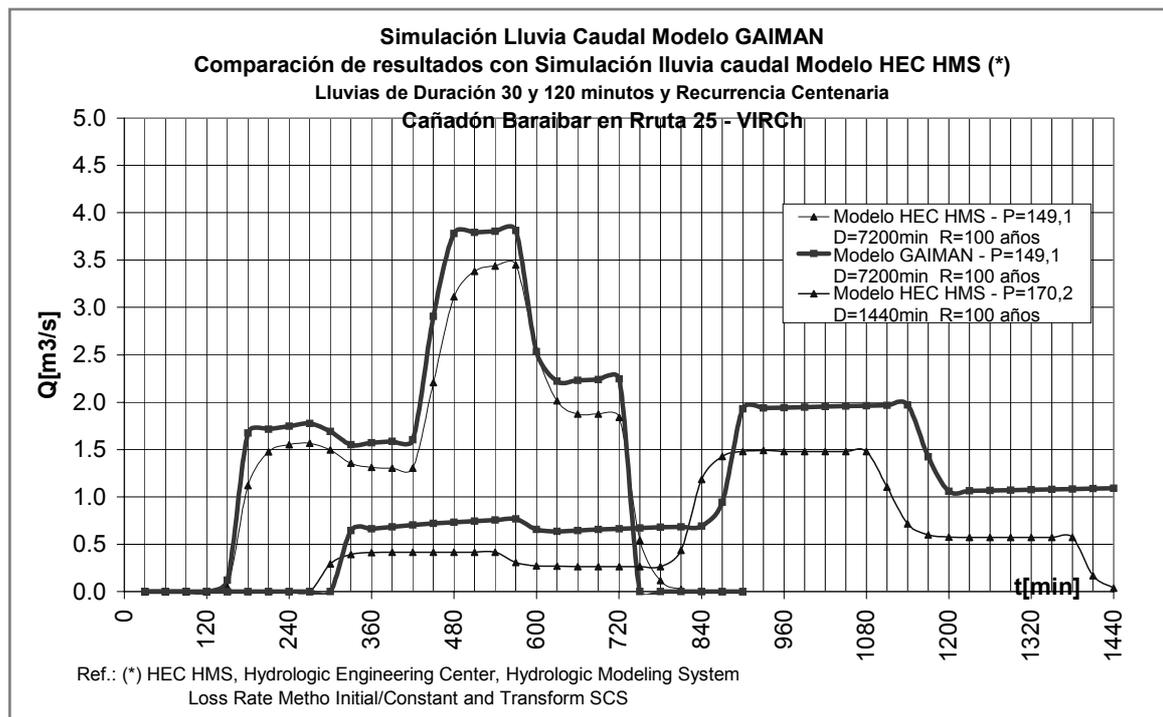
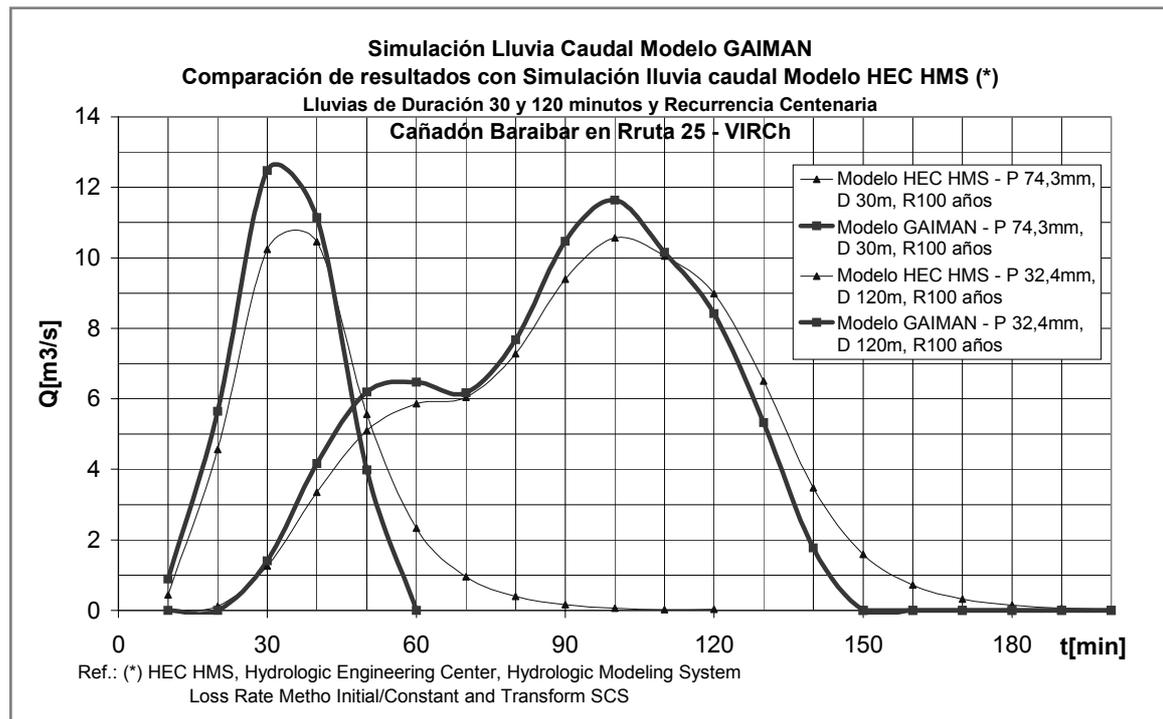
A continuación (Fig. N°: 43 y Fig. N°: 44. Fig. N°: 53 a Fig. N°: 61, y Cuadro Nro.: 11 a Cuadro Nro.: 16, Fig. N°: 79, Fig. N°: 80 y Cuadro Nro.: 22 del apéndice) se presenta una comparación gráfica de hidrogramas de crecidas máximas que resultan de simular tres tormentas de recurrencia centenaria sobre el Cañadón Baraibar, con el modelo GAIMAN y el modelo hidrológico HEC HMS. (Hydrologic Model System, Hydrologic Engineering Center, US Federal Government) (Fig. N°: 62, Cuadro Nro.: 17, Cuadro Nro.: 18, Cuadro Nro.: 19 Fig. N°: 63. del apéndice)

Los parámetros de carga utilizados para ambos modelos son los mismos, y similares criterios para el caso de aquellos parámetros de submodelos diferentes.



**Fig. N°: 43. Cañadón Baraibar, VIRCh: Hidrogramas de crecida centenaria p/ Modelos GAIMAN y HEC HMS**

<sup>12</sup> Modelo de simulación lluvia- caudal HEC HMS, Hydrologic Model System, producido por Hydrologic Engineering Center, US Federal Government: Simulación Cañadón Baraibar, en Ruta 25., Gaiman, Chubut. (comparación de resultados con modelo simulación lluvia caudal GAIMAN). (Cap. XII, Apéndice, Sección 2.



**Fig. N°: 44. Cañadón Baraibar, VIRCh: Hidrogramas de crecida centenaria p/ Modelos GAIMAN y HEC HMS. R= 100 años, Duración 30 y 120 minutos.**

En general, los resultados son satisfactorios. El modelo GAIMAN, presenta tiempos similares pero picos ligeramente mayores, producto fundamentalmente de los distintos submodelos de propagación.

### 1.9. EMBALSES Y DEPRESIONES: MODELO PRESAS

El sistema GAIMAN-TORDISE admite la integración con una tercera herramienta, el programa PRESAS, que permite la corrida simultánea con simulación de presas de embalse (o depresiones naturales) con función de almacenamiento-caudal conocida, y ha sido muy utilizado para el estudio de presas de laminación de crecidas. Las presas pueden ser únicas o bien conformar sistemas distribuidos en cascada y/o en paralelo.

Ha sido utilizado en el estudio y diseño de diversas pequeñas presas de control de crecidas en el VIRCh y Puerto Madryn. En su última versión, fue utilizado para el estudio y proyecto de reformas de presas de laminación de crecidas en el Cañadón del Parque Industrial de Trelew realizado por la Facultad de Ingeniería de la U. N. Patagonia San Juan Bosco en el año 2000 (Fig. N°: 45).

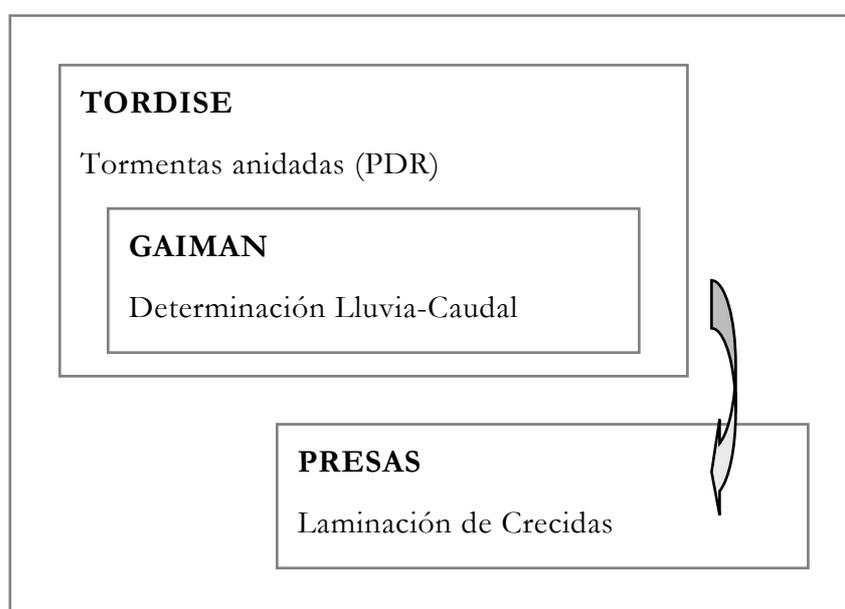


Fig. N°: 45. Diagrama de Bloques de Interacción de Programas

## 2. MODELO DISTRIBUIDO “PIXEL”: FORMULACIÓN CONCEPTUAL

La vertiginosa expansión de la informática, de la tecnología satelital, los sistemas de información geográfica SIG y la mayor disponibilidad de uso civil de estas innovaciones, tuvieron también su impacto en la modelación hidrológica.

En los últimos años, los modelos hidrológicos agregados basados en técnicas vectoriales, fueron perdiendo espacio para dar lugar al nacimiento de una nueva generación de modelos que crece al amparo de estas nuevas tecnologías y de la enorme capacidad de memoria de las computadoras personales actuales. Son los modelos distribuidos basados en MDT, Modelos Digitales de elevación del Terreno, (DEM, Digital Elevation Models).

Estas técnicas han dado origen a modelos en formato raster, que tienen la particularidad de analizar el balance hidrológico a nivel de pequeñas celdas, cuadradas y uniformes, a partir del procesamiento de información satelital y de una base de datos DEM del área de estudio. En este contexto de oferta tecnológica, el **PIXEL** es un modelo de simulación hidrológica que actualmente está en experimentación y desarrollo.

Los diagramas básicos se formularon en el Proyecto de Investigación “Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos”, de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

Este nuevo modelo hidrológico para PHMP, está basado en un sistema de herramientas o utilitarios integrados, de última generación, para la simulación de mapas de riesgo hidrológico y determinación de hidrogramas de crecidas en formato cuasi 3D.

En su concepción, se procura una metodología integrada de programas y utilitarios que, aprovechando las características y ventajas que ofrecen cada una de estas aplicaciones, se inserten rutinas de simulación con el objeto de producir en formato raster distintos mapas temáticos de riesgo aluvional, de riesgo erosivo y de inundabilidad para una tormenta sintética dada.

Los programas seleccionados son aplicaciones CAD, Hoja de Cálculo Programable y procesador GIS. Las aplicaciones seleccionadas corresponden al entorno de Autocad para la interacción con aplicaciones gráficas, de IDRISI for Windows para el procesamiento digital de imágenes satelitales y de Visual Basic for Application (VBA Excel) para la programación hidrológica.

El modelo, bautizado “PIXEL”, efectúa el análisis hidrológico a nivel de celdas. Los datos de entradas y las salidas revuelcan en celdas de Excel, que representan “pixel a píxel” la imagen satelital de la Unidad Hidrológica de estudio, y su proceso puede efectuarse con programas en VBA. El sistema CAD, participa en la toma de datos, digitalización, mediciones gráficas, mapeo de curvas de nivel, produciendo información de entrada (vectorial) al sistema sustentado en Excel (raster).

En general, para esta modalidad las experiencias se realizan en UEHs de tamaño reducido. Para áreas de proyecto mayores la manipulación de Hoja de Cálculo Programable se complica, y puede ser preferido el uso convencional de archivos intercambiables y programas en lenguaje C o VB. En pequeñas áreas hidrológicas, VBA Excel tiene las ventajas de dar mayor agilidad para la carga de datos, disponer de la información “a la vista”, producir con rapidez y simpleza tablas, gráficos e informes y fácil movilidad para el intercambio de datos con otras aplicaciones (importación y exportación).

El GIS IDRISI, participa en el sistema con una serie de rutinas programadas para alimentar el modelo hidrológico (VBA). Una vez producida la corrida del modelo, Idrisi presenta sus resultados en mapas temáticos volcados sobre la imagen satelital procesada (mapas de riesgo aluvional, de riesgo erosivo, de riesgo de inundabilidad).

El PIXEL es un modelo actualmente en desarrollo. Los ensayos de propagación efectuados han sido en teoría satisfactorios y justifican ingresar en su fase de experimentación con pequeñas cuencas. De sortear con éxito los resultados experimentales, este conjunto de nuevas técnicas integradas facilitará la evaluación, diagnóstico, manejo de aguas e impacto de distintas obras de infraestructura en PHMP. Otra gran ventaja sobre los modelos agregados es la posibilidad de aplicación en Sistemas Típicos (cuencas), No Típicos (Llanuras) y Mixtos, por cuanto son simulaciones basadas físicamente en modelos digitales del terreno MDT (DEM).

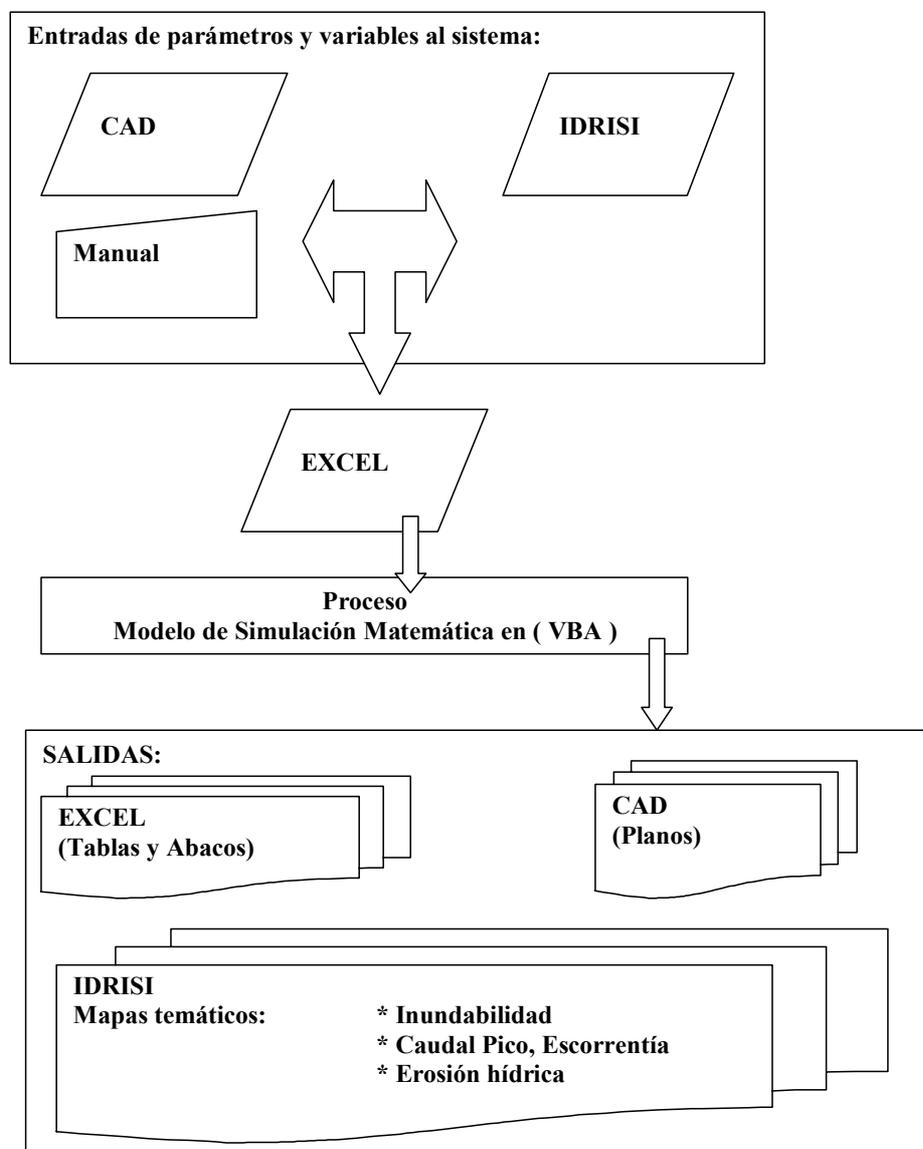
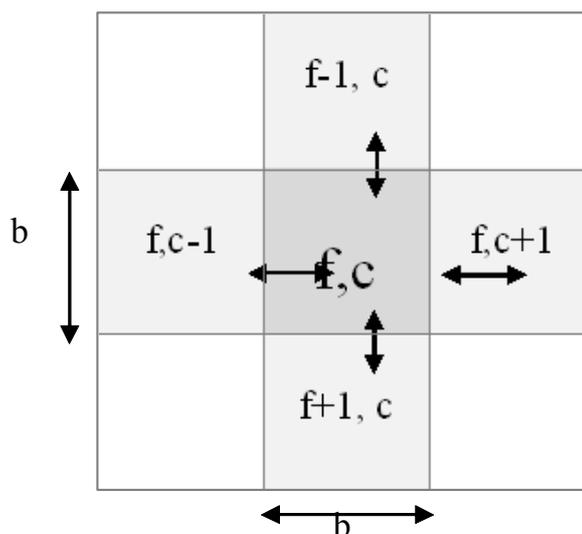


Fig. N°: 46. Diagrama de bloques de utilitarios, entradas y salidas:

A modo de ejemplo de aplicación, el trazado de una nueva ruta u obra de infraestructura de envergadura, puede ser analizado con mapas temáticos simulados "antes" y "después", representados por mapas de aguas superpuestos en la imagen satelital, donde cada pixel informa en tales mapas su caudal, esorrentía, altura de agua y eventualmente, producción de sedimentos.

En el Fig. N°: 46, se muestra un diagrama con los principales bloques de simulación y de propagación de las aguas superficiales que sustentan la investigación y formulación conceptual de este modelo.

En el diagrama (f=fila y c= columna), se referencia la propagación de esorrentía de



celda a celda en la forma de un *kernel* de 3x3. El balance de continuidad propuesto, efectúa el cálculo de las celdas en sus dos direcciones (f,c), donde “b” es el ancho de pixel (30m para IMG Landsat TM)

Para un período dado, se compara la Cota del pelo de agua ( $H_{pa}$ ) del pixel con c/u de las cotas de sus celdas vecinas. Si ésta cota es mayor, la celda eroga un volumen unitario dado (ddh) hacia la o las celdas que cumplen esa condición.

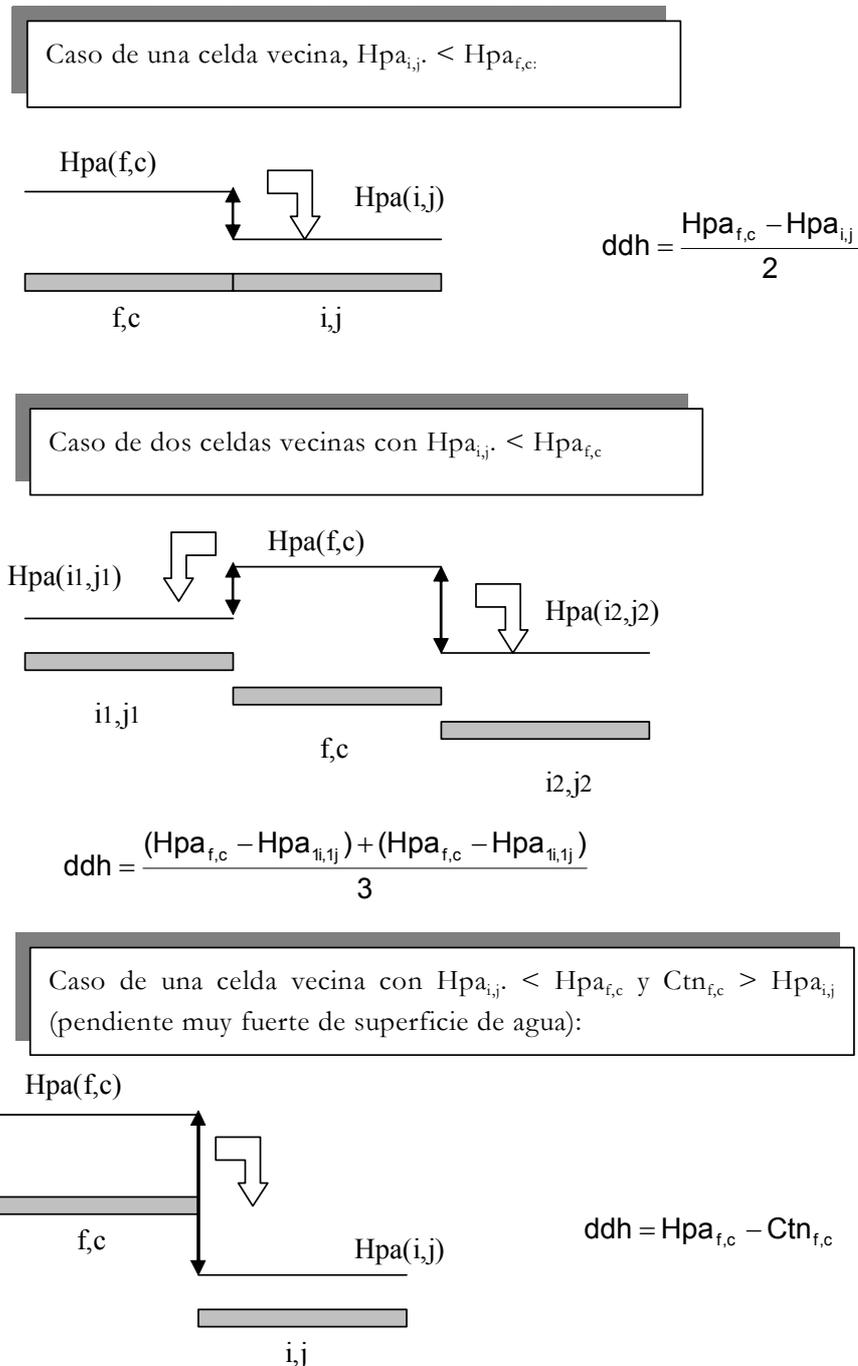
**Fig. N°: 47. Diagrama de propagación de flujo superficial en celdas**

El volumen “ddh” de derrame hacia cada celda vecina con cota de pelo de agua inferior, es función de la diferencia entre ambas cotas. Este derrame, supone la búsqueda de equilibrio de niveles entre las cinco celdas y se ajusta proporcionalmente al número de celdas vecinas en condición de recibir agua, según los siguientes criterios de propagación:

- a) Condición normal (pendiente reducida): Si la celda central de análisis supera en cota de pelo de agua a una o más de las vecinas, el volumen de derrame se distribuye con las siguientes proporciones:

Cantidad de Celdas que $H_{pa_{f,c}}$ es mayor	Proporción de volumen que derrama
1	1/2
2	1/3
3	1/4
4	1/5

- b) Condición para pendiente muy fuerte: Si  $Hpa_{f,c} \gg Hpa_{i,j}$  (pendiente muy fuerte de la superficie de agua, de la celda central respecto al píxel de comparación), y se satisface también la condición de que la cota del terreno natural  $Ctn_{f,c}$  del píxel en análisis es mayor que la cota de la superficie de agua del píxel de comparación  $Hpa_{i,j}$  se asume que el primero derrama el máximo volumen posible hacia el segundo (Fig. N°: 48).

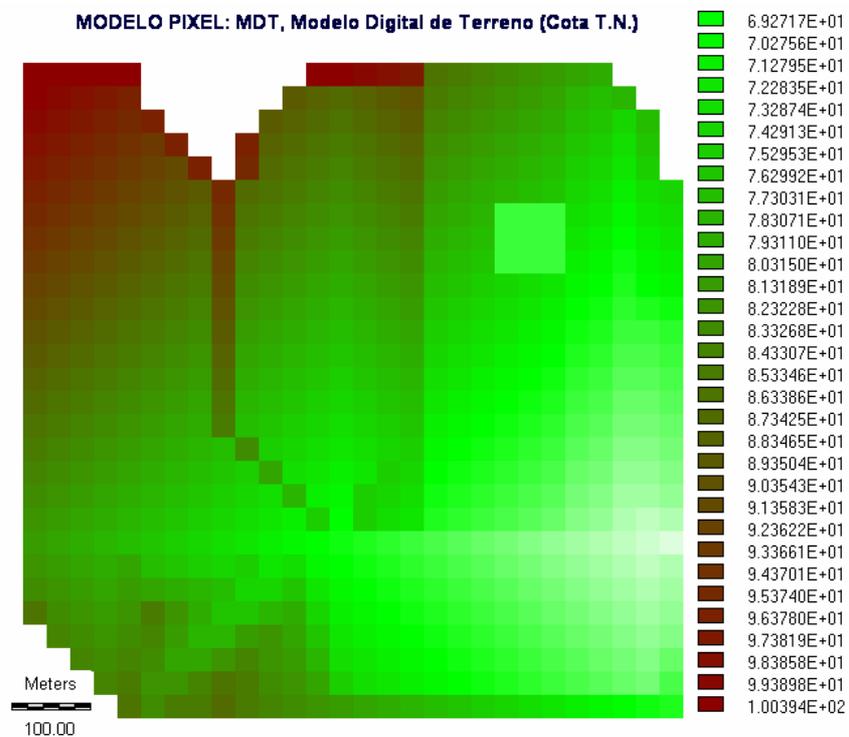
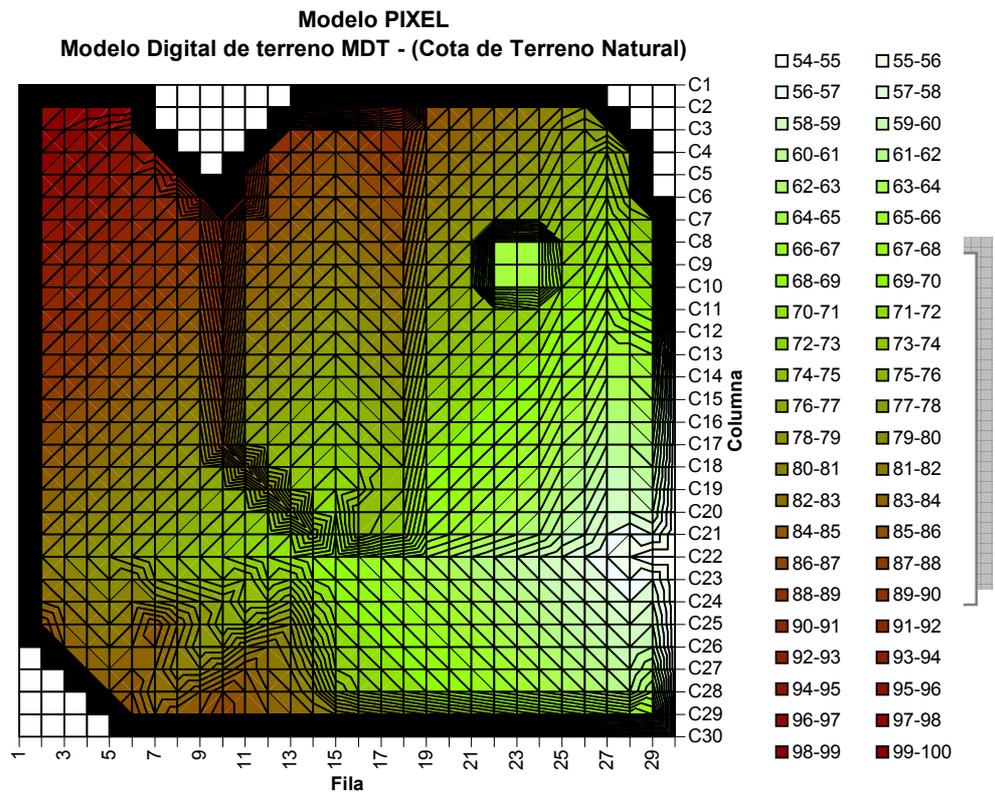


**Fig. N°: 48. Criterios de propagación :**

Seguidamente (Tabla Nro.: 3, Fig. N°: 49) se muestra un ejemplo teórico de lluvia neta y su propagación sobre un área cuyo modelo numérico representa un área hidrológica

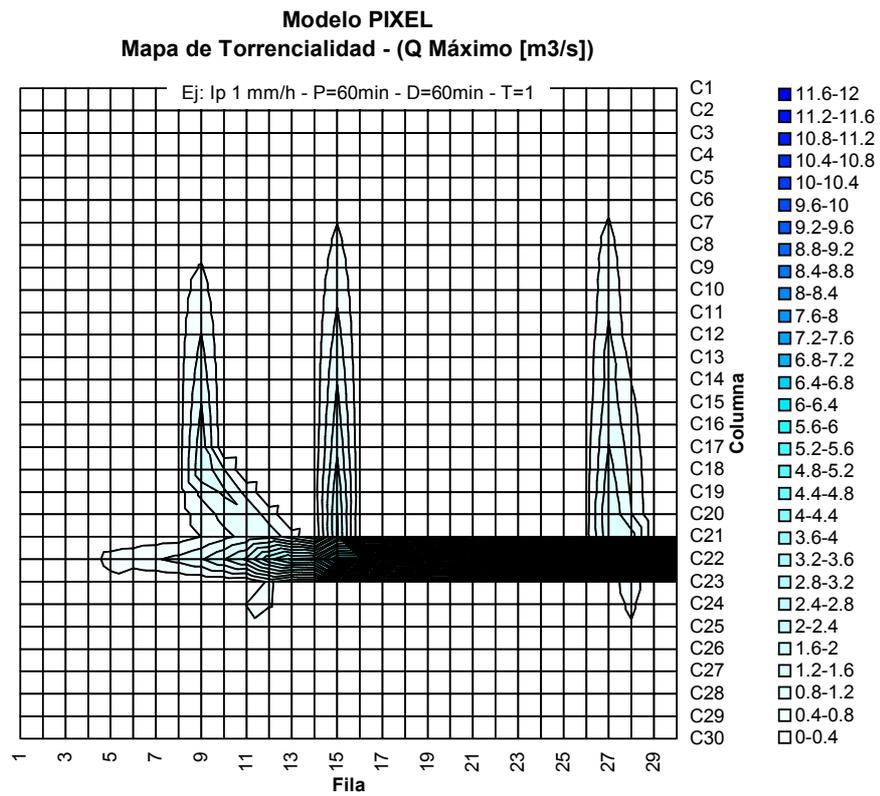


**Fig. N°: 50. Vista del modelo digital de terreno (MDT):**

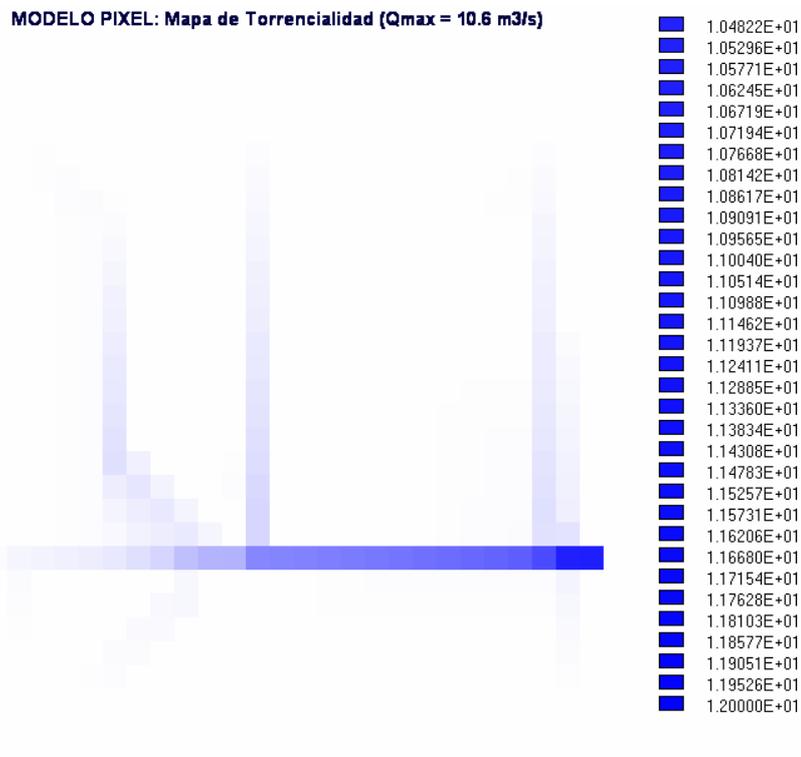


Dos formas de presentar el MDT (Fig. N°: 50), se observan las divisorias, cauces o vaguadas, líneas preferenciales de flujo y una depresión (arriba a la derecha)

**Fig. N°: 51. Mapa de Torrencialidad - Caudales Máximos**



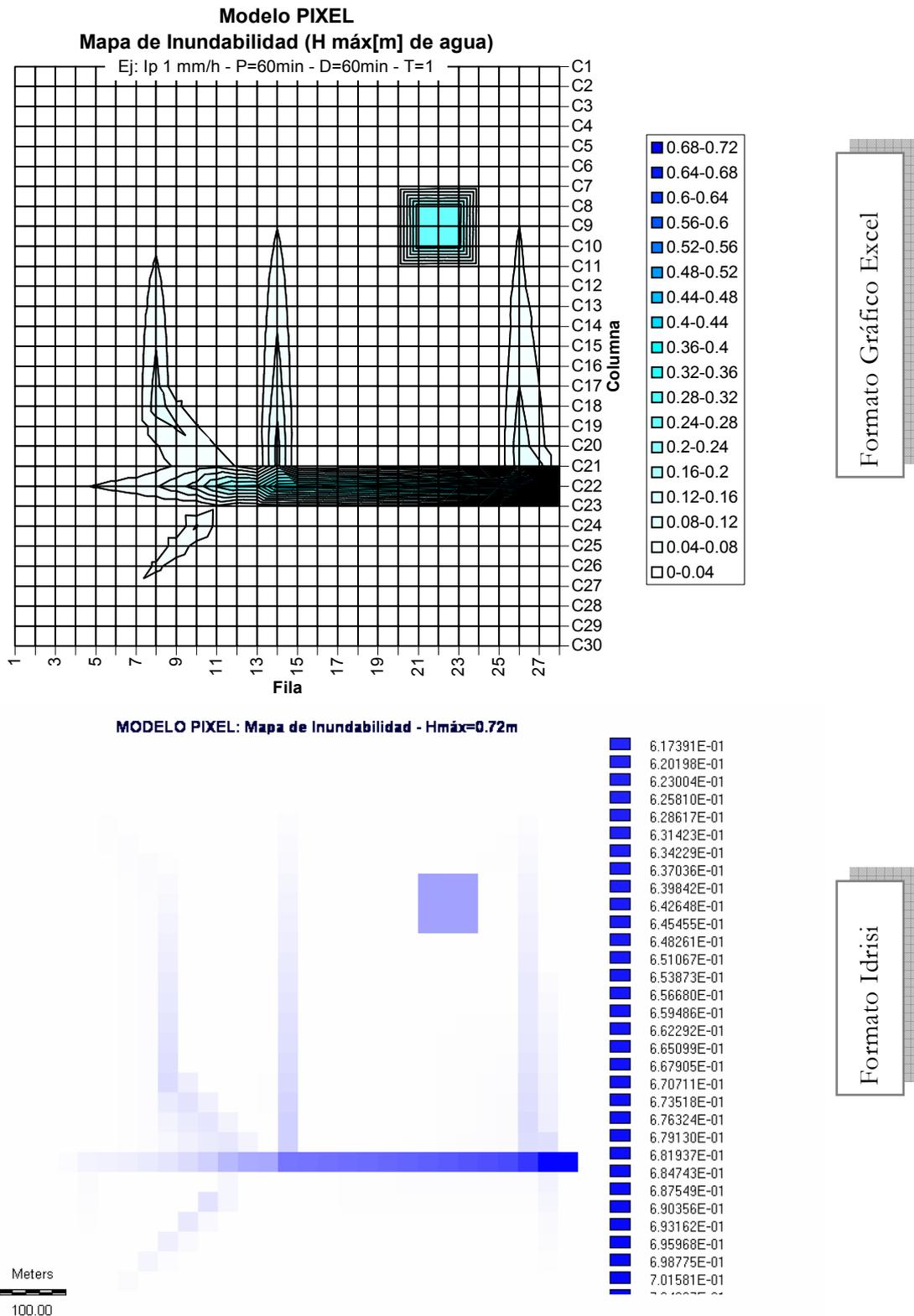
Formato Gráfico Excel



Formato Idrisi

Los diagramas (Fig. N°: 51) muestran en color azul y tono creciente los caudales máximos obtenidos para cada celda durante el período de lluvia neta.

**Fig. N°: 52. Mapa de Inundabilidad – Alturas máximas de agua**



En ambos diagramas (Fig. N°: 52), se muestra en tonalidad creciente el mapa de inundabilidad obtenido para el tirante máximo de agua de cada celda luego de la corrida del modelo.

## **IX- CONCLUSIONES**

### **1. CONCLUSIONES**

- 1- El problema planteado de identificar las principales características geomorfo-hidrológicas comunes de las unidades de estudio en PHMP, sus diferencias y similitudes con problemáticas de cuenca de montaña y área de llanura, ha sido resuelto proponiendo nuevos conceptos y clasificaciones para los sistemas hidrológicos mixtos;
- 2- Las diferencias y similitudes encontradas en PHMP, son relevantes para intervenir en la selección de procedimientos y técnicas de estimación de caudales máximos y su aplicación;
- 3- El problema de selección de procedimientos y métodos que adecuen y mejoren el procedimiento de cálculo del caudal máximo para reducir la incertidumbre del resultado y dar posibles soluciones en PHMP, ha sido resuelto proponiendo una metodología integradora de selección y de criterios de aplicación;
- 4- Los resultados obtenidos, permiten por analogía y extensión generalizar conceptos y procedimientos que son de aplicación a PHM, en la región patagónica y en otras regiones de características morfo-hidrológicas y climáticas semejantes.

### **2. SUMARIO DE CONTRIBUCIONES**

- 1- Se han propuesto nuevos conceptos para la clasificación de los sistemas hidrológicos mixtos, que permiten una mejor comprensión e interpretación del fenómeno torrencial en PHM;
- 2- Se ha desarrollado una metodología integrada e innovadora para la clasificación de los PHM y la selección de procedimientos de cálculo de caudales máximos más adecuados;
- 3- El modelo GAIMAN, constituye una contribución válida como herramienta para el estudio de máximas crecidas en sistemas hidrológicos típicos y en muchos casos de sistemas hidrológicos mixtos de PHMP.
- 4- El modelo PIXEL, de formulación conceptual, no tiene el grado de desarrollo apropiado para su explotación. Pero propone líneas de investigación concretas para avanzar a su fase experimental, que permita disponer en un corto plazo de una herramienta de concepción moderna para la simulación distribuida en PHMP;

### **3. TRABAJOS FUTUROS**

1- El modelo hidrológico GAIMAN, del tipo agregado, ofrece ventajas de versatilidad y agilidad de aplicación para la resolución de muchos problemas de la ingeniería en PHM, y las experiencias reunidas, justifican mantener actualizada esta herramienta de cálculo;

2- La investigación futura de los modelos distribuidos en PHM y del modelo PIXEL en particular, por su base física, pueden aportar mejores soluciones al problema de la estimación de crecidas sin datos hidrométricos. La determinación de caudales máximos por simulación distribuida en unidades hidrológicas sin datos, podría resolver en gran parte la incertidumbre propia de los métodos estadísticos o de los modelos agregados con información escasa.

3- Los modelos distribuidos, mejorarían la capacidad de análisis en SHNT de llanura o SHM con depresiones importantes, de evaluación del impacto hidroambiental de obras de infraestructura y de políticas de uso y manejo del agua;

4- Ambos modelos de simulación hidrológica como otros de amplia difusión y aplicación en la Hidrología, requieren de experiencias y mediciones permanentes de parámetros locales que mejoren la calidad de los resultados.

## APENDICES

### 1. MODELO DE SIMULACIÓN LLUVIA- CAUDAL GAIMAN. SIMULACIÓN CAÑADÓN BARAIBAR, EN RUTA 25., GAIMAN, CHUBUT. ENTRADAS (VARIABLES Y PARÁMETROS, SALIDAS

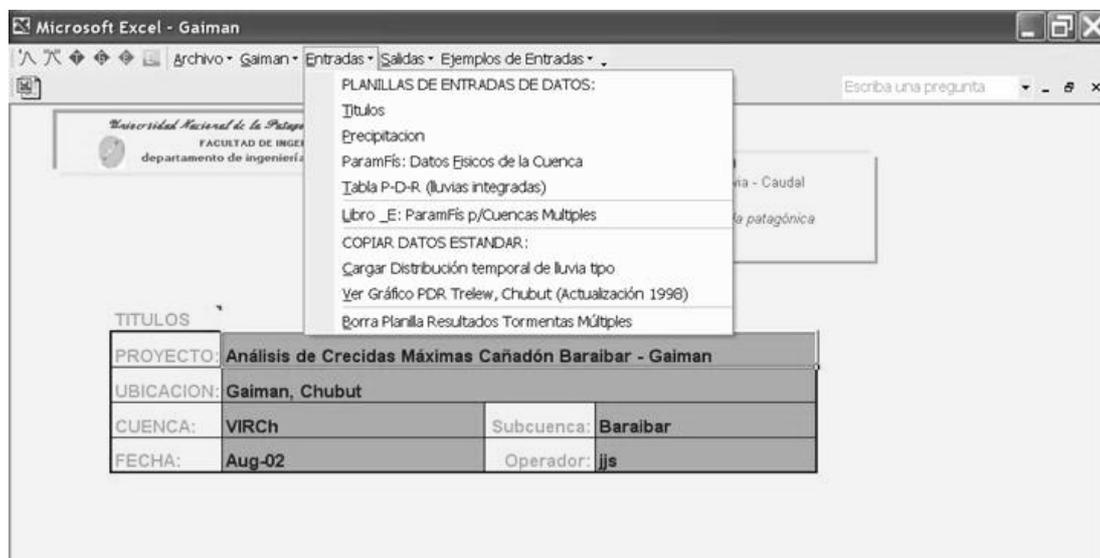


Fig. N°: 53. Menú y Pantalla Principal

**Configurar**

General | Grupos de UEHs o Cuencas | Ver | Recurrencias | DuracionesPp

Directorio y Archivos de trabajo:

Drive:  A:\  B:\  C:\  D:\      Directorio de Trabajo: TORDISE

Nombre Archivo Modelo <Gaiman> GAIMAN.XLS      Los Archivos E\_nn.xls y S\_nn.xls son Libros Excel para las Entradas y Salidas en cuencas múltiples e independientes:

UEHs Múltiples: El Archivo E\_nn.xls, corresponde a las entradas de Parámetros Físicos de cada cuenca. El Archivo S\_nn.xls, corresponde a las Salidas (Planillas Resumen y Abaco final), para cuencas múltiples (Ver ficha Grupos de UEHs)

Archivo de Par. Físicos de grupos de Entradas E\_ E\_GAIMAN.XLS      Archivo de Par. Físicos de grupos de Entradas S\_ S\_GAIMAN.XLS

Otros parámetros

Distribucion Areal de Lluvias Uniforme (Pp= UEHs)

Confirmar

Salir

**Configurar**

General | Grupos de UEHs o Cuencas | Ver | Recurrencias | DuracionesPp

El sistema TORDISE - GAIMAN admite las siguientes formas de corridas de explotación:

Opción Simple, Una (1) UEH ?

a) Forma simple del modelo GAIMAN, para una (1) cuenca o EUH y sus respectivas Subcuencas o Sub UEHs (Máx. 16). Esta opción no requiere el uso de los libros Auxiliares E\_nn.xls y S\_nn.xls. Número Máximo de Subcuencas (1 a 16)

UEHs o Cuencas Múltiples

b) Integrando Cuencas o UEHs múltiples e independientes (Máximo 16), que aportan todas a una sección de control dada, con sus respectivas Subcuencas o Sub UEHs (Máx. 16). Esta opción requiere de los Libros Auxiliares E\_ y S\_:

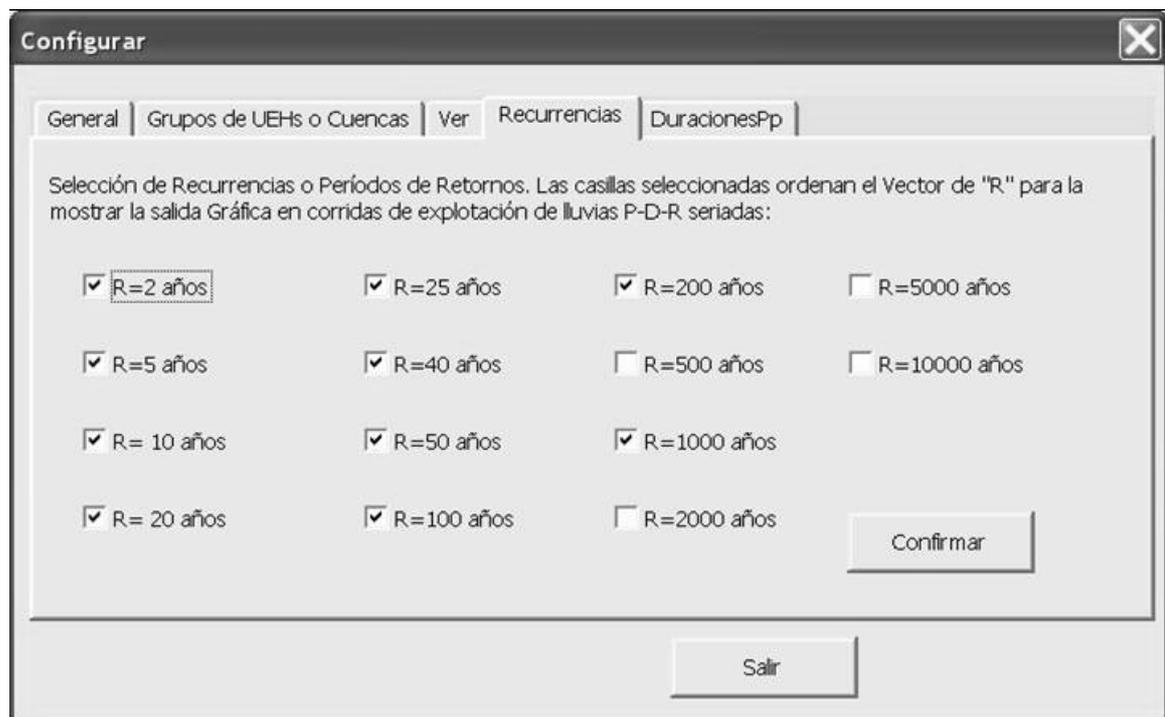
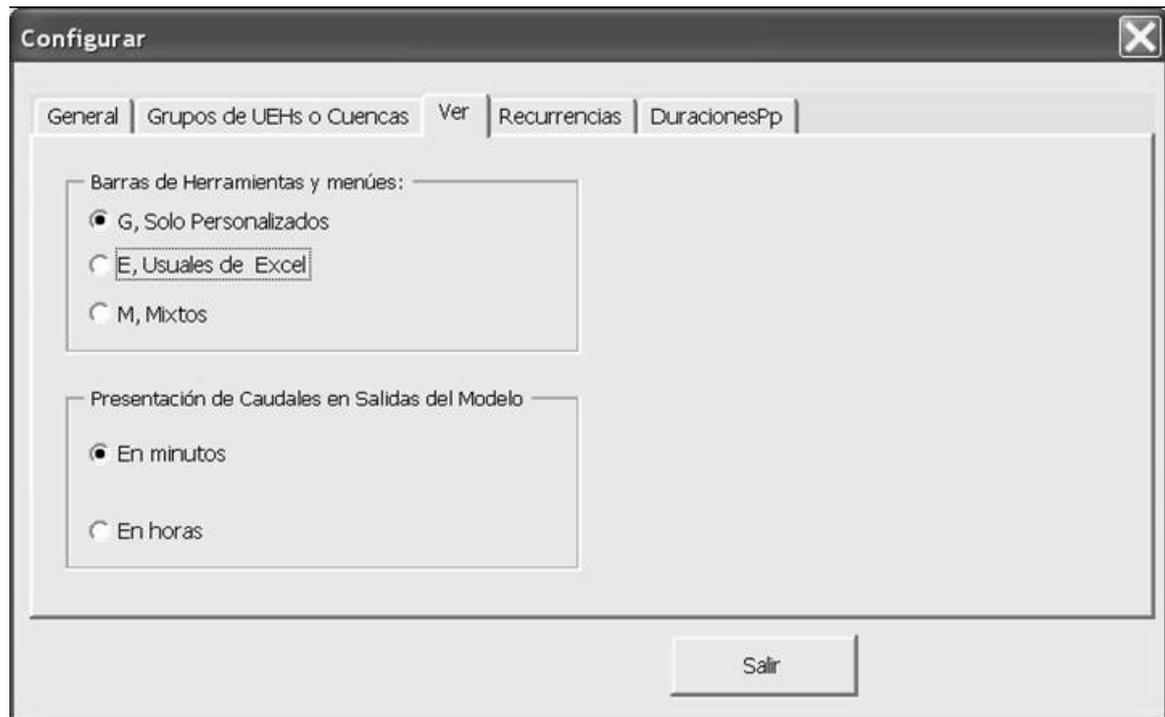
c) Agrupando e Integrando Cuencas o UEHs múltiples e independientes, en dos (2) grupos, (Máximo 16 por grupo), que aportan todas a una sección de control dada, con sus respectivas Subcuencas o Sub UEHs (Máx. 16). Esta opción suele resultar de utilidad cuando se agrupan UEHs de Margen Izquierda y UEHs de Margen Derecha que aportan a un Río: o tramo de Cauce Principal. Esta opción requiere de los libros Auxiliares E\_ y S\_:

Número Máximo de UEHs o Cuencas (1 a 1)

Salir

**Fig. N°: 54. Ventanas de Configuración del sistema**

Desde esta ventana y sus fichas (Fig. N°: 54, Fig. N°: 55, Fig. N°: 56), se configuran directorio y archivos de trabajo, el agrupamiento de cuencas independientes y subcuencas (UEHs), selección de recurrencias y duraciones de tormenta y otros parámetros funcionales para la elaboración de informes (Cuadro Nro.: 11).



*Fig. N°: 55. Ventanas de Configuración del sistema. Recurrencias*

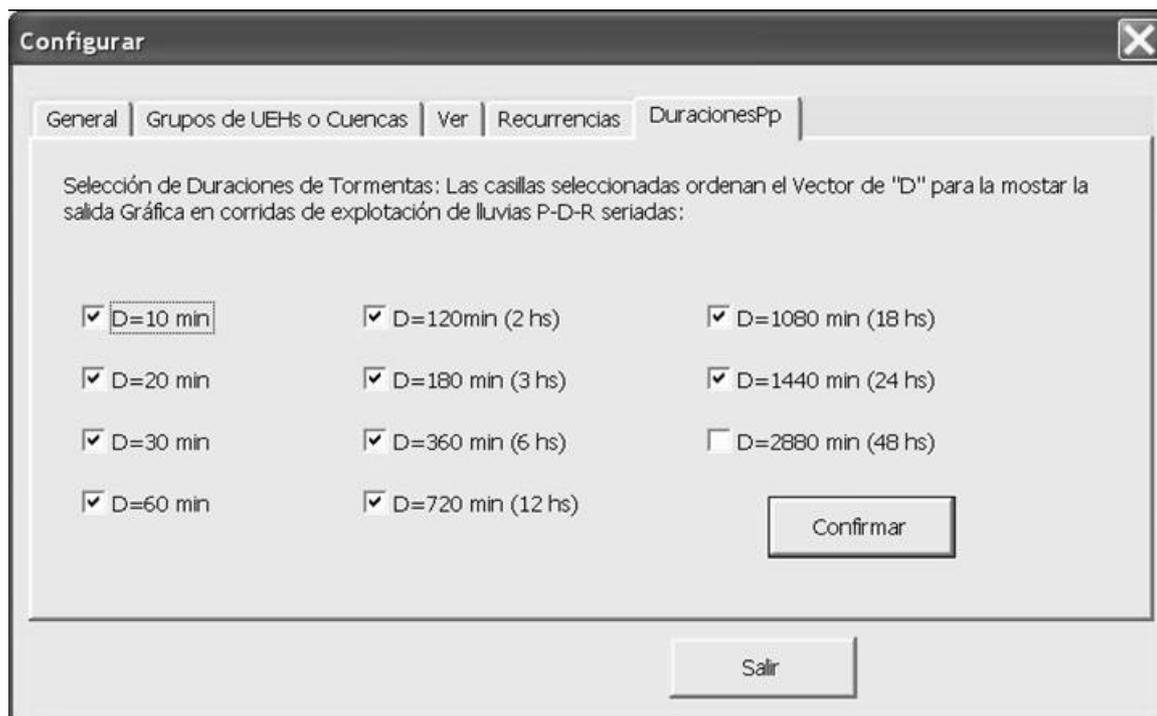
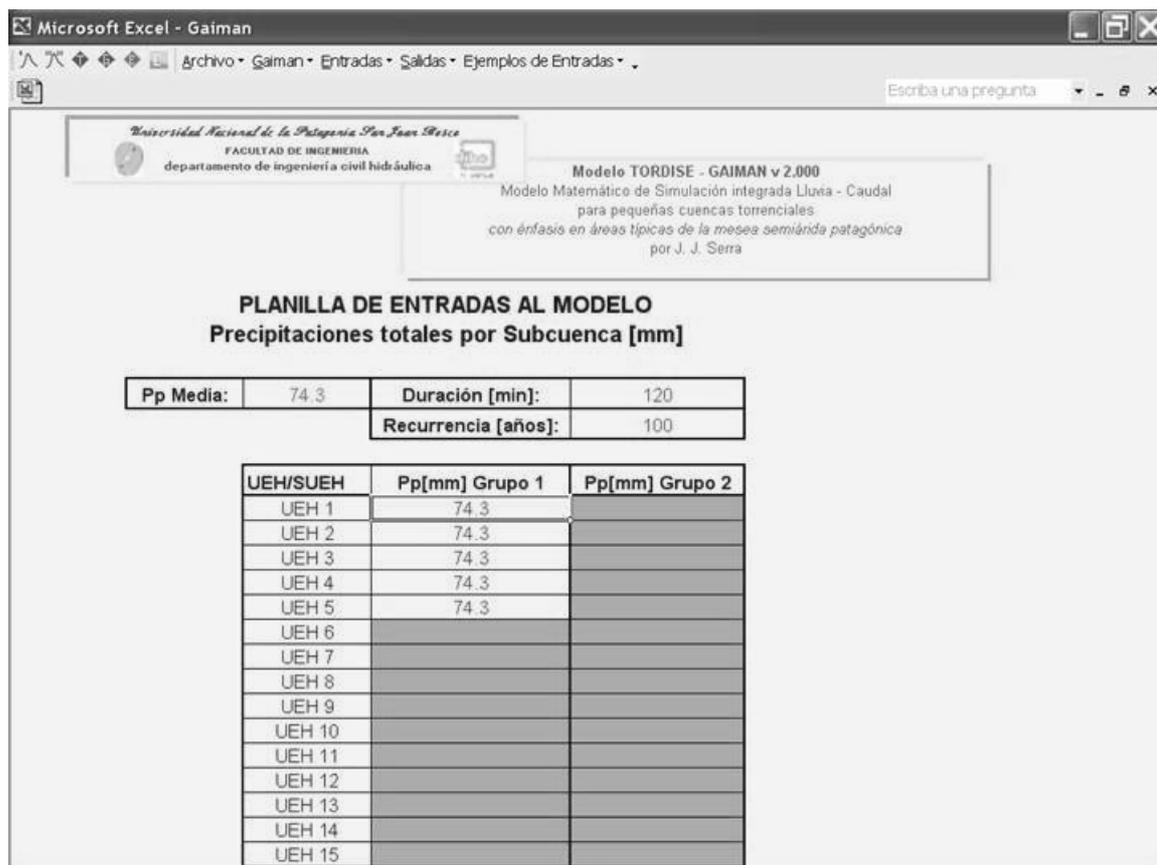


Fig. N°: 56. Ventanas de Configuración del sistema. Duración de tormenta.



Cuadro Nro.: 11. Ventana de Carga de datos de Precipitaciones por UEH, Duración y Recurrencia de la tormenta

**PLANILLAS DE SALIDAS**

Gaiman, Chubut-VIRCh-Baraibar□

Escorrentia [m3] y Coef. Escorrentia: 47916.24 0.83

P=74.3 D=120 R=100 Qp y QpProp.= 11.63 11.62

	t[min]	Pp[mm]	Q [m3/s]	Q propag[m3/s]
1	10	02	000	000
2	20	02	000	000
3	30	04	001	001
4	40	06	004	004
5	50	06	006	006
6	60	06	006	007
7	70	06	006	006
8	80	10	008	007
9	90	11	010	010
10	100	09	012	012
11	110	07	010	011
12	120	07	008	009
13	130	00	005	006
14	140	00	002	002
15	150	00	000	000
16	160	00	000	000

**Cuadro Nro.: 12. Planilla Detallada de Salida (Tiempos parciales, precipitación, caudales, caudal Pico, escorrentía)**

La planilla del Cuadro Nro.: 12 es un recorte de la tabla de salidas de un hidrograma para una cuenca y una tormenta. La tabla, presenta en filas los intervalos de tiempo y en columnas tiempo, precipitación, caudal y caudal propagado para cada intervalo. Es la tabla base para la graficación del hidrograma al pie de una cuenca.

La tabla siguiente, concentra toda la información física de una cuenca, ordenada en filas de datos por UEH. Los parámetros más importantes para cada UEH son: longitudes más largas y más cortas de escorrentías en ladera y cauces y sus velocidades de propagación, retenciones superficiales, coeficientes de infiltración (Kostiakov) y área de la unidad. Se incluyen también los datos de paso o intervalo de cálculo, número de pasos del modelo, número de subdivisiones de las salidas, humedad inicial (medida en tiempo de lluvia desde “humedad cero”) y los parámetros de propagación de Muskingum. Si el programa se configura para un grupo de cuencas independientes, se deberá cargar en un archivo especial una planilla de datos físicos por cada cuenca (Cuadro Nro.: 13).

Microsoft Excel - Gaiman

Universidad Nacional de la Patagonia Sur Austral  
FACULTAD DE INGENIERIA  
departamento de ingeniería civil hidráulica

**Modelo TORDISE - GAIMAN v 2.000**  
Modelo Matemático de Simulación integrada Lluvia - Caudal  
para pequeñas cuencas torrenciales  
con énfasis en áreas típicas de la meseta semiárida patagónica  
por J. J. Serra

**PLANILLA DE ENTRADAS AL MODELO Subcuenca: 5ha**

**1) Generales**

Número de Subcuencas N :	5	Número de pasos de modelo [min] N0 :	20	Longitud de Propagación [Km]	0.5	C0.1.2
Paso del modelo [min] K0 :	10	Nro. Subs. pasosalida K3 :	1	[Horas]	1	0.7551
Condición de saturación a la infiltración (Parámetro de Kostiaikov) :			50	K de Muskingum [Horas]	0.15	0.8776
				x de Muskingum	0.25	-0.633

**2) Constantes y Parámetros Físicos de la Cuenca**

Subca.	Traectorias de Escurrimiento en ladera y cauces [m]								Velocidad media [m/s]			Bets. Supf.	Infiltración			Area Subca.
	Más largas				Más cortas											
	Nro.	En Cauces			Ladera	En Cauces			Ladera	En Cauces			mm	mm	mm	Has
	1erOrden	2doOrde	3erOrden		1erOrden	2doOrde	3erOrden		1erOrden	2doOrde	3erOrden					
i	L(i,1)	L(i,2)	L(i,3)	L(i,4)	L(i,5)	L(i,6)	L(i,7)	L(i,8)	V0(i)	V1(i)	V2(i)	V3(i)	Z(i)	A(i)	B(i)	F(i)
1	121	694	201	1071				1071	0.23	1.50	1.80	2.40	3.0	0.41	0.74	17.5
2	142	1028	292	898				898	0.23	1.80	2.00	2.40	3.0	0.41	0.74	32.0
3	135	398	218	590				528	0.25	1.60	2.00	2.40	3.0	0.41	0.74	9.8
4	46	513	131	433				302	0.25	1.50	2.20	2.40	3.0	0.41	0.74	7.2
5	97	600	76	114				0	0.23	1.40	2.20	2.40	3.0	0.41	0.74	11.3
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
Desnivel Máximo:		Verificación de consistencia del Tiempo de concentración Tc:								Area total:						
Cuenca	Hmáx=	70 m	L= 2.087 Km		Tc= 0.4296 Hs		Tc= 0.4319 Hs		A=			77.7				
				modelo GAIMAN		método SUCS										

Cuadro Nro.: 13. Planilla de carga de datos de Parámetros físicos de las UEHs



Universidad Nacional de la Patagonia Sur Juan B. Justo  
FACULTAD DE INGENIERIA  
departamento de ingeniería civil hidráulica



**Modelo TORDISE - GAIMAN v 2.000**  
Modelo Matemático de Simulación integrada Lluvia - Caudal  
para pequeñas cuencas torrenciales  
con énfasis en áreas típicas de la meseta semiárida patagónica  
por J. J. Serra

### Estudio de Tormentas - VIRCh

#### Tabla de Precipitación - Duración - Recurrencia

Precipitación máxima en el período [mm]

Maximo	R/D	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440
	2	4.9	7.4	8.9	11.6	14.1	15.7	19.2	22.5	23.5	23.8
	5	7.9	11.6	13.6	18.2	22.1	24.4	30.8	37.2	39.8	40.3
	10	10.2	14.9	17.2	23.6	29.7	32.9	42.7	52	56.2	57.2
	20	12.7	18.6	21.1	29.7	39.4	44.1	58.6	71.8	78.3	79.8
	25	13.5	19.9	22.5	31.9	43.1	48.4	64.9	79.5	87	88.8
	40	15.4	22.7	25.6	36.8	51.9	58.8	80.3	98.5	108.4	110.8
	50	16.3	24.2	27.2	39.3	56.7	64.6	88.9	109	120.2	123.1
	100	19.4	29	32.4	48	74.3	86.1	121.6	149.1	165.6	170.2
	200	22.9	34.6	38.3	58.3	97.2	114.9	166.5	203.9	227.9	235.1
	1000	32.7	50.8	55.4	89.3	180.4	224.3	346	420.8	477	496.7

**(Ref. --Chachero, M. J., Actualización de Estudio de Tormentas p/ Estación Trelew SMN/INTA, dich, SCyT, 1998)**

*Cuadro Nro.: 14. Tabla de Precipitación-Duración-Recurrencia (VIRCh)*

Para el uso de la opción de correr nidos o loop de tormentas, puede se carga la tabla de precipitación, duración, recurrencia, (PDR), o bien la secuencia datos P-D que se desee iterar. El modelo dispone por defecto de la tabla PDR del VIRCh construida y actualizada a 1998 para la Estación Trelew del Servicio Meteorológico Nacional e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

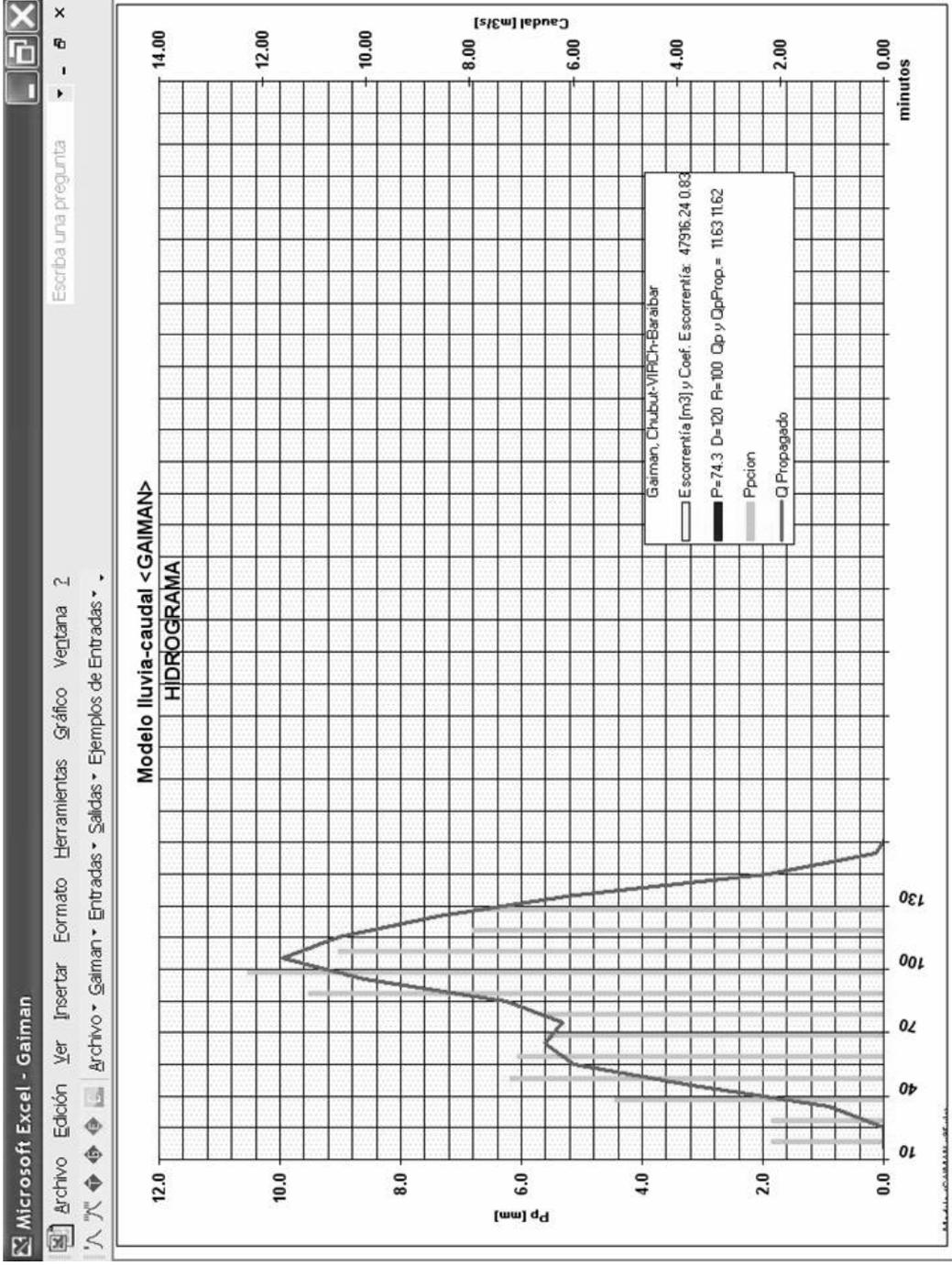


Fig. N°: 57. Hidrograma de salida para una tormenta (P-D-R)

Microsoft Excel - Gaiman

Archivo ▶ Gaiman ▶ Entradas ▶ Salidas ▶ Ejemplos de Entradas ▶

Universidad Nacional de la Patagonia Sur, San Carlos de Bariloche  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 departamento de ingeniería civil hidráulica

Modelo TORRISE - GAIMAN v 2.000  
 Modelo Matemático de Simulación integrada Lluvia - Caudal  
 para pequeñas cuencas torrenciales  
 con énfasis en áreas típicas de la meseta semiárida patagónica  
 por J. J. Serra

### Caudales Picos y Escorrentías estimadas para distintas tormentas

#### Tablas Resumen Qp-D-R y E-D-R

Tabla s/Gráfico2: Qpico-D-R

Maximo R/D	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440
2.1	0.5	2.0	2.1	2.1	1.2	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0
4.3	2.3	4.0	4.3	4.1	2.6	1.9	0.9	0.3	0.1	0.0
5.9	3.7	5.7	5.9	5.7	3.9	2.9	1.7	0.8	0.4	0.2
7.6	5.3	7.6	7.5	7.5	5.6	4.3	2.7	1.4	0.9	0.6
8.3	5.8	8.3	8.1	8.1	6.2	4.8	3.0	1.6	1.1	0.7
9.8	6.9	9.8	9.3	9.6	7.8	6.1	4.0	2.2	1.5	1.0
10.6	7.5	10.6	10.0	10.3	8.6	6.8	4.5	2.6	1.8	1.2
13.1	9.4	13.1	12.1	12.8	11.6	9.4	6.6	3.8	2.7	2.0
16.0	11.5	16.0	14.5	15.8	15.6	13.0	9.3	5.5	4.0	3.0
29.9	17.5	24.5	21.5	24.9	29.9	26.3	20.3	12.1	9.1	7.0

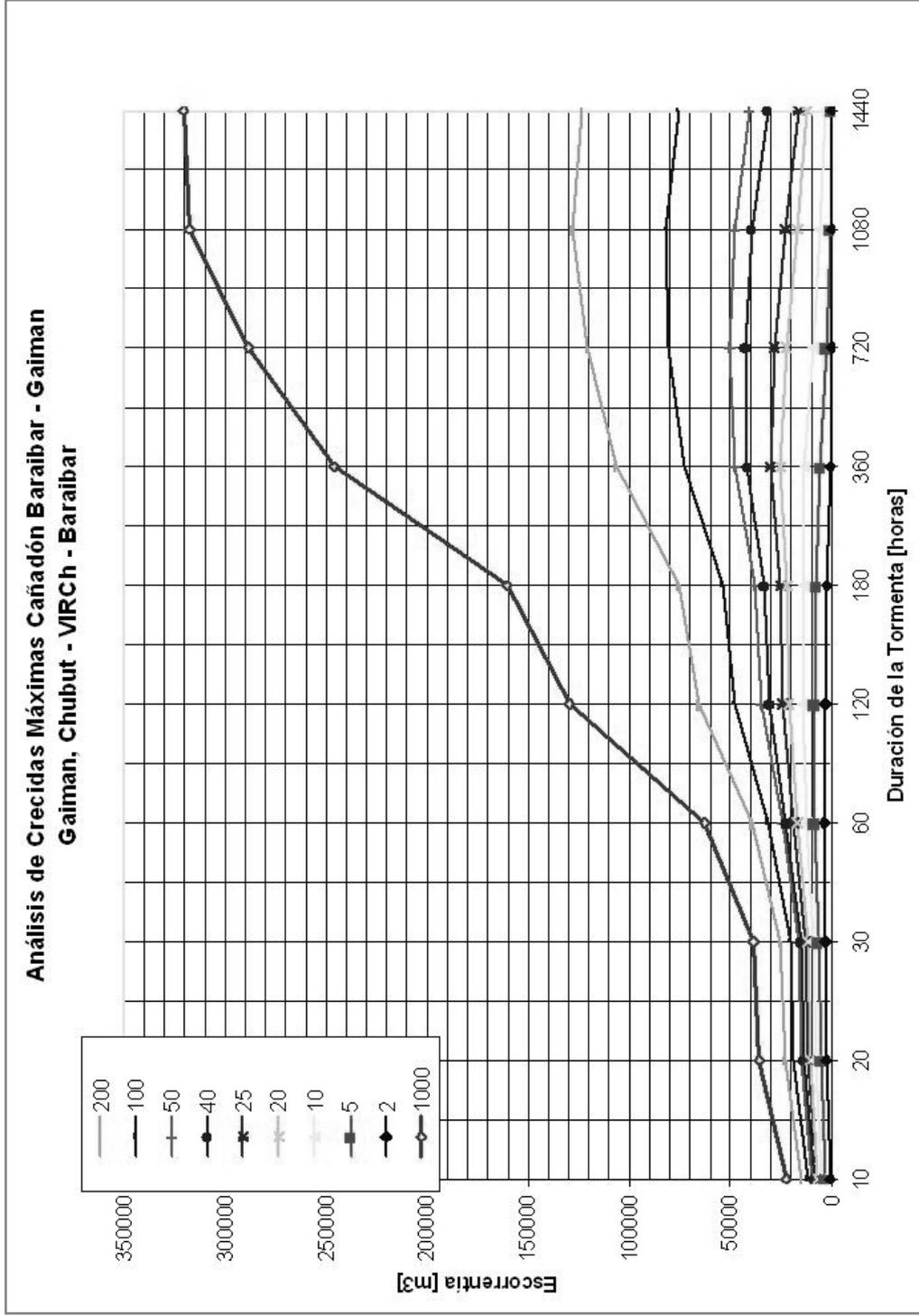
Cuadro Nro.: 15. Planilla de Salida de Tormentas anidadas: Resumen de Caudales Pico, Escorrentías y Coeficientes de escorrentía para cada tormenta (Ej. 100 tormentas sintéticas de diferente P-D-R: Caudal pico

Microsoft Excel - Gaiman												
Escriba una pregunta												
Tabla s/ Esco: Escorrentia-D-R												
Maximo	R/D	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440	
3559.4	2	646	2592	2962	3559	2859	2081	742	0	0	0	
8396.9	5	2982	5073	6622	8397	8278	7485	5359	2645	719	0	
14173.7	10	4773	7634	9236	12172	14174	13552	13275	9059	5948	3107	
25210.3	20	6719	10515	11693	16921	21101	22019	25210	22335	16888	12226	
30114.7	25	7342	11527	12783	18634	23982	25092	30115	28191	23078	16317	
42565.9	40	8822	13707	15196	22450	30834	33119	41666	42566	39382	31377	
50508.8	50	9522	14875	16442	24397	34572	37698	47972	50509	48205	40583	
81823.6	100	11936	18613	20491	31171	47916	53784	72538	80365	81824	75624	
127912.0	200	14661	22973	25085	39191	65470	75812	106688	120798	127912	123453	
320486.5	1000	22292	35588	38400	62625	129628	160491	245957	288289	317694	320487	

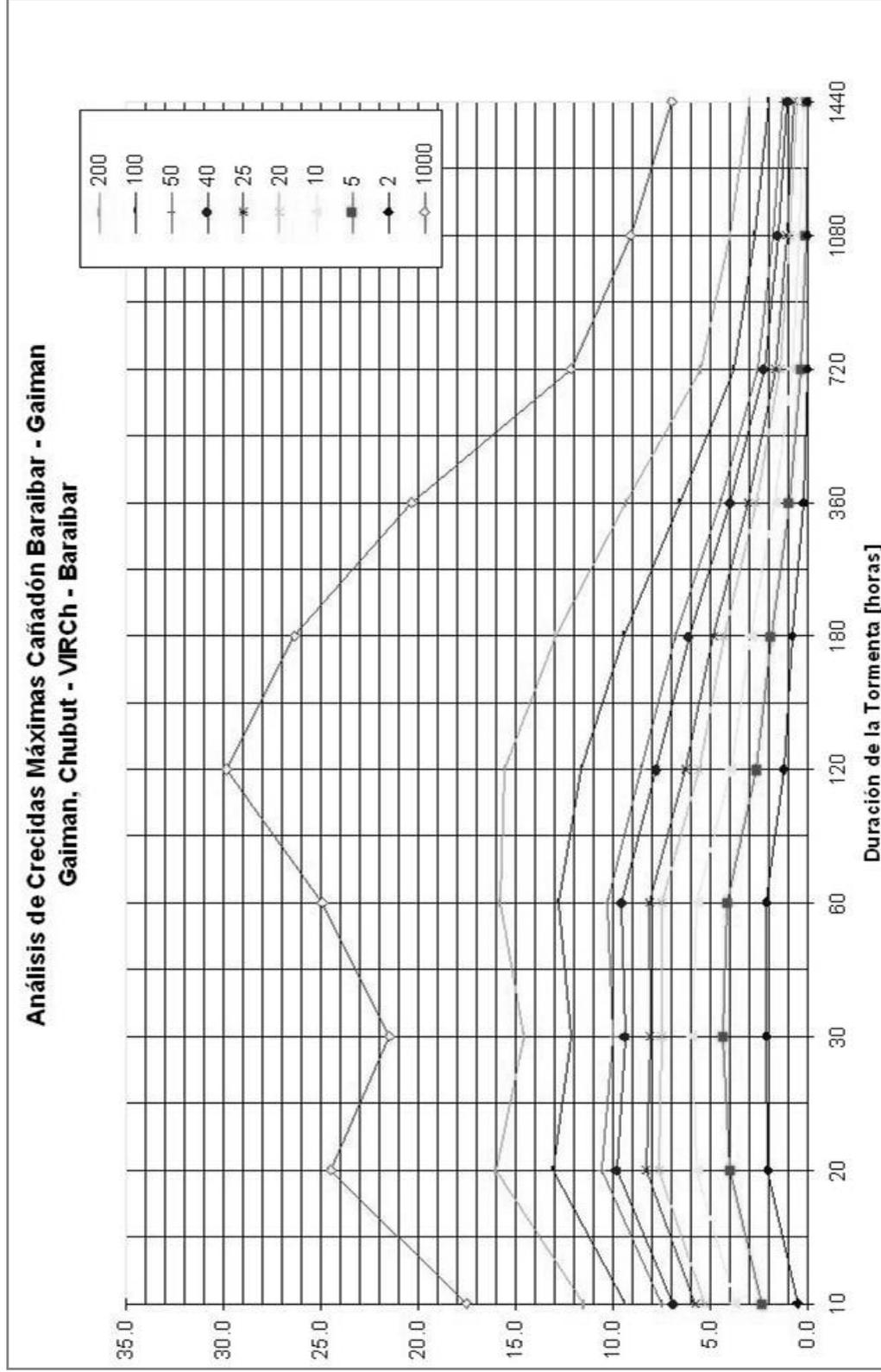
  

Tabla s/ Esco: Coeficiente de Escorrentia-D-R												
Maximo	R/D	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440	
0.5	2	0.17	0.45	0.43	0.39	0.26	0.17	0.05	0.00	0.00	0.00	
0.6	5	0.49	0.56	0.63	0.59	0.48	0.39	0.22	0.09	0.02	0.00	
0.7	10	0.60	0.66	0.69	0.66	0.61	0.53	0.40	0.22	0.14	0.07	
0.7	20	0.68	0.73	0.71	0.73	0.69	0.64	0.55	0.40	0.28	0.20	
0.8	25	0.70	0.75	0.73	0.75	0.72	0.67	0.60	0.46	0.34	0.24	
0.8	40	0.74	0.78	0.76	0.79	0.76	0.72	0.67	0.56	0.47	0.36	
0.8	50	0.75	0.79	0.78	0.80	0.78	0.75	0.69	0.60	0.52	0.42	
0.8	100	0.79	0.83	0.81	0.84	0.83	0.80	0.77	0.69	0.64	0.57	
0.9	200	0.82	0.85	0.84	0.87	0.87	0.85	0.82	0.76	0.72	0.68	
0.9	1000	0.88	0.90	0.89	0.90	0.92	0.92	0.91	0.88	0.86	0.83	

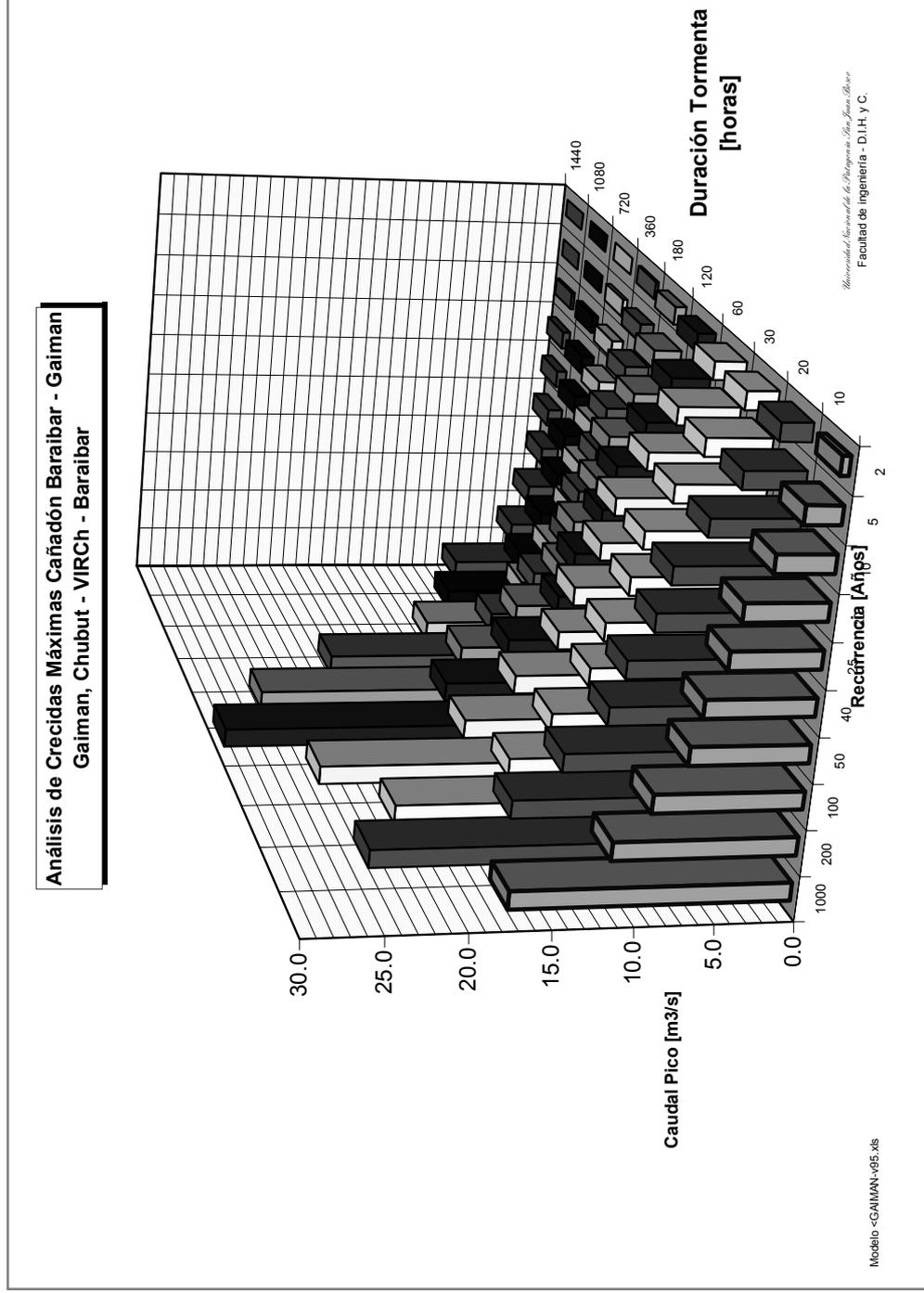
Cuadro Nro.: 16. Planilla de Salida de Tormentas anidadas: Resumen de Caudales Pico, Escorrentías y Coeficientes de escorrentía para cada tormenta (Ej. 100 tormentas sintéticas de diferente P-D-R: Escorrentía



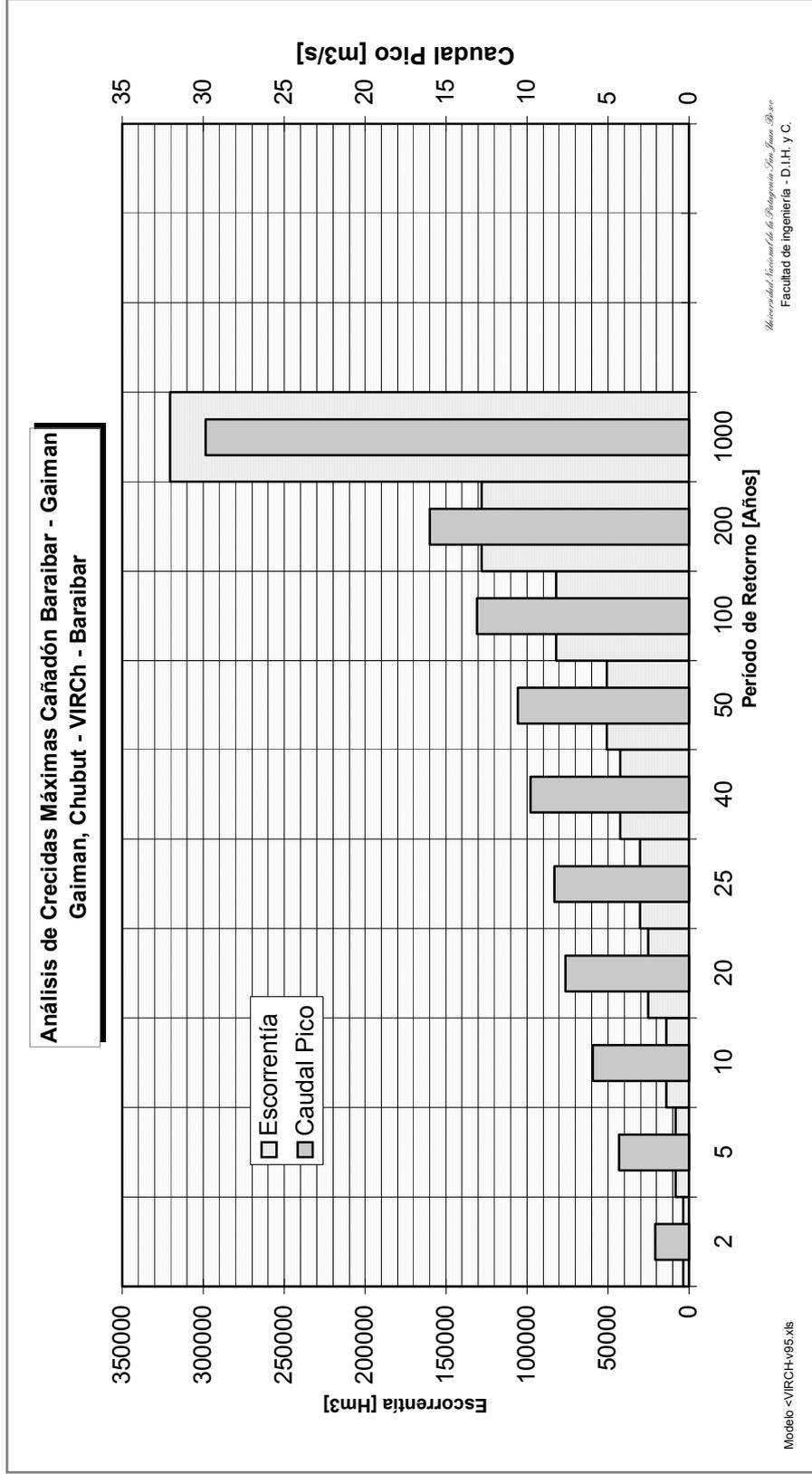
**Fig. N°: 58. Análisis de Tormentas y Determinación de la Tormenta de Diseño: Gráfico Resumen de Escorrentías para tormentas sintéticas anidadas de diferentes P-D-R**



**Fig. N°: 59. Análisis de Tormentas y Determinación de la Tormenta de Diseño: Gráfico Resumen de Escorrentías para tormentas sintéticas anidadas de diferentes P-D-R: Caudales máximos [m3/s].**

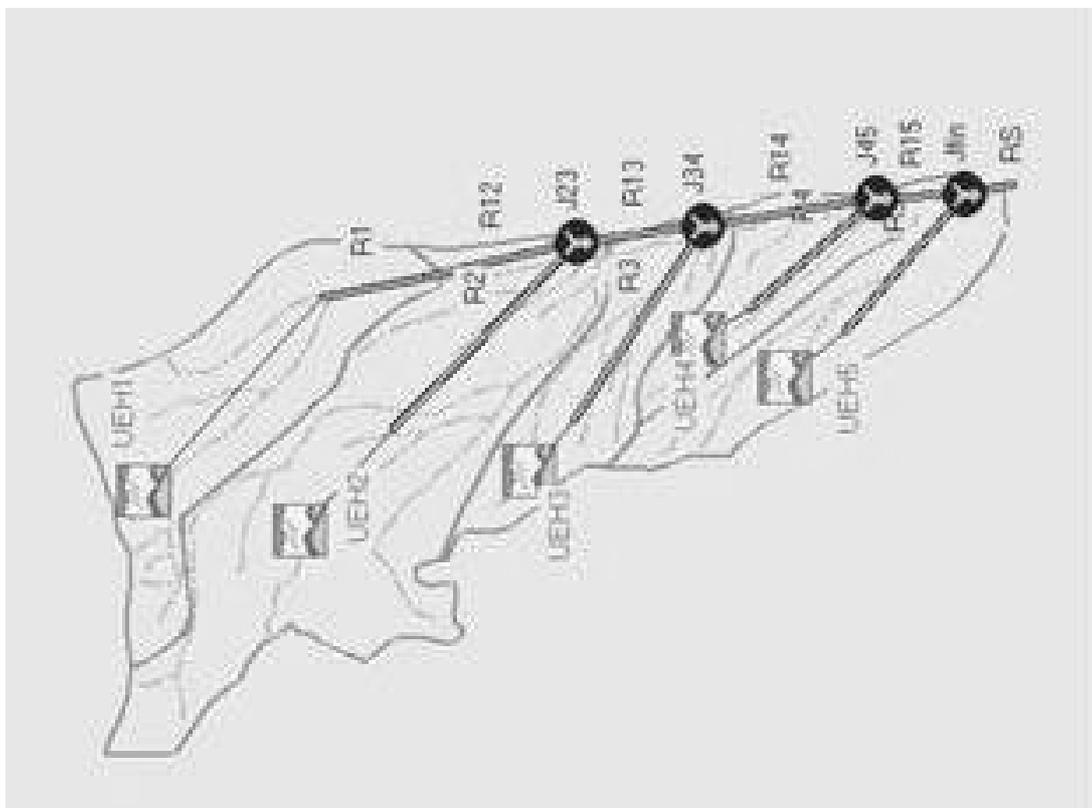


**Fig. N°: 60. Análisis de Tormentas y Determinación de la Tormenta de Diseño: Gráfico Resumen de Escorrentías para tormentas sintéticas anidadas de diferentes P-D-R: Caudales máximos [m<sup>3</sup>/s] (3D)**

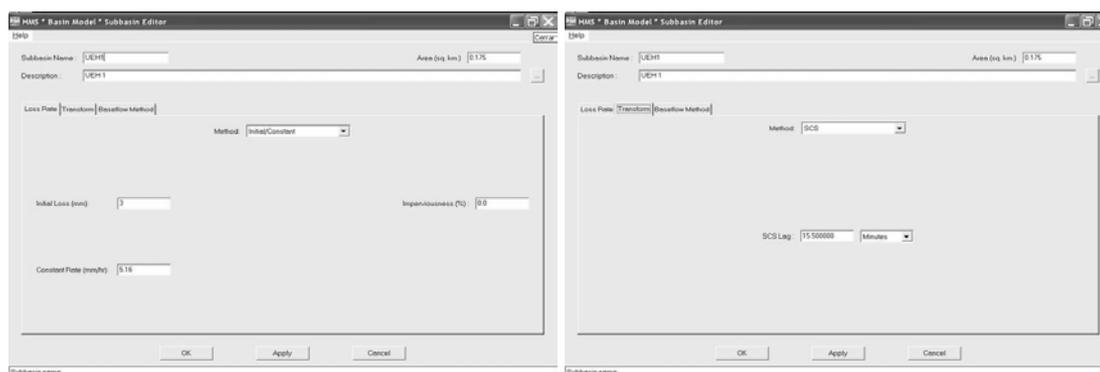


**Fig. N°: 61. Diagrama de Caudales Máximos (generados por el modelo GAIMAN a partir del diagrama Qp-D-R)**

**2. MODELO DE SIMULACIÓN LLUVIA- CAUDAL HEC HMS. SIMULACIÓN CAÑADÓN BARAIBAR, EN RUTA 25., GAIMAN, CHUBUT. (COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON MODELO SIMULACIÓN LLUVIA CAUDAL GAIMAN)<sup>13</sup>**

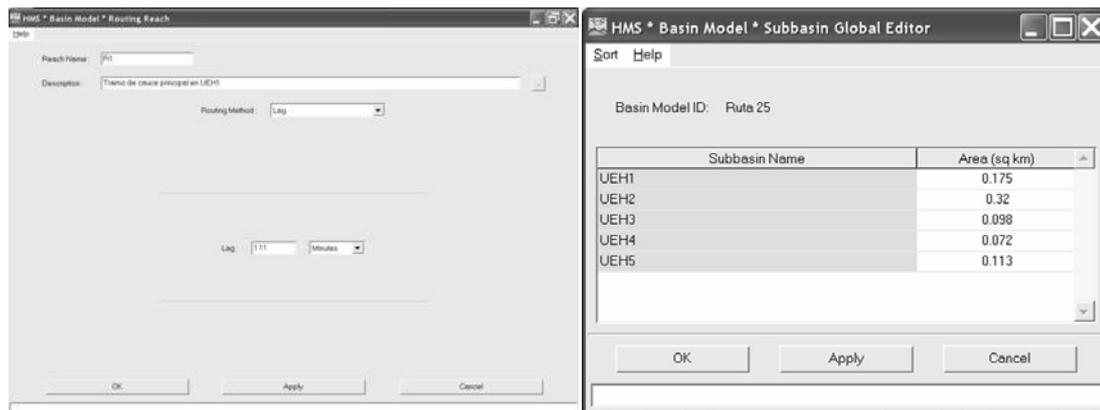


**Fig. N°: 62. Esquema de UEHs. Componentes de modelación HEC HMS**

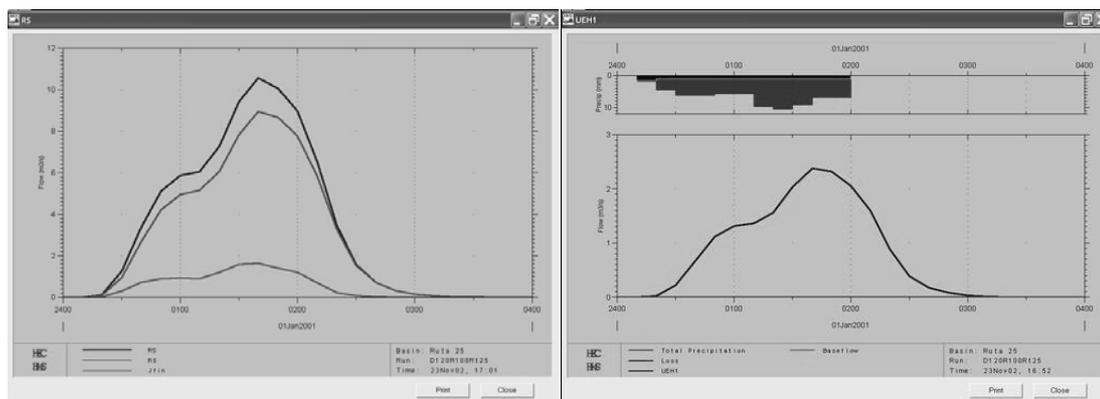


**Cuadro Nro.: 17. UEH 1: Ejemplos de carga de datos (Ventanas de carga de parámetros físicos de retenciones por infiltración y función transformadora del Hidrograma): Métodos**

<sup>13</sup> HEC HMS, Hydrologic Model System, producido por Hydrologic Engineering Center, US Federal Government. Versión 2001.



Cuadro Nro.: 18. UEH 1: Ejemplos de carga de datos: LAG, Areas (“Basin Model”)



HMS \* Time Series Results for Reach RS

Project: BereibarRun Name : D120R100R125 Reach : RS

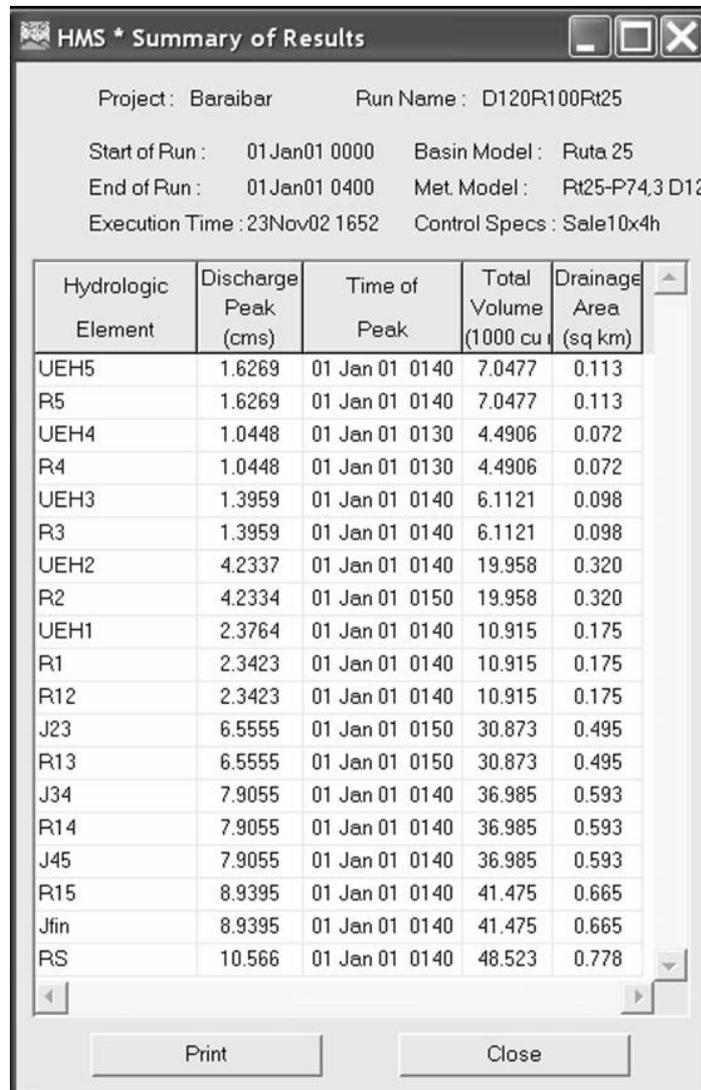
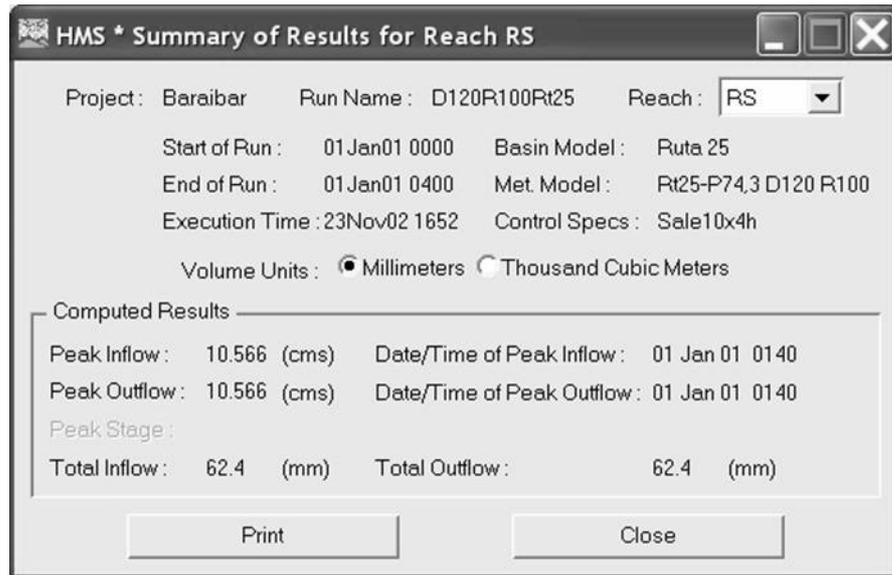
Start of Run : 01Jan01 0000 Basin Model : Ruta 25

End of Run : 01Jan01 0400 Met. Model : R125-P74.3 D1

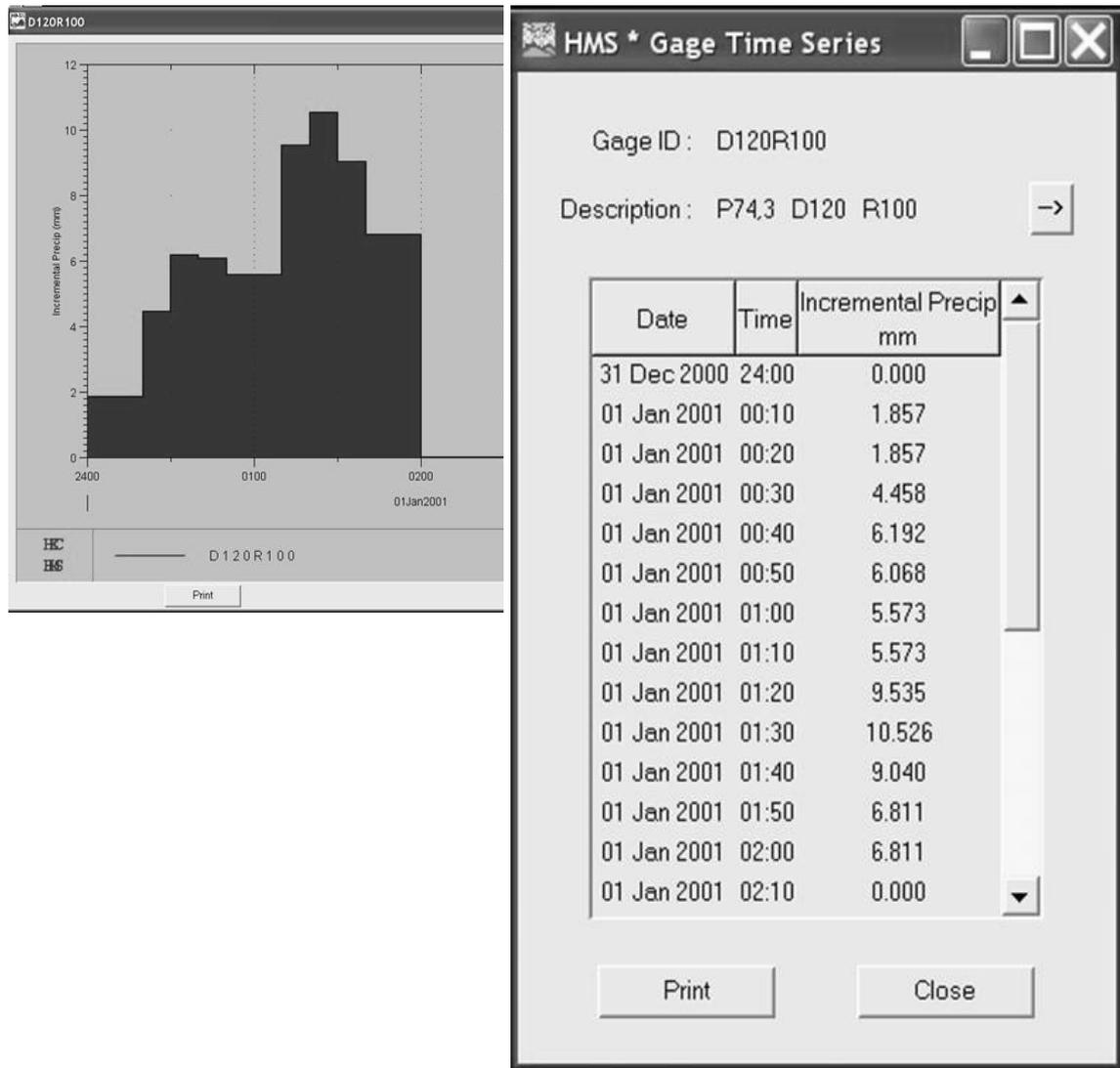
Execution Time : 23Nov02 1652 Control Specs : Sale 10x4h

Date	Time	Inflow (cms)	Outflow (cms)
31 Dec 00	2400	0.000	0.000
01 Jan 01	0010	0.000	0.000
01 Jan 01	0020	0.116	0.116
01 Jan 01	0030	1.258	1.258
01 Jan 01	0040	3.354	3.354
01 Jan 01	0050	5.100	5.100
01 Jan 01	0100	5.862	5.862
01 Jan 01	0110	6.043	6.043
01 Jan 01	0120	7.276	7.276
01 Jan 01	0130	9.394	9.394
01 Jan 01	0140	10.566	10.566
01 Jan 01	0150	10.051	10.051
01 Jan 01	0200	8.981	8.981
01 Jan 01	0210	6.506	6.506
01 Jan 01	0220	3.483	3.483
01 Jan 01	0230	1.594	1.594
01 Jan 01	0240	0.723	0.723
01 Jan 01	0250	0.327	0.327
01 Jan 01	0300	0.145	0.145
01 Jan 01	0310	0.061	0.061
01 Jan 01	0320	0.024	0.024
01 Jan 01	0330	0.008	0.008

Cuadro Nro.: 19. Ejemplo de “Salidas” de corridas de explotación del modelo HEC HMS: A la izquierda, hidrograma final de la cuenca. En su interior, Hidrograma en “Junction fin” y en riacho principal de UEH 5. (Para P 74,3mm, D 120 min, R 100 años).



**Fig. N°: 63. Ejemplo de “Salidas” de corridas de explotación del modelo HEC HMS para Cañadón baraibar en Ruta 25: cómputo de resultados y resumen de caudal pico (Para P 74,3mm, D 120 min, R 100 años).**



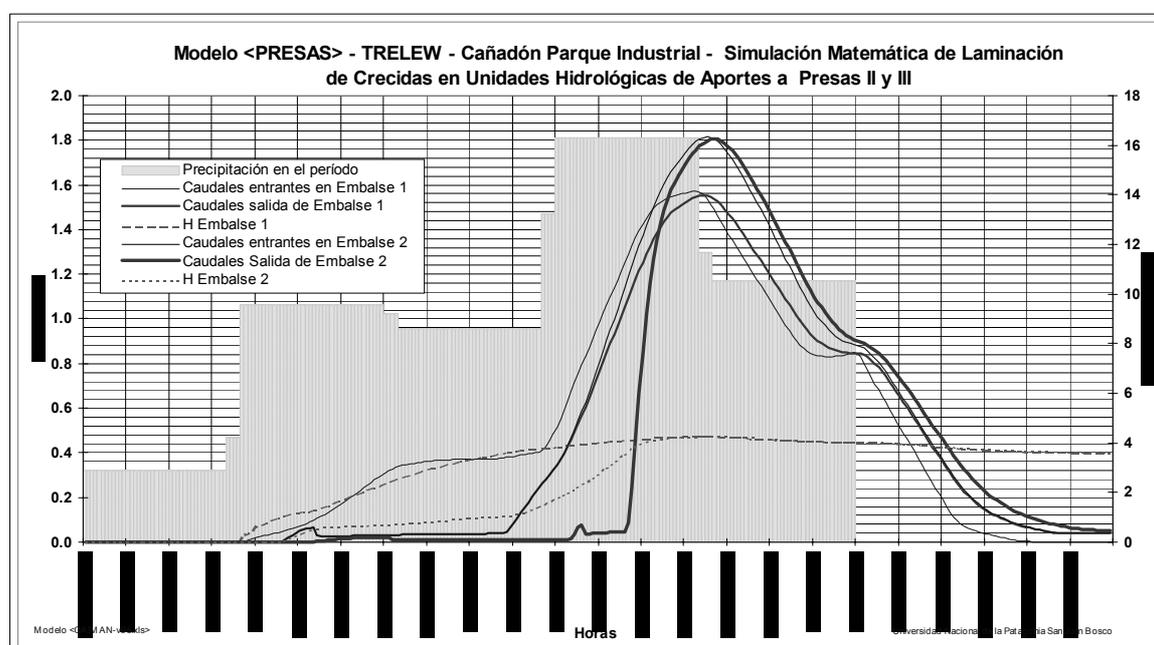
**Cuadro Nro.: 20.** HEC HMS, ejemplo Baraibar: Precipitación: Lluvia sintética adoptada,  $P = 74,3\text{mm}$ ,  $D=120$  minutos,  $R = 100$  años

### 3. MODELO GAIMAN: APLICACIONES

En esta sección del APENDICE, se presentan a continuación una selección de tablas y gráficos de entradas y salidas principales para dos ejemplos de aplicación del modelo GAIMAN y sus herramientas auxiliares TORDISE-PRESAS, en estudios y proyectos aplicados: el Cañadón del Parque Industrial de Trelew y el Cuenco Aluvional DBT.

#### 3.1. REFACCIONES Y MEJORAS AL SISTEMA DE PRESAS CAÑADÓN DEL PARQUE INDUSTRIAL DE TRELEW (PIT).

Referencias: *Estudio de refacciones y mejoras al sistema de presas del Cañadón del PIT*, efectuado por el Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, UNPSJB, para CORFO CHUBUT, en el año 2000. <sup>14</sup>



**Fig. N°: 64. Simulación del Cañadón del PIT, c/Presas II y III, para la Lluvia extraordinaria del 24-25/Abril 1998.**

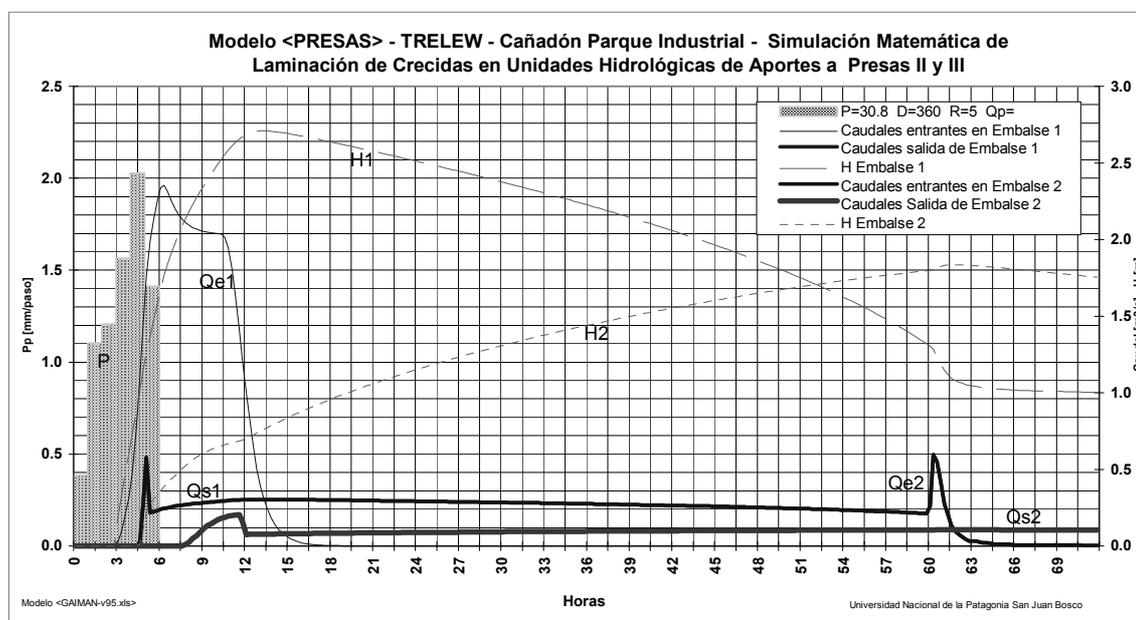
La Fig. N°: 64 muestra los resultados de simular la tormenta extraordinaria del 24 y 25 de Abril de 1998 (Fig. N°: 73, Tabla Nro.: 4), sobre el Cañadón del Parque Industrial de Trelew, con las obras de control de crecidas existentes en ese evento. La corrida se efectúa utilizando los mismos parámetros de calibración del modelo utilizado para el proyecto de las obras (Serra, J, MESOP, 1993) y con los datos de lluvia medidos por el SMN de Trelew. Los resultados que se obtienen guardan coincidencia con el horario real de registro del caudal pico y con el caudal observado a medianoche del día 24 (aproximado en el orden de 8 m<sup>3</sup>/s en base a la altura de agua en el vertedero).

<sup>14</sup> Serra Juan, (2000), Tomo de Hidrología e Hidráulica. Tomo I Informe I, Tomo III Informe Final de Proyecto. UNPSJB

Ambos datos observados, fueron tenidos presentes para la calibración y ajuste del modelo de máximas crecidas en el PIT y el proyecto de refacciones de obras.

Las Presas del PIT con sus refacciones y modificaciones –con obras actualmente en construcción–, tienen tres estructuras hidráulicas de evacuación: a) un conducto de regulación de caudales bajos, b) un vertedero de caudales extraordinarios y c) un canal lateral de fuga para crecidas excepcionales (Fig. N°: 68, Cuadro Nro.: 21).

En los tres gráficos siguientes, se muestran los gráficos seleccionados de tres tormentas sintéticas de distintas recurrencias (baja, media y alta) y duraciones de tormenta que maximizan el caudal pico: Pueden observarse los comportamientos de las estructuras hidráulicas de evacuación para los tres estados señalados (Fig. N°: 65, Fig. N°: 66 y Fig. N°: 67).



*Fig. N°: 65. Simulación obtenida para una lluvia de  $R=5$  años ( $D=6$  hs). Se observa un marcado efecto de “laminación de la crecida” por los órganos de evacuación*

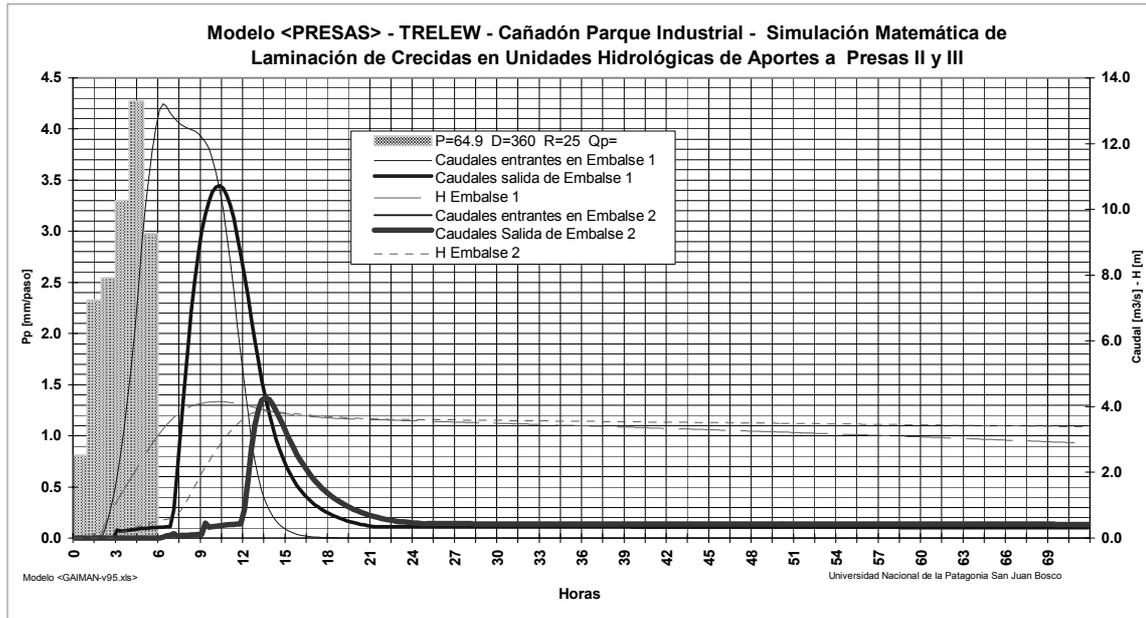


Fig. N°: 66. Simulación obtenida para una lluvia de  $R=25$  años ( $D=6$  hs). Se observa un importante efecto de “laminación de la crecida” por los órganos de evacuación, pero menor que el del gráfico anterior.

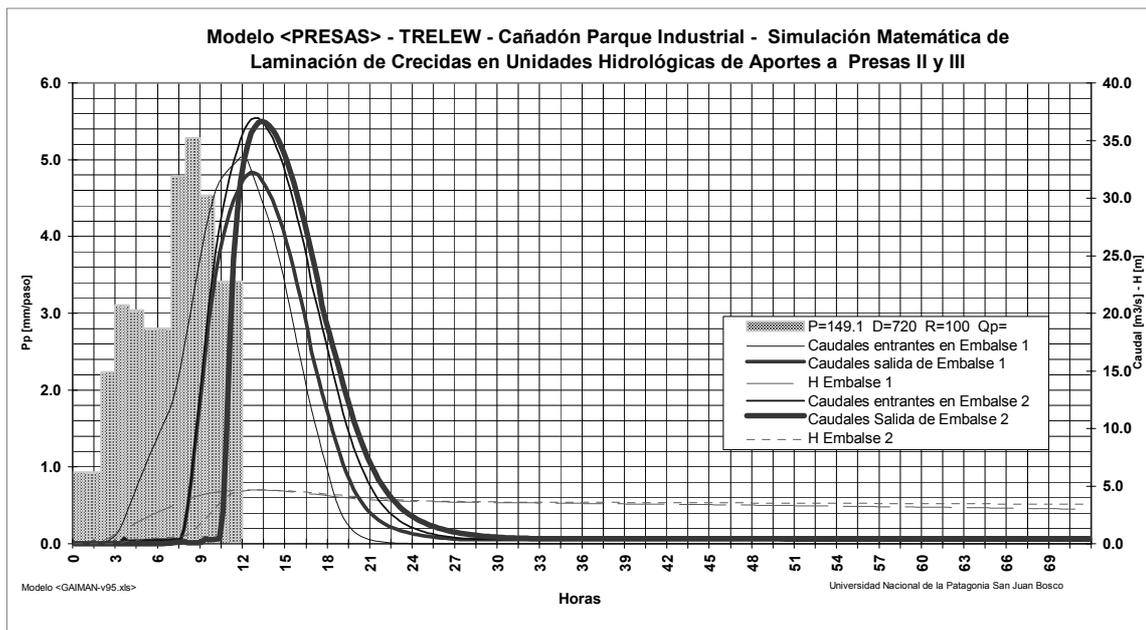


Fig. N°: 67. Simulación obtenida para una lluvia de  $R=100$  años ( $D=12$  hs). Se observa que el efecto de “laminación de la crecida” por los órganos de evacuación es muy reducido, (baja relación entre el volumen de embalse posible y el volumen de escurrimiento de la tormenta).

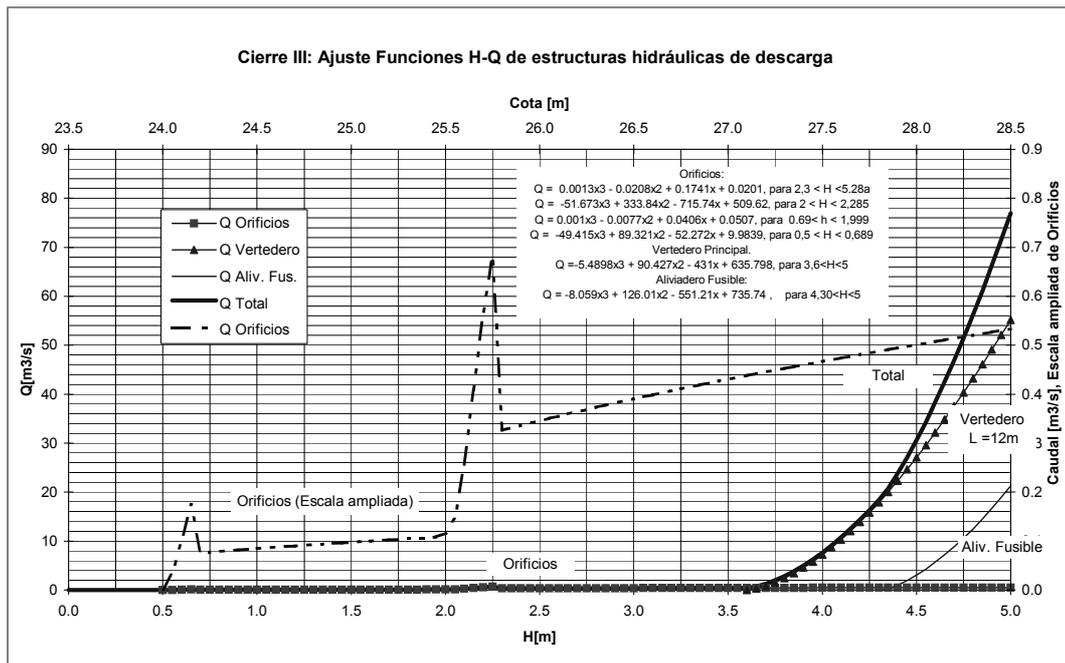


Fig. N°: 68. Cierre III-PIT, Funciones de Descarga para a) Conducto de regulación, b) Vertedero de crecidas extraordinarias, c) Canal fusible de crecidas excepcionales

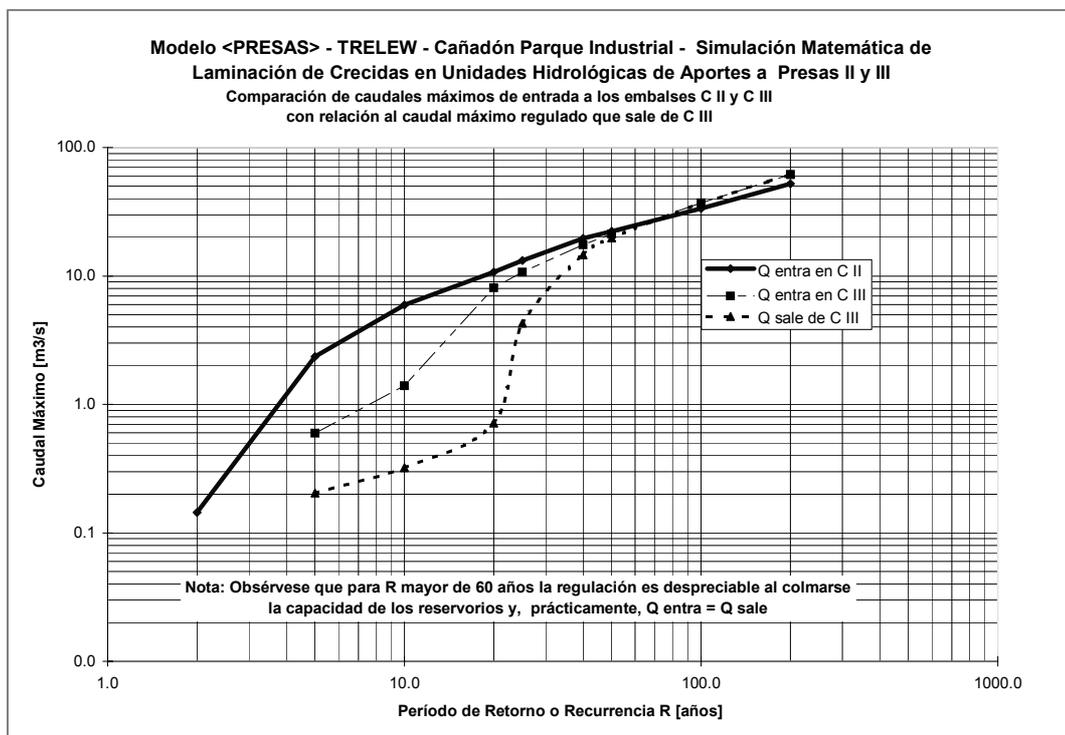


Fig. N°: 69. Comparación de caudales ingresantes a ambos embalses (Presas II y III) y Saliente (Presa III) para distintas recurrencias. Las funciones generadas muestran el efecto regulador del sistema para distintas recurrencias.

PRESAS96.XLS  
 MODELO: PRESAS - v96.XLS  
**MODELO MATEMATICO DE TRANSFORMACION LLUVIA CAUDAL CON PRESAS DE LAMINACION DE CRECIDAS**  
 Para pequeñas cuencas aluvionales en áreas típicas de la meseta semiárida patagónica  
 D.I.H.yC - F.I. - U.N.P.S.J.B.

DATOS UTILIZADOS PARA CORRIDAS CON PRESAS NUEVAS C II y CIII (incluye Vaso del Ferrocarril)					
Número de Presas de Laminación	2				
Presa:	1	2	3	4	5
<b>DATOS ESTRUCTURA ORIFICIOS</b>					
	C II	C III+Ferro			
Octubre 1.999					
Cota Nivel Orificios 1 [m]	1.00	0.50			
Cota Nivel Orificios 2 [m]	999.00	1.50			
Nro. orificios en Nivel 1	1.00	1.00			
Nro. orificios en Nivel 2	0.00	1.00			
Cota Nivel Vertedero ppal	3.60	3.60			
Luz vertedor ppal [m]	12.00	14.00			
Volúmen Embalse inicial	0.00	0.00			
<b>PARAMETROS CANAL VERTEDEDOR LATERAL (FUSIBLE)</b>					
Cota solera	4.30	4.30			
Ancho de Base	20.00	30.00			
Talud	3.00	3.00			
Pendiente Longitudinal	0.01	0.01			
<b>PARAMETROS CURVA ALTIMETRIA VOLUMEN DE EMBALSE Y ADICIONALES</b>					
Donde: $\{H=a+b*V+c*V^2\}$ , o bien si $c=0$ , $\{H=a*V^b\}$					
Coefficiente a	0.08780000	0.00930000			
Coefficiente b	0.31740000	0.50200000			
Coefficiente c	0.00000000				
La Presa descarga hacia Embalse Presa:	2	3			
Cota a plano referencia H0	24.50	23.50			
Coefficiente "a" de vertedero ppal, $q = aH^3+bH^2+cH+d$	-0.3921	-0.3921			
Coefficiente "b" de vertedero ppal, $q = aH^3+bH^2+cH+d$	6.4591	6.4591			
Coefficiente "c" de vertedero ppal, $q = aH^3+bH^2+cH+d$	-30.79	-30.79			
Coefficiente "d" de vertedero ppal, $q = aH^3+bH^2+cH+d$	45.41	45.41			
Cota coronamiento presa	30.00	29.00			
Cota umbral vertedero ppal	28.10	27.10			

**Cuadro Nro.: 21. Ej: Tabla de datos (Parámetros de entrada) Rutina PRESAS, Sistema GAIMAN**



En la foto (Fig. N°: 70), a la derecha, el embalse de la pequeña presa. A la izquierda, el embalse causado por el antiguo “Terraplén del Ferrocarril”. Se aprecia el desagüe hacia el populoso Barrio “Mil Viviendas”. Al fondo, sector del Parque Industrial y de chacras.

**Fig. N°: 70. Vista aérea del sector del Cierre III y Terraplén del Ferrocarril, Parque Industrial de Trelew, durante la tormenta extraordinaria del 24/25 de Abril de 1998.**



**Fig. N°: 71. Imágenes de la inundación del Barrio Mil Viviendas durante la tormenta extraordinaria del 24/25 de Abril de 1998. (Sainz Trápaga, José; en Serra, Juan, et al, 2001)**

Las fotos (Fig. N°: 71) son elocuentes del impacto de la inundación causada por la lluvia, donde el equivalente a la precipitación de *un año y medio* llovió en *un día y medio*. El pico de la crecida erosionó y rompió el contacto de terraplenes con los vertederos a causa del robo de mallas de alambre de gaviones de protección y al taponamiento de los vertederos con camiones de escombros por actos vandálicos.



**Fig. N°: 72. Vista del Vertedero del Cierre III, Cañadón del PIT, luego de la tormenta 25/4/98.**

En la foto (Fig. N°: 72), hacia ambos lados y el piso de la estructura se observan los restos del taponamiento con escombros producidos con anterioridad de la tormenta, que obstruyeron la salida del embalse. En el pico de la crecida y obstruida la salida de las aguas, la presa derramó sobre su coronamiento por un corto período de tiempo. En minutos, la presión del agua “destapó” abruptamente el vertedero descendiendo el nivel de embalse a los niveles máximos admitidos, pero el escurrimiento sobre el terraplén fue lo suficiente para causar daños irreversibles en el terraplén que provocaron medio día después la falla generalizada de la presa. Aunque el pico de la onda de crecida fue impactante, puede sostenerse que aún así, la presencia de las presas retardaron los volúmenes de agua que se descargaron sobre el área urbana aguas abajo, vaciando su contenido en 4 días, el doble del tiempo que hubiera llevado la descarga si las pequeñas presas no hubieran estado.

Las investigaciones realizadas, fueron volcadas en un *Taller de Evaluación Técnica*, de carácter público, sobre los acontecimientos vividos en el Valle Inferior del Río Chubut y Puerto Madryn como consecuencia de este evento meteorológico excepcional.

La reconstrucción de las presas del Parque Industrial de Trelew se enmarca en un plan que incluye importantes acciones no estructurales para la resolución de este complejo problema, donde se han desarrollado grandes urbanizaciones dentro de cañadones.

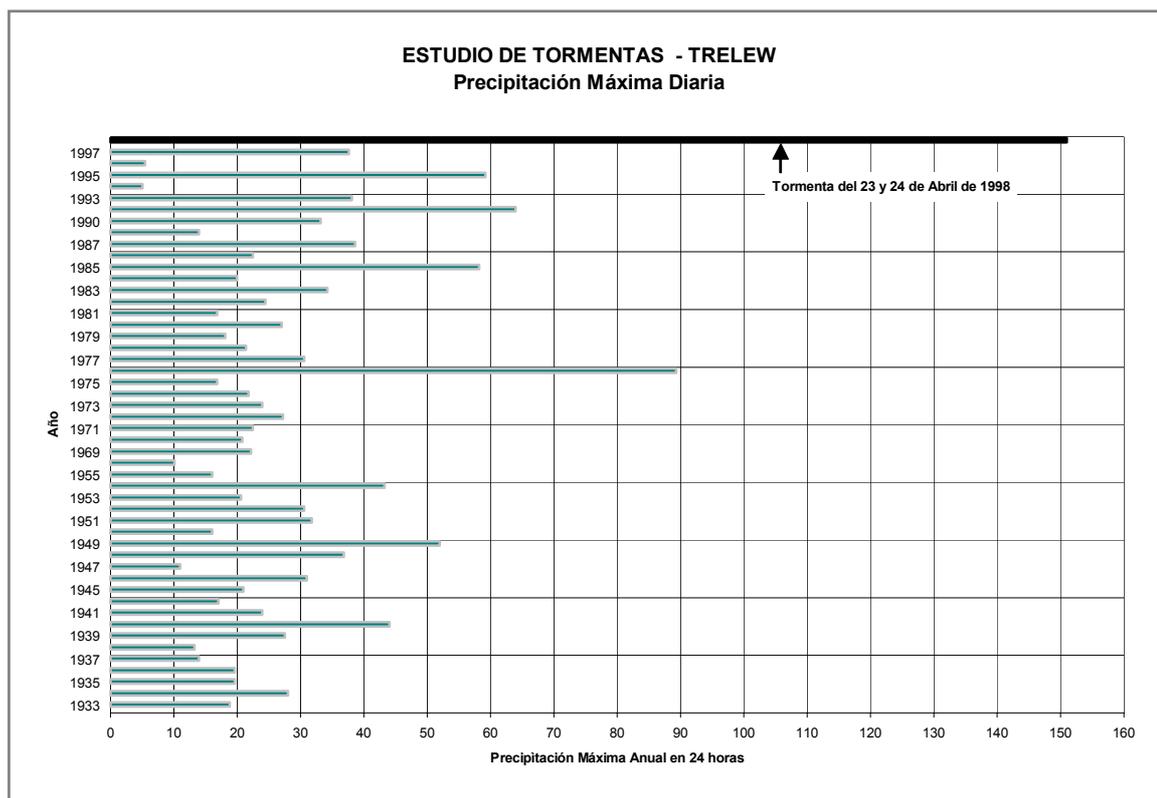


Fig. N°: 73. Lluvia máxima registrada en Trelew, Chubut. La precipitación máxima diaria de la tormenta duplicó el máximo registro histórico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) desde 1933 en adelante, con el agravante de que en las horas posteriores totalizó 254 mm en 54 horas de lluvia.

**TORMENTA EXTRAORDINARIA DEL 23/24 Abril de 1998  
TRELEW - PCIA. DEL CHUBUT**

T [Hs]	T [min]	Fecha - Hora	Pp Acum.	Pp Parcial
0	0	22/4/98 21:00		
6	360	23/4/98 3:00	5.0	5.0
12	720	23/4/98 9:00	16.0	11.0
18	1080	23/4/98 15:00	49.0	33.0
24	1440	23/4/98 21:00	67.4	18.4
30	1800	24/4/98 3:00	78.9	11.5
36	2160	24/4/98 9:00	128.2	49.3
42	2520	24/4/98 15:00	171.0	42.8
48	2880	24/4/98 21:00	215.6	44.6
54	3240	25/4/98 3:00	230.1	14.5

Tabla Nro.: 4. Lluvia máxima registrada en Trelew, Chubut, 23 al 25 de Abril de 1998.

### 3.2. CUENCO ALUVIONAL AREA DIQUE AMEGHINO A BOCA TOMA – VIRCH (DBT)

**Referencias:** *Proyecto de Investigación Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el VIRCh, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, (Serra Juan et al, SCyT, UNPSJB, 1995/98),*

El cuenco Aluvional DBT (Fig. N°: 10 y Fig. N°: 15) se ubica en la región del Valle Inferior del Río Chubut, entre el Dique F. Ameghino y Boca Toma. Aguas debajo de este paraje, el Río discurre hasta su desembocadura en el mar, recorriendo a su paso las localidades ribereñas de 28 de Julio, Dolavon, Gaiman, Trelew y Rawson.

En esta área, una sucesión de cuencos hidrológicamente independientes y convergentes desde las bardas de la meseta, aportan aguas torrenciales al cauce principal del Río, cargadas de sedimentos originados en las bardas de suelos semidesnudos de la región de contacto entre la meseta y el valle. La regulación de las aguas por el Dique a partir de la década del '60, ha disminuido sensiblemente la capacidad de transporte de sedimentos del Río, iniciando un progresivo proceso de atrofiamiento del cauce y la pérdida de capacidad hidráulica de conducción, en la búsqueda del nuevo perfil de equilibrio del paisaje.

Su extensión comprende una superficie estimada del orden de las 100.000 has, integradas por 32 cuencos identificados (16 a cada margen), de distintos tamaños y potencialidad (Tabla Nro.: 5). Pocos kilómetros aguas abajo, en dirección NE, se asienta la Colonia del VIRCh, radicada a fines del Siglo XIX con el arribo de los primeros inmigrantes de la gesta Galesa. Sin embargo, el área aluvional carece de desarrollo de infraestructura o asentamientos poblacionales importantes que comprometan su estado natural. Las principales actividades antrópicas que en distintos grados modifican el paisaje son la agropecuaria de meseta (cría ovina extensiva) y la explotación de canteras de arcillas (caolineras).

Los estudios realizados comprendieron una metodología integrada para el análisis aluvional y de predicción de erosión hídrica, concluyendo con la presentación de mapas temáticos del riesgo en las distintas Unidades Hidrológicas que impactan en el valle inferior. En el siguiente ejemplo, se resumen las principales tablas y gráficos que determinan los caudales máximos con el modelo GAIMAN.<sup>15 1617</sup>

---

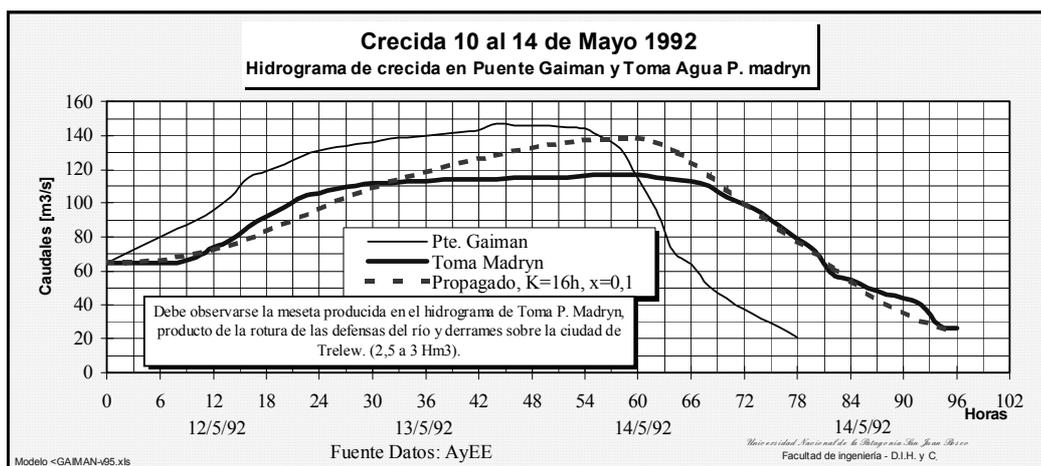
<sup>15</sup> -- Serra Juan, Riesgo de Erosión Hídrica en el Cuenco Aluvional del Area Dique Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut, Pcia. Del Chubut. Cuadernos del CURIHAM, UNR, Vol 5, Nro. 2, 2do Sem. 1.999.

<sup>16</sup> --Serra, Juan; El Riesgo Aluvional, Cuenco Aluvional del Area Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut, Pcia. del Chubut; SCYT, UNPSJB, 1999.

<sup>17</sup> Serra Juan, et al, Modelo <VIRCH> de simulación de hidrogramas de crecidas aluvionales y su propagación en el cauce inferior del Río Chubut. SCyT, UNPSJB, 1995.

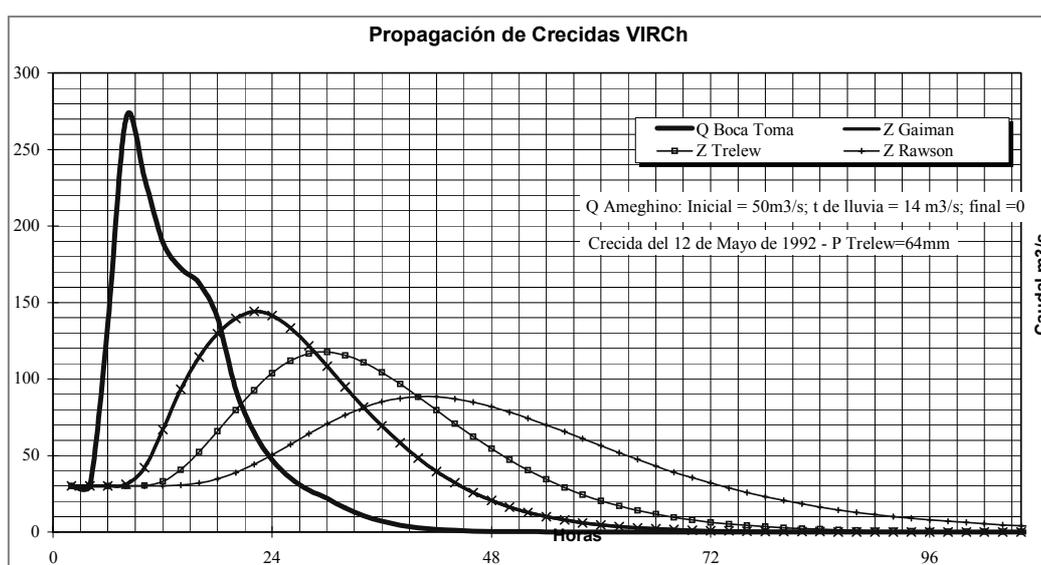
PI: Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique F. Ameghino - Boca Toma											
AREA ALUVIONAL DIQUE F. AMEGHINO - BOCA TOMA											
Parámetros Físicos principales de Cuencos y Subcuencos											
Fuente: Archivo CAD virch98.dwg ; DIIlyC, Diciembre 1998											
CUENCA	Suma Li m	Area Has	Perimetro m	L Cauce Pr. m	Subcuenca	Suma Li m	Area Has	Perimetro m	L Cauce Pr. m	DD m/ha	Lfs m
I1	9489	789.9	15728	5391						12.0	416
I2	12423	1038.5	15598	4103						12.0	418
I3	12155	1085.4	18193	4666						11.2	446
I4	22392	1708.1	22101	10434						13.1	381
I5	27797	1746.2	17478	7709						15.9	314
I6	12599	664.6	12110	4591						19.0	264
I7	16318	1015.9	14987	5850						16.1	311
I8	10190	547.9	10925	4015						18.6	269
I9	23365	1527.9	21155	3388						15.3	327
I10	13450	1544.4	21236	7282						8.7	574
I11	17757	796.1	15379	7043						22.3	224
I12	48311	2775.4	25332	8296						17.4	287
					I12-1	25111	1250.2	15850	5304	20.1	249
					I12-2	23200	1525.2	18169	4873	15.2	329
I13	20779	4845.1	40741	6216						4.3	1168
					I13-1	3883	1720.3	21675	2113	2.3	2215
					I13-2	16896	3124.8	26793	6216	5.4	925
I14	37812	3680.8	25822	12304						10.3	487
					I14-1	18914	1705.4	22977	8828	11.1	451
					I14-2	18898	1975.4	21644	7770	9.6	523
I15	27700	1875.0	20871	4443						14.8	338
I16	11675 s/c		22512	8034							
					3117 I16-1						
					I16-2						
D1	24710	1004.5	13617	3332						24.6	203
D2	18581	1002.8	10817	6588						18.5	270
D3	13709	900.4	12172	5101						15.2	328
D4	6223	645.1	10624	2207						9.6	518
D5	94706	6551.8	40987	14635						14.5	346
					D5-1	11666	997.9	13831	4260	11.7	428
					D5-2	31825	1860.6	17508	6903	17.1	292
					D5-3	15108	1307.5	15029	5952	11.6	433
					D5-4	9183	491.3	11487	4726	18.7	268
					D5-5	10657	807.1	14069	5270	13.2	379
					D5-6	16289	1087.5	15155	8168	15.0	334
D6	14686	1376.2	18260	2736						10.7	469
D7	45989	3624.2	25213	8621						12.7	394
					D7-1	14854	1855.2	18201	5801	9.0	557
					D7-2	8974	835.9	11746	2404	10.7	466
					D7-3	11701	594.4	11098	4175	19.7	254
					D7-4	10460	538.7	12267	3816	19.4	257
D8	9210	492.6	10340	3386						18.7	267
D9	12165	622.6	12591	4112						19.5	256
D10	7938	714.7	18214	3145						11.1	450
D11	250982	13340.1	52277	20003						18.8	268
					D11-1	73861	2788.4	25341	16122	26.5	189
					D11-2	19002	1792.6	25307	10750	10.6	472
					D11-3	18698	667.1	11359	3920	28.0	178
					D11-4	28596	1935.0	24467	11860	14.8	338
					D11-5	65702	4000.1	25188	9467	16.4	304
					D11-6	25463	1374.3	16825	568	18.5	270
					D11-7	19660	782.5	15468	6534	25.1	199
D12	18474	1995.1	23374	4323						9.3	540
D13	100315	5887.7	41004	16920						17.0	293
					D13-1	40197	2560.5	23932	9724	15.7	318
					D13-2	38018	2219.7	23281	6480	17.1	292
					D13-3	22100	1107.4	14674	4690	20.0	251
D14	270608	17703.0	62170	17313						15.3	327
					D14-1	51237	3528.9	24466	9484	14.5	344
					D14-2	42439	1912.0	20890	7988	22.2	225
					D14-3	31153	1785.5	29580	12193	17.4	287
					D14-4	50886	3696.9	26879	10499	13.8	363
					D14-5	18095	1379.6	24559	10004	13.1	381
					D14-6	28264	2353.9	22440	6774	12.0	416
					D14-7	41384	2464.2	27427	11356	16.8	298
					D14-8	7150	582.1	18018	6854	12.3	407
D15	131408	10902.1	51382	24952						12.1	415
					D15-1	64193	4403.3	29546	10919	14.6	343
					D15-2	34877	3417.9	51024	9704	10.2	490
					D15-3	32338	3080.9	28350	7825	10.5	476
D16	24761		43908								
<b>TOTAL</b>	<b>1368677</b>	<b>92401.9</b>				<b>1000910</b>	<b>69310.2</b>				
Med										14.9	400
Max										12.0	416
Min										2.3	178

Tabla Nro.: 5. Cuencos del área aluvional del Valle Inferior del Río Chubut, entre Dique F. Ameghino y Boca-Toma



**Fig. N°: 74. Crecida extraordinaria por lluvias en el Cuenco Aluvional DBT y la Región del VIRCh del 12 de Mayo de 1992 (Lluvia de referencia de 64 mm/día): Ajuste de coeficientes de Propagación por el Método de Muskingum en el tramo de Río entre Puente Gaiman y Toma de Agua Servicoop.**

En el gráfico, elaborado a partir de aforos realizados por AyEE para la crecida señalada, se muestra la propagación de la onda real y simulada por el Método de Muskingum (calibración para modelo GAIMAN) en el tramo de Río entre las ciudades de Trelew y Gaiman (Fig. N°: 74 a Fig. N°: 79). El “aplastamiento” de la curva del hidrograma en Trelew (Toma “Servicoop”) durante la crecida, fue debido a la rotura de terraplenes de defensa en ese tramo a la madrugada del día 13 de Mayo, y la inundación de barrios populosos de la ciudad ubicados en áreas deprimidas cercanas al Río. La magnitud del orden de 2 Hm<sup>3</sup> que surge de la diferencia de ambas curvas, da un orden indicativo del volumen de los derrames derivados hacia los bajos urbanos.



**Fig. N°: 75. Modelo GAIMAN: Calibración de coeficientes de Muskingum para propagación de ondas de crecida en el cauce del VIRCh: a) Onda de crecida observada el 12 de Mayo de 1992; b) Onda de crecida simulada para crecida de simulación en 1994**

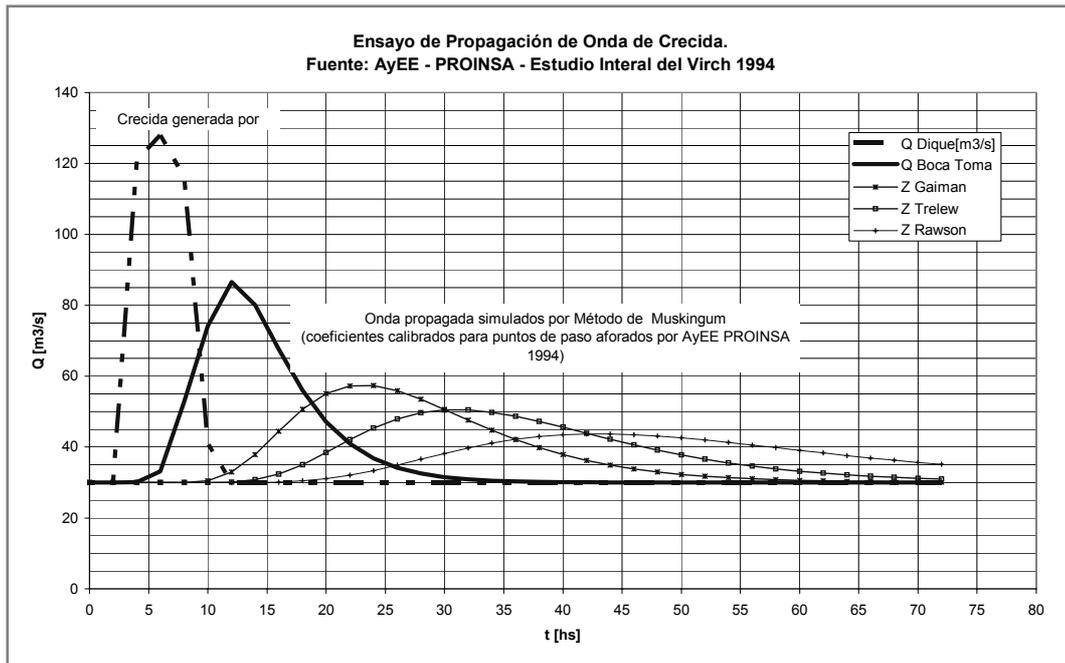


Fig. N°: 76. Modelo GAIMAN): Hidrograma resultante para una lluvia de 64mm/día (similar a la del 12 de Mayo de 1992) y su propagación por el cauce inferior del VIRCh

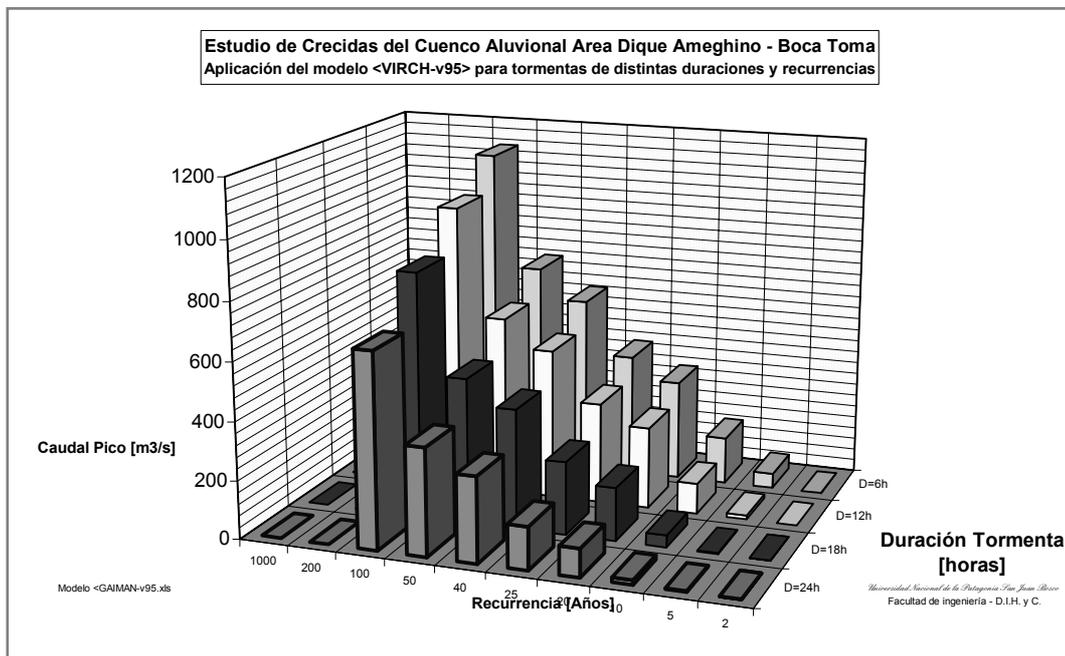


Fig. N°: 77. Simulación GAIMAN para Tormentas sintéticas integradas: Caudal Pico en Boca Toma (producido por lluvias en todos los cuencos (32) con propagación por método cinemático de Muskingum en el tramo principal del Río Chubut desde el pie de cuenca hasta la sección de control)

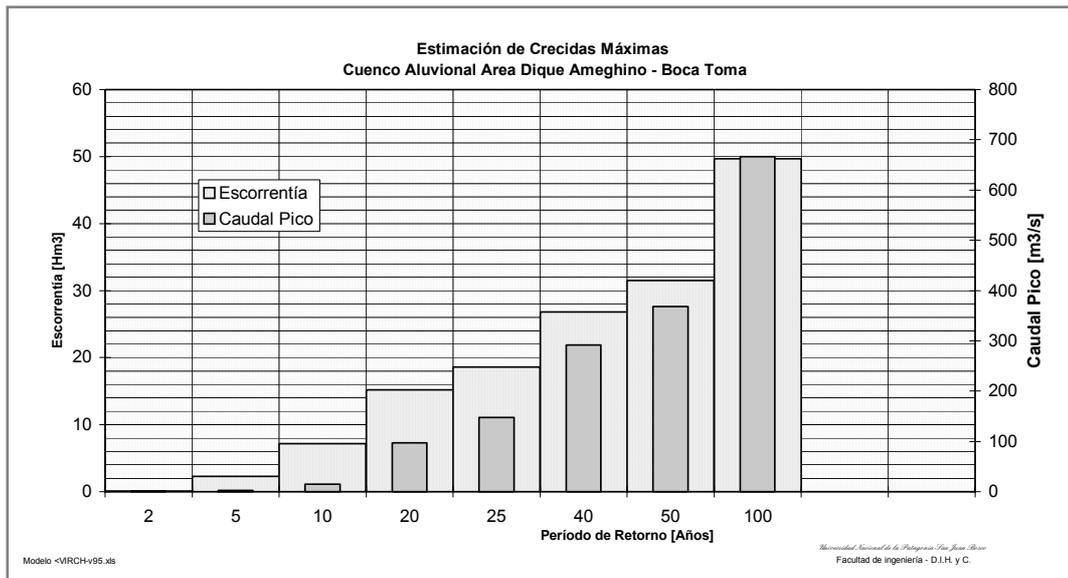


Fig. N°: 78. Modelo GAIMAN: Síntesis de cálculo de caudales máximos producidos en Boca Toma por crecidas del área Aluvional DBT (lluvias máximas diarias).

#### 4. CAÑADÓN BARAIBAR, GAIMAN: INFORMACIÓN ACCESORIA

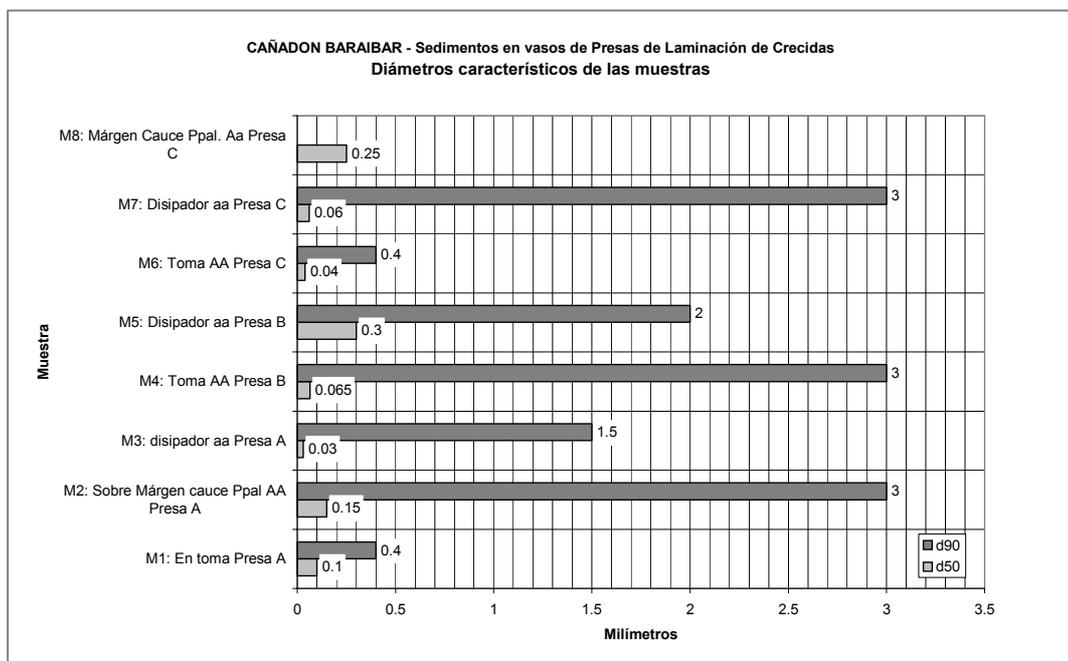


Fig. N°: 79. Suelos tipo del Cañadón Baraibar: sedimentos en cauce

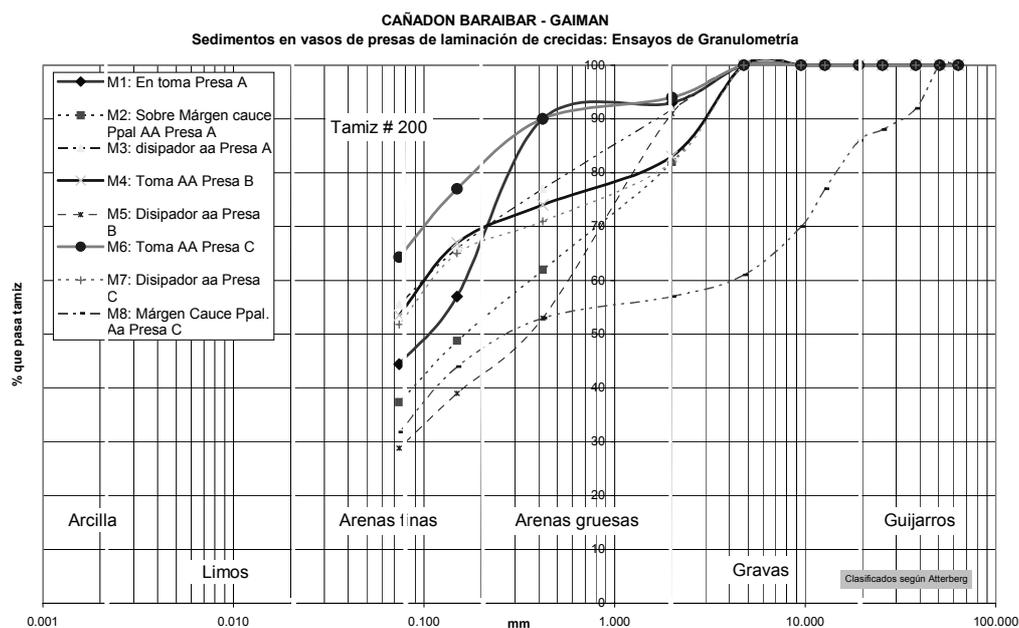


Fig. N°: 80. Suelos tipo del Cañadón (laderas y cauce) (Serra Juan et al, 1998, SCyT, UNPSJB)

Cañadón Baraibar - GAIMAN  
Microembalses de Laminación de Crecidas Aluvionales A, B y C  
Resumen de Parámetros Hidráulicos de las Obras de toma y Embalses  
**Monitoreo de Alturas Máximas de embalses Diciembre 1995 a Noviembre 1997**

Parámetro	Cierre A	Cierre B	Cierre C
Cota CERO hidráulico	108.00	99.00	91.00
Cota 1er. Nivel de orificios	108.50	99.55	92.29
Cota 2do. Nivel de orificios	111.98	100.55	93.24
Cota vertedor principal (pipa)		102.18	95.24
Cota umbral vertedero	112.00	102.00	95.24
Luz vertedero	5.00	5.00	5.00
Taludes laterales vertedero	2.00	2.00	2.00
Cota máxima embalses a R=100 años	112.11	102.46	95.41
Volúmen a R=100 años	6850.00	9100.00	7600.00
Altura Neta "h" Máxima embalse Período Dic/95 a Nov/97	1.33	1.27	1.72
Altura Máxima embalse Período Dic/95 a Nov/97	109.33	100.27	92.72
Coeficientes de Embalse:			
a	0.6674000	0.0142000	0.3053000
b	0.0006929	0.5985000	0.2980000
c	- 0.00000028	-	-
<b>Volúmen máximo embalsado en el período indicado [m<sup>3</sup>]</b>	<b>1,000</b>	<b>1,830</b>	<b>330</b>
<b>Caudal Máximo erogado estimado [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>0.030</b>	<b>0.040</b>	<b>0.050</b>

Cuadro Nro.: 22. Datos básicos de las Presas de Laminación de Crecidas A B y C.  
Construcción: 1993

## SÍMBOLOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### 1. GLOSARIO

**28 de Julio**, 28 de Julio, Chubut.

**AyEE**, Agua y Energía Eléctrica.

**Baraibar**, Cañadón Baraibar, Gaiman (VIRCh)

**CASC2D**, Modelo hidrológico distribuido,  
Colorado State University (Julien,  
1994).

**CIHRSA**, Centro de Investigaciones Hídricas  
de la Región Semiárida, Carlos Paz,  
Córdoba.

**Comodoro Rivadavia**, Ciudad de Comodoro  
Rivadavia, Pcia. del Chubut.

**CONICET**, Consejo Nacional de  
Investigaciones Científicas y Técnicas

**CORFO**, Corporación de Fomento del  
Chubut, Pcia. del Chubut.

**Chubut**, Pcia. Del Chubut, Argentina..

**DAC (CAD)**, Diseño asistido por computador.

**DBT**, Area Aluvional Dique Amehino a Boca  
Toma, VIRCh.

**DGEyP**, Dirección General de Estudios y  
Proyectos, Subsecretaría de Servicios y  
Obras Públicas (SSOP), MESOP,  
Chubut, 1982/90.

**DGRH**, Dirección General de Recursos  
Hídricos, Subsecretaría de Servicios y  
Obras Públicas (SSOP), MESOP,  
Chubut, 1980/82.

**DICH**, Departamento de Ingeniería Civil  
Hidráulica, Facultad de Ingeniería,  
UNPSJB.

**Dolavon**, Localidad de Dolavon, Pcia. del  
Chubut

**Esquel**, Ciudad de Esquel, Pcia. del Chubut.

**Gaiman**, Ciudad del VIRCh, Pcia. del Chubut.

**GAIMAN**, Modelo Hidrológico (Serra, J.,  
1983)

**HEC 1**, Hydrologic Engineering Center,  
Modelo hidrológico lluvia-caudal.

**HEC HMS**, Hydrologic Engineering Center,  
Hydrologic Modeling System.

**HEC RAS**, Hydrologic Engineering Center,  
River Analysis System.

**IDRISI**, GIS, Clark University Graduate  
School of Geographi.

**INA**, Instituto Nacional del Agua.

**INCYTH**, Instituto Nacional de Ciencia y  
Técnica Hídricas.

**IPVDyU**, Instituto Provincial de la Vivienda y  
Desarrollo Urbano, Pcia. del Chubut.

**KINEROS**, Modelo Hidrológico  
pseudodistribuido (US Department of  
Agricultura).

**KINEROS**, Modelo hidrológico distribuido,  
Michaud, Arizona (1992).

**MDT (DEM)**, Modelo Digital de Terreno .

**MESOP**, Ministerio de Economía, Servicios y  
Obras Públicas (Chubut, 1980/90).

**OMEGA**, Modelo hidrológico distribuido  
(Correia y Matias, 1991).

**OMM (MMO)**, Organización Meteorológica  
Mundial.

**PDR**, Funciones de Precipitación-Duración-  
Recurrencia (ecuaciones regionales de  
tormentas).

**PHM**, Paisaje Hídrico de Meseta

**PHMP**, Paisaje Hídrico de Meseta Patagónica

**PIT**, Parque Industrial de Trelew, Pcia. del  
Chubut

**PIXEL**, Modelo hidrológico distribuido,  
(Serra, J., 1999).

**PMP**, Precipitación Máxima Probable.

**Puerto Madryn**, Ciudad de Puerto Madryn,  
Pcia. del Chubut.

**Rawson**, Ciudad capital de la Provincia del  
Rawson, Chubut.

**SCS**, Soil Conservation Service (US).

**SCyT**, Secretaría de Ciencia y Tecnología,  
UNPSJB.

**SHC**, Sistema Hidrológico Complejo.

**SHM**, Sistema Hidrológico Mixto.

**SHT**, Sistema Hidrológico Típico (Fertonani,  
M., 1978).

**SIG (GIS)**, Sistema de Información  
Geográfica.

**TOPMODEL**, Modelo hidrológico distribuido  
Beven y Kirby (1979).

**TORDISE**, Modelo de cálculo de Tormenta  
de Diseño, (Serra, J, 1995).

**Trelew**, Ciudad de Trelew, Pcia. del Chubut.

**UEH**, Unidad de Estudio Hidrológico.

**UNPSJB**, Universidad Nacional de la  
Patagonia San Juan Bosco.

**VBA**, Visual Basic para aplicaciones Microsoft.

**VIRCh**, Valle Inferior del Río Chubut.

**WMS**, Watershed Modeling System.

## 2. BIBLIOGRAFIA

### 2.1. BIBLIOGRAFIA CITADA

BEVEN, Keith J. y KIRKBY, M. J. (1979), *A physically based variable contributing area model of basin hydrology*, Hydrol. Sci. Bull., 24(1),43-69. UK.

BEVEN, Keith J, (1997), *Distributed Modelling in Hydrology: Applications of TOPMODEL*, Lancaster University, Wiley, Chichester, UK.

CAAMAÑO NELLI, Gabriel, FERTONANI, Miguel, PRENDES, Héctor y QUINODOZ, Hernán, (1979), *Análisis de sistemas hidrológicos no típicos – Bases teóricas y criterios metodológicos*, Proyecto Generación y Aplicación de Metodologías hidrológicas para Áreas de Llanura, Depto. de Hidrología Gral. y Aplicada, U.N. Litoral, Santa Fé, Argentina. Pub. IX Congreso Nacional del Agua, San Luis, Argentina, 1979.

CHOW, Ven T., (1964), *Handbook Of Applied Hydrology*, Ed. Mc Graw-Hill.

CHOW, Ven T. (1989), *Manual de Hidrología Aplicada*, 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.

FERTONANI, Miguel Ernesto, (1978), *Lineamientos Básicos para el desarrollo de la investigación hidrológica en áreas de llanura: aspectos conceptuales y problemática*, Informe del Centro Regional Litoral, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídrica (INCYTH), Santa Fé.

FRANCES GARCIA, Félix, (1996), *La modelación distribuida de avenidas*, Ed. Dpto. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente de la U. Pol. de Valencia, España.

HALLER, Miguel J. (1981), *Descripción geológica de la Hoja 43b, Puerto Madryn, Provincia del Chubut*, Boletín 184, 5 figs., 6 lám., 8 cuad., 1 mapa, Servicio Geológico Nacional Buenos Aires.

HERAS, Rafael, (1976), *Hidrología y Recursos Hidráulicos*, Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid: Ed. CEHyDG.

HUGHES Williams M., (1926), *A orillas del Río Chubut*, Pcia. del Chubut, Argentina: Ed. El Regional.

JULIEN, P.Y., SAGHAFIAN, B., and OGDEN, F.L., (1995), *Raster-based Hydrological Modeling of Spatially-varied Surface Runoff*, Water

Resources Bulletin, AWRA, Vol. 31, No. 3, June 1995, pp 523-536.

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.

MICHAUD, Jene and SOROOSHIAN, Soroosh, (1994), *Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed*, Water Resources Research, Vol. 30, No 3, p. 593-606.

OGDEN, Fred L., Ph.D., P.E. (1998), *A Brief Description of the Hydrologic Model CASC2D* Associate Professor, Dept. Of Civil & Environmental Engineering, U-37, University of Connecticut, Storrs, CT 06269. [http://www.eng2.uconn.edu/~ogden/casc2d/casc2\\_desc.htm](http://www.eng2.uconn.edu/~ogden/casc2d/casc2_desc.htm)

PONCE, Victor Miguel, (1989), *Engineering Hydrology: Principles and Practices*, Prentice Hall, ISBN 0-13-277831-9

SERRA, Juan y CLERICI, 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 Hídrica de Manejo y Control del VIRCh", Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan J., (1999), *Riesgo de Erosión Hídrica en el Cuenco Aluvional del Area Dique Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut, Pcia. del Chubut*. Cuadernos del CURIHAM, UNESCO, PHI, ISSN No. 1514-2906, Rosario, Argentina, 5, (2), 67-88.

SERRA, Juan J., (2000), *Limitaciones de disponibilidad hídrica del Río Chubut para nuevas áreas bajo riego o derivaciones para otros fines en el Valle Inferior*, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Córdoba2000, Tomo II, Memorias, Area: Hidráulica de Riego y Drenaje, pp. 693-702, ISBN 950-33-0267-6 / ISBN: 950-33-0270-6.

SERRA, Juan, SAINZ TRAPAGA, José, MALNERO, Andrés y CHACHERO, María., (2002a), *Aspectos más relevantes de la problemática hídrica en el Valle Inferior del Río Chubut*, XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Abril de 2002, Centro Nacional Patagónico, CONICET, Puerto Madryn.

- SERRA, Juan J., (2002b), *Lluvia equivalente por fusión de nieves en la estimación del caudal máximo en cuencas pluvionivales sin datos hidrométricos*. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pub. XIX Congreso Nacional del Agua, Carlos Paz, Córdoba, Agosto 2002. ISBN: 987-20378-0-9.
- SERRA, Juan J., MALNERO, Héctor A., CHACHERO, María J. y SAINZ TRAPAGA, José M., (2001), *Modelos físicos y matemáticos de aplicación para el control de Crecidas en ambientes torrenciales patagónicos*, Informes de Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- 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.
- SNYDER, F. F. (1938), *Synthetic Unit Hydrographs*, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 19, pt. 1, pp. 447-454..
- STAMPONE, Julio E., ICHAZO, Gustavo, SANTINELLI, Norma, SASTRE, Viviana y FURCI, Mónica, (1997), *Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Explotación*, Minera Ameghino SAMIC, Agosto de 1997, Facultad de Ciencias Naturales, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Pcia. del Chubut.
- STAMPONE, Julio, HALLER, Miguel, SERRA, Juan, GRECO, Winston, SORONDO, Alejandro, HARVEY, Miguel y MONTI, 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 SERVICOOOP, Puerto Madryn.
- TEMEZ, José R., (1978), *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España, ISBN 84-7433-040-8.
- TUCCI, Carlos E. M., PhD , SILVEIRA Andre, BENETTI, Antonio, LANNA, Antonio, SEMMELMAN, Franz, LOUZADA, José, BERTONI, Juan C., FILHO, Kamel Z., BELTRAME, Lawson F. S., BORDAS, Marc, PESSOA, Marcos, CAICEDO, Nelso, CHEVALIER, Pierre y PORTO, Rubem, CLARKE, Robin, (1993), *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, São Paulo, Brasil: Editora Universidade de São Paulo. ISBN 85-7025-298-6.
- WILLIAMS, H. M., (1945), *Discussion of Military Airfields*, Trans. ASCE, vol. 110, p. 820.

## 2.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

APARICIO MIJARES, Francisco J., (1999), *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, México: Editorial LIMUSA SA. ISBN 968-18-3014-8.

BAN, Javier y DAVIES SALA, (1995), *Determinación de la Tormenta de Diseño en el Cuenco Torrencial Experimental de Cañadón Baraibar - Gaiman*, Pcia. del Chubut., Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, "Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut", Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.

BERTONI, J. C., CHEVALLIER, C. y BOUVIER M., (2000) *Análisis relativo a la estimación del tiempo de concentración: aplicación a tres cuencas semi urbanizadas de la región central de Argentina*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Tomo II, pp. 249-358. Córdoba.

BERTONI, Juan C. y ZAMANILLO, Eduardo; (1989), *Modelación matemática en Hidrología Superficial - Modelos de tránsito de crecidas*, INCYTH – CIHRSA – CONICET, Carlos Paz, Córdoba.

BUREAU OF RECLAMATION, (1985), *Diseño de Presas Pequeñas*, 13ra., USA: Impresión Cia. Edit. Continental

CAAMAÑO NELLI, G. y C. M. GARCIA (1999) *Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso LogNormal*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIV, N° 3, Septiembre-Diciembre, pp. 37-44. D.F., México.

CAI, Centro Argentino de Ingenieros - PPI, Programa de protección contra Inundaciones, BIRF, SUCCE, UEC, (1999), *Definición y manejo de la Zonificación en las Llanuras Inundables*. Buenos Aires.

CAI, Centro Argentino de Ingenieros, (1999), *Seminario de Definición y Manejo de la Zonificación en las Llanuras Inundables, Programa de Protección contra Inundaciones*, 19 y 20 Agosto 1999, Buenos Aires.

CHACHERO María, *Actualización de las Ecuaciones de Tormentas en el Valle Inferior del Río Chubut*, Monografía, Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, "Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut", Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.

CUADERNOS DEL CURIHAM, *Revista de Estudios sobre la cuestión Hidroambiental*, Año 3, N° 3y4, 1997; Vol 4, N°2, 1998; Vol 5, N°2, 1999; Vol 6, N° 1y2, 2000; Vol 7, N° 1y2, 2001, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. Rosario. ISSN 1514-2906..

CUSTODIO, E.; LLAMAS, (1976), M. Manual de hidrología subterránea; España, Edic. Omega.

DOE, W.W. III, B. Saghafian, and P.Y. Julien, (1996), *Land-use impact on watershed response: the integration of two-dimensional hydrologic modeling and Geographic Information Systems*, J. Hydrol. Processes, 10:1503-1511.

ESTRELA MONREAL, Teodoro (1996), *Inundaciones: Impactos y Estrategias de Respuesta*, Monografía, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Madrid, España.

ESTRELA MONREAL, Teodoro, (1991), *Avenidas e Inundaciones*, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Madrid, España.

FERNÁNDEZ DE BOBADILLA, Federico J., (1996), *Corrección de Torrentes*; Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Madrid, España.

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.

FERRER, Javier, *Análisis estadístico de caudales de avenida*, Monografía M26, Miisterio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, CEDEX, ISSN 0211-6499, ISBN: 84-7790-140-6.

FRENCH, Richard H., (1988), *Hidráulica de canales abiertos*, México: Ed. Mc.Graw-Hill Interamericana. ISBN 968-451-445-x, ISBN 0-07-022-134-0.

HERAS, Rafael, (1983), *Recursos hidráulicos, síntesis, metodología y normas*, Madrid, España: Coop. de Publicaciones del Colegio de Caminos, Canales y Puertos. ISBN: 84-380-0031-2.

MARTINEZ MOLINA, Ignacio, (1986), *Estadística aplicada a la Hidrometeorología*, Publicación D-47 del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, España, ISBN 84-505-7386-6.

MONZALVE SAENZ, Germán, (1999), *Hidrología en la Ingeniería*, México: Ed. ALFAOMEGA Grupo Editor, S.A. de C.V.. ISBN 958-682-106-4.

- POUEY, Nora, (1998), *Erosión Hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos*, U. N. Rosario, Rosario, Argentina: Ed. UNR Editora.
- POUEY, Nora, (1999), *Azul, Marrón y Verde. Aspectos metodológicos para la elaboración de Modelos de ELA por acciones antrópicas en el desarrollo de los Recursos Hídricos*, U. N. Rosario, Rosario, Argentina: Ed. UNR Editora.
- PPI, Programa de protección contra Inundaciones – SUPCE – DPOH-SFE – SUCCE, (2000), *Seminario sobre regulación del uso del suelo en áreas inundables*, Santa Fé.
- PROINSA, (1994), *Estudio Integral del Valle Inferior del Río Chubut: Obras para la Sistematización del Cauce y Protección contra Inundaciones*; Pcia. del Chubut.
- SAINZ TRAPAGA José M. y MALNERO Héctor A., (1994), *Operación de Embalse Ameghino bajo severas restricciones por capacidad de conducción del cauce en el Valle Inferior del Río Chubut*, Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, “Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SAINZ TRAPAGA, José M., (1996), *Pequeñas Presas de Laminación de Crecidas Torrenciales en proximidades de los núcleos urbanos del Valle Inferior del Río Chubut: Tipología de Obras y su Adaptación al Medio Ambiente*, Monografía, Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, “Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- SCHOKLITSCH, A. (1961), *Tratado de Arquitectura Hidráulica*, Barcelona, España: Edit. Gustavo Gili.
- SERRA Juan J. y SAINZ TRAPAGA José M., (1996), *El Control Aluvional en Areas Urbanas del Valle Inferior del Río Chubut*, Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, “Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco. Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan J. y CHACHERO María J., (1995), *Modelo <VIRCH> de simulación de hidrogramas de crecidas aluvionales y su propagación en el cauce inferior del Río Chubut (Tomo I y Tomo II, Anexos)*, Informe de Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, “Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan J., MALNERO, Héctor A., SAINZ TRAPAGA, José M., CHACHERO, María J. y VILLEGAS, Teddy, (1995), *Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final*, Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, (1987), *VIRCh: Problemática Hídrica: Pautas para su estudio*, Monografía, Informe IDTH 2/87, Proyecto N°. 38/1986-1990, “Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del VIRCh”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, (1994) *Modelo <RAWSON> Simulación Lluvia-Escorrentia en Pequeñas Areas Llanas de la Meseta Semiárida Patagónica, con escasez de datos*; Monografía, Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, “Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, (1994), *Caracterización estadística hidrológica del Río Chubut en Los Altares*, Monografía, Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, “Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, (1999), *El Riesgo Aluvional, Cuenco Aluvional del Area Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut*, Monografía, Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 “Modelos físicos y matemáticos de aplicación para el control de Crecidas en ambientes torrenciales patagónicos”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, (1994), *Red de Monitoreo y Control ambiental del cauce del Valle Inferior del Río Chubut*; Monografía, Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, “Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.
- SERRA Juan, SAINZ TRAPAGA José, MALNERO, Andrés, CALDERON, Miguel, CHACHERO María, ROSSI, Carla y RUIBAL, Hugo, (2001), *Estudios Básicos, Proyecto de Obras y Plan Director de Control de Crecidas para el Saneamiento del Arroyo Esquel, en la Provincia del Chubut*, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan

Bosco y Consejo Federal de Inversiones. Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan C. y BERTONI, Juan C. (1982), *Estudio y proyecto de Control Aluvional Cerro La Zeta*, ciudad de Esquel, Inf. Bibl. DGEyP, MESOP, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan J., SAINZ TRAPAGA, José M., GRECO, Winston H., MALNERO, Héctor A., VAZQUEZ, Victor y SORONDO, Alejandro, (1996-97), *Estudio y Proyecto de Obras Complementarias de Control de Crecidas en Cuencas Urbanas de Puerto Madryn, Dolavon y Gaiman*, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (CORFO CHUBUT. Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, (1984), *Informe de Hidrología del Estudio de Control Aluvional Cañadón Baraibar, Gaiman*, Pcia. del Chubut, Monografía, 43 pgs., Inf. Bibl. DGEyP, MESOP, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, ICHAZO, Gustavo, SAINZ TRAPAGA, José, CLERICI, Felipe, MALNERO, Héctor A. y VILLEGAS, Teddy, (1990), *Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final*, Proyecto N°. 38/1986-1990, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, MALNERO Andrés, CHACHERO, María, SAINZ TRAPAGA, José y SORONDO, Alejandro, (1998), *Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut: Informe Final*, PI N° 194/1995-1998, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, MALNERO, Héctor, SAINZ TRAPAGA, José M. y CHACHERO, María J., (2001), *Caracterización de crecidas y riesgo aluvional en el Valle Inferior del Río Chubut*, Informe de Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 "Modelos físicos y matemáticos de aplicación para el control de Crecidas en ambientes torrenciales patagónicos", Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, SAINZ TRAPAGA, José y SORONDO, Alejandro, (1995), *Reacondicionamiento de Cauce y Protección de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut: Plan Director*, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (CORFO CHUBUT. Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, SAINZ TRAPAGA, José, MALNERO, Héctor, GRECO Winston, VILLEGAS, Teddy y VAZQUEZ, Victor, (2000), *Estudio de refacciones y mejoras al sistema de presas del Cañadón del Parque Industrial de Trelew*, Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Informe de Convenio Facultad de Ingeniería, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco y Corporación de Fomento del Chubut (CORFO CHUBUT. Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, SAINZ TRAPAGA, José, GRECO Winston, MALNERO, Hector, VILLEGAS, Teddy y VAZQUEZ, Victor (1992), *Plan de Obras de Emergencia de Control de Crecidas Aluvionales, Informe de Revisión*, Volumen 1 a 8, MESOP / IPVYDU, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan J., SAINZ TRAPAGA, José M., GRECO, Winston H. y MALNERO Héctor A., *La Seguridad en las obras hidráulicas de control de crecidas en cuencos aluvionales urbanos del Valle Inferior del Río Chubut y Puerto Madryn, Documento de Evaluación Técnica*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Civil, Facultad de Ingeniería, U.N. de la Patagonia San Juan Bosco, Trelew, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan, SCHLISHTING, Raúl, et al, (1983), *Informe de Hidrología del Estudio de los Niveles de Inundación Planta FAPA, aguas arriba del Azud Derivador a Meseta Intermedia*, 260 pgs.; Inf. Bibl., DGEyP, MESOP, Pcia. del Chubut.

SERRA, Juan; (1977), *Herramientas para la Evaluación de la Erosión Hídrica: Modelo <LADERAS-v97.xls>, de estimación de erosión en laderas torrenciales en el área aluvional Dique Ameghino - Boca Toma*, Monografía, Proyecto de Investigación PI N° 194/1995-1998, "Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino a Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut", Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

SORONDO, Alejandro, SERRA, Juan GRECO, Winston, et al, (1984), *Estudio de Control Aluvional y Desagües Pluviales de Puerto Madryn*, Etapas I y II, Tomos 1y2, 170 pgs., Inf. Bibl. DGEyP, MESOP, Pcia. del Chubut.

STAMPONE, Julio E. y CAMBRA, Higinio, (1990), *Estudio Hidrogeológico de la zona central de la emseta de Montemayor y su vertiente atlántica: Informe Final*, Proyecto de Investigación 1988-1990, Secretaría de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

TEMEZ PELAEZ, José; *Previsión de avenidas mediante modelos hidrometeorológicos*, CEDEX, U. Pol. de Madrid, Madrid, España.

VILLEGAS, Teddy, FERRARIA, Sergio, CHACHERO, María y SERRA, Juan, (1994),

*Estudio de Precipitaciones en el Valle Inferior del Río Chubut*, Informe de Proyecto de Investigación PI 138/1992-1995, "Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut", Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut.

WILLIAMS Eduardo J, (1902), La Colonia del Chubut y sus canales de Irrigación, (Informe Gerencia del Ferrocarril Central del Chubut), Pcia. del Chubut.

### 3. INDICE DE CITAS

- B**
- Beven, K., 43, 44, 89
- C**
- Caamaño Nelly, G., 21
- Ch**
- Chow, V., 19, 20, 22, 23, 28, 39, 42, 43
- Clérici, F., 90
- F**
- Fertonani, M., 20, 21, 60, 79
- Francés García, F., 43
- H**
- Haller, 49, 50
- Heras, R., 26, 29, 30, 31, 39, 41
- Horton, 45
- Hughes, W., 1
- I**
- Ichazo, 50
- J**
- Julien, 43, 44, 89
- K**
- Kirby, 43
- L**
- Linsley, 19, 40
- M**
- Malnero, H., 59
- Michaud, 43, 44, 89
- O**
- Ogden., F., 44, 45, 89
- P**
- Perez Soba Baro, A., 27, 29, 41, 95, 98
- Ponce, V., 43
- S**
- Saghafian, 44, 89
- Serra, J., 9, 27, 43, 46, 53, 59, 61, 90, 142, 150, 155
- Shames, 22
- Sherman, 41
- Snyder, M., 41
- Soba Baro, A., 29, 41, 95
- Sorooshian, 43, 44
- Stampone, J., 49, 50, 55
- T**
- Temez, 27
- Tucchi, C., 26
- W**
- Williams, 1, 41

## **AGRADECIMIENTOS**

A Nora Pouey y Federico Horne,

A la Universidad Nacional de Rosario,

A la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco,

A todos aquellos que día a día, trabajan y luchan en defensa de las instituciones que hacen posible la Universidad y la Educación pública.

©Juan Serra  
<http://www.mhig.com.ar/juanserra>  
Autor-editor  
2008, Chubut, Argentina



Las crecidas extraordinarias ocurridas en Mayo de 1992 y Abril de 1998, con muy graves consecuencias para la región del Valle Inferior del Río Chubut, me motivaron a investigar y profundizar conocimientos de las particularidades de las inundaciones en terrazas y mesetas patagónicas.

Este trabajo de investigación corresponde a mi tesis de “Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura” (U.N. Rosario, 2003), bajo la dirección del Dr. Federico Horne docente investigador de la U. N. Comahue. Centra el análisis hidrológico en el problema torrencial de paisajes de Meseta y ambientes propios de clima semiárido, en la Región Central de la Patagonia Argentina.

A partir de la observación regional del paisaje hídrico de meseta, y de una selección de casos conocidos, la investigación profundiza en los aspectos hidrológicos que diferencian o asemejan a problemáticas similares en los dos paisajes básicos, la montaña y la llanura. Procura estudiar y aportar nuevos conocimientos sobre esta problemática tan particular de la región patagónica, y proponer una metodología integrada para la estimación de crecidas máximas en mesetas.

En su desarrollo, se abordan las principales ideas, organización de la información, pasos y secuencias, modelos de aplicación, discusión, comentarios, que enmarcan la investigación y su método científico, aplicado en este caso a la resolución del problema de la hidrología y la determinación de los caudales máximos en paisaje de meseta.

**Juan Serra (\*)**

**Playa Unión, Chubut, Mayo de 2008**

(\*) Nacido en Paraná, Pcia. De Entre Ríos, Argentina (1953). Cursó estudios secundarios y universitarios en la ciudad de Santa Fé. En 1980 se radicó en la ciudad de Rawson, Pcia. Del Chubut.

Graduado de Técnico Auxiliar en Hidrología (1974) y de Ingeniero en Recursos Hídricos (1978) en el Departamento de Hidrología General y Aplicada (hoy Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas) Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina. Graduado de Magister en Recursos Hídricos en Zona de Llanura (Abril 2003) y de Doctor en Ingeniería -Mención en Hidráulica- (Agosto 2007) en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, de la Universidad Nacional de Rosario.

Actualmente, es docente-investigador, y Jefe del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, en la ciudad de Trelew, Pcia. Del Chubut, Argentina.

**ISBN: 978-987-05-4496-8**

ISBN 978-987-05-4496-8



9 789870 154496 8