

Ver pag. 111
25479

CONVENIO INCYTH-CFI

Informe Final de la Primera Etapa

ANALISIS DE LA INFORMACION
Y MODELO HIDROLOGICO DE LA
ZONA DEPRIMIDA DEL SALADO

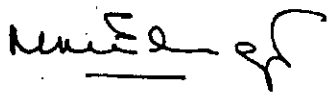
938

El presente es el Informe Final de la Primera Etapa del Convenio celebrado entre el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas y el Consejo Federal de Inversiones, para el análisis de la información de entrada y del modelo hidrológico de la cuenca del Río Salado elaborado por el grupo de Estudio de la Zona Deprimida del Río Salado (EZDS).

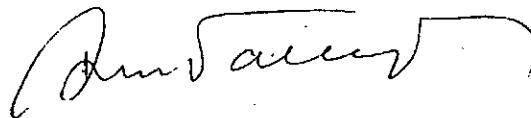
El trabajo fue realizado por personal de la planta técnica del INCYTH. El equipo profesional estuvo integrado por Lic. Miguel Auge, Ing. René Benavídez, Ing. Mónica Bufill, Sr. Luis Cruz, Dra Dora Goniadzki, Lic. Elena Martínez, Dr. Mario Núñez y Dr. Walter Vargas. Además se contó con el asesoramiento sobre temas específicos de otros profesionales pertenecientes a este organismo.

Se agradece al personal del EZDS, que prestó su inestimable colaboración, como así también a los representantes del CFI en el Comité de Coordinación Técnica, Ingenieros Oscar Ezcurra y César Litwin.

Buenos Aires, 5 de setiembre de 1980.



Marcos M. Elinger
Director Ejecutivo



Rubén M. Vallejos
Director

- 1- INTRODUCCION
- 2- EVALUACION DE LA INFORMACION BASICA
 - 2.1- Meteorología
 - 2.2- Hidrología
 - 2.3- Aspectos hidrogeológicos
 - 2.4- Factores edáficos
 - 2.5- Hidráulica
- 3- EVALUACION DEL MODELO MATEMATICO
 - 3.1- Discretización de la cuenca
 - 3.2- Método de solución
 - 3.3- Calibración
 - 3.4- Procesamiento
- 4- PROPUESTA PARA LA SEGUNDA ETAPA
 - 4.1- Complemento de la información existente
 - 4.2- Estructura del modelo
 - 4.3- Criterios de calibración
- 5- PLAN DE TRABAJO
 - 5.1- Listado de tareas
 - 5.2- Cronograma de tareas
 - 5.3- Informes parciales y final
 - 5.4- Personal
- 6- BIBLIOGRAFIA

Con el objeto de analizar sistemáticamente las actividades realizadas para el Estudio de la Zona Deprimida de Río Salado y formular un programa para la segunda etapa del convenio INCYTH-CFI, se establecerá un metodología comprehensiva para el análisis y desarrollo de modelos hidrológicos. Esta metodología fue tomada de Schaake (1978).

Los elementos básicos a considerar cuando se encara la formulación de modelos hidrológicos son, sintéticamente, los siguientes:

- 1- Identificación y evaluación de los objetivos.
- 2- Selección de los criterios para la realización de los objetivos.
- 3- Selección de el o los modelos apropiados para los objetivos
- 4- Estimación de los parámetros del modelo.
- 5- Verificación de la respuesta del modelo.
- 6- Diseño de los métodos de entrada o salida de información del modelo.
- 7- Uso del modelo en forma consistente con los objetivos.

A continuación se desarrollarán los puntos anteriores en el marco del Convenio CFI-PBA.

Objetivos del estudio

El acta-Acuerdo (A-A) suscripta entre el Consejo Federal de Inversiones (CFI) y la Provincia de Buenos Aires (PBA), fija como objetivo prioritario la instrumentación de medidas que atenúen los efectos de las inundaciones y sequías mediante el manejo del agua, suelo y vegetación y otras acciones conexas.

Como primera etapa del estudio, se propone hacer una descripción detallada del área e identificar los problemas relevantes relacionados con el agua y suelo que afectan a la región. Basándose en esta identificación, se deberán delimitar áreas naturales homogéneas y establecer prioridades para encarar acciones correctivas.

En base a los objetivos expuestos, el modelo hidrológico, a utilizar como herramienta de análisis, debería cumplir con los siguientes requisitos:

- 1- Suministrar información sobre la respuesta de la cuenca a la ocurrencia de precipitaciones intensas y sequías.
- 2- Servir como herramienta para determinar las acciones correctivas necesarias para obtener respuestas específicas de la cuenca.
- 3- Servir como base para la transferencia de información hacia los niveles de decisión para justificar las acciones que deben tomarse.

Criterios para el desarrollo del modelo

Los criterios establecen el nexo entre los objetivos propuestos y el modelo que debe cumplirlos. Algunos de los criterios relevantes son los siguientes:

- 1- Identificación de los fenómenos y elementos físicos que deben ser considerados.
- 2- Especificación de las respuestas que se esperan del modelo y su precisión.
- 3- Limitaciones en la disponibilidad de datos.

4- Costo de desarrollo y operación del modelo.

5- Limitaciones de tiempo para el desarrollo.

El primer criterio está estrechamente relacionado con los objetivos explícitos del estudio.

Los elementos que determinan la ocurrencia de inundaciones y sequías son las precipitaciones y la evaporación.

Resulta obvio que estos fenómenos deben presentarse en una forma particular para que su ocurrencia configure una situación catastrófica. Por ejemplo: una lluvia causará inundaciones sólo si la cantidad de agua precipitada en un lapso determinado de tiempo supera a la capacidad de absorción de agua de la cuenca. Del mismo modo, la evaporación llegará a configurar situaciones de sequía sólo si no se producen lluvias que restituyan el agua evaporada y se deprimen las reservas de la cuenca a un nivel perjudicial para plantas y animales.

Ambos procesos establecen requerimientos particulares en cuanto al nivel de resolución temporal y espacial en que se deben representar los fenómenos.

Las inundaciones se producen fundamentalmente por precipitaciones de corta duración - del orden de 1 a 5 días.

Por otra parte, las sequías son fenómenos espacialmente generalizados y temporalmente rara vez requieren una resolución menor que mensual.

El escurrimiento superficial está determinado por las características físicas de la cuenca, principalmente capacidad de infiltración, capacidad de retención en la superficie y en la matriz porosa del suelo, y pendientes. En tanto estos elementos son relevantes en la representación de los fenómenos de interés del estudio, deben ser considerados implícita o explícitamente, en particular si es posible actuar sobre ellos para modificar la respuesta de la cuenca.

El segundo criterio concierne a las respuestas que se esperan del modelo y a su precisión.

Las respuestas están ligadas a los efectos de las inundaciones y sequías sobre la estructura productiva de la región.

El efecto perjudicial de las inundaciones deriva, en primer término, de la saturación del suelo y de la cobertura con agua libre, consideradas en términos de extensión geográfica y de duración del fenómeno. Dadas las características de la cuenca, pueden despreciarse los daños causados por la energía cinética de la onda de crecida, debido a las bajas velocidades de propagación.

En cuanto a las sequías, su importancia primordial deriva de la disminución de la humedad del suelo por debajo de niveles mínimos necesarios para la subsistencia de las plantas. Este efecto debe ser definido respecto a la época del año en que se produce y a su relación con el estado vegetativo de los cultivos, la extensión geográfica y la duración del fenómeno.

En cuanto a la precisión que se puede esperar de un modelo, ésta es la resultante de la conjunción de diversos factores que participan de su estructura y operación.

En primer término, el hecho de modelar implica la adopción de criterios simplificadores para la representación de un sistema extremadamente complejo. Una parte sustantiva del esfuerzo que se invierte en la modelación debe ser dedicado a la tarea de decidir cuáles son los aspectos relevantes del sistema y el nivel de detalle con que se representarán.

En segundo término hay un error asociado a la medición de los fenómenos de entrada y salida de la cuenca y a la representatividad que se les otorga. Por ejemplo, se admite que los registros de precipitaciones por los métodos corrientes y de caudales en secciones estables tienen un error de $\pm 10\%$.

Por último, la estimación de los valores de los parámetros que dimensionan los procesos físicos que se representan en el modelo, está sujeta a errores de muestreo. Se pueden mencionar, a manera de ejemplos, la estimación de pendientes que no tienen en cuenta las pequeñas irregularidades del terreno, y el mapeo de suelos que admite que en una unidad haya intrusiones pertenecientes a otra, siempre que no supere un valor límite que en general se fija en el 15% del área involucrada.

Los parámetros físicos del modelo sirven como parámetros de calibración, por lo tanto su valor final puede ser distinto al de los ensayos que se hayan hecho para su determinación. Para evitar que tomen valores arbitra-

rios, normalmente se acota la variabilidad a un rango consistente con el sistema físico que se representa.

Todas estas fuentes de imprecisión se propagan en la simulación aunque no necesariamente en forma acumulativa. Para evitar dicha propagación, el modelo debe estar construido de forma que detecte y corrija automáticamente los parámetros de calibración relevantes para el control de los fenómenos que deben ser representados.

El tercer criterio se refiere a la disponibilidad de información. Este punto es particularmente crítico cuando se trata de simular el funcionamiento de una cuenca de la dimensión de la del Río Salado; difícilmente la información disponible tendrá el nivel de cobertura ideal para el desarrollo de un modelo complejo. Este problema está asociado a la heterogeneidad del medio físico que requeriría una muy alta densidad de muestreo, como así también al tiempo necesario para obtener series de datos de las variables temporales de suficiente longitud, el cual seguramente excede el tiempo disponible para el estudio. A estos factores hay que agregarles las implicancias en términos de costos y esfuerzos operativos que demanda la adquisición masiva de información.

Los dos últimos criterios de costos de desarrollo y operación del modelo y tiempo disponible para realizarlo, establecen un marco de referencia práctico para la tarea. Por una parte los resultados del trabajo deben servir para dar respuestas específicas en el tiempo requerido y por la otra, la inversión que represente, debe ser del orden de magnitud de

7

las tecnología alternativas.

En cuanto al costo de operación del modelo, si éste ha de servir como herramienta para evaluar acciones y situaciones, es de esperar que se lo utilice intensivamente y, por lo tanto, su costo de operación no debe representar una pesada carga sobre el presupuesto del comitente.

Respecto al tiempo que requiere el desarrollo de un modelo, se debe llegar a un compromiso entre los requerimientos del usuario de contar con esa herramienta de análisis en el momento en que es relevante un problema a solucionar, y la probable necesidad de desarrollar un modelo específico, ya que es difícil que un modelo de biblioteca sea suficientemente adecuado para una situación compleja como ésta.

Por razones de orden, los demás elementos para la formulación de modelos hidrológicos se desarrollarán previo a la propuesta que se formulará para la segunda etapa.

El trabajo realizado por el Estudio de la Zona Deprimida del Salado se analizará en el marco de los objetivos y criterios discutidos.

2 - EVALUACION DE LA
INFORMACION BASICA

2.1. Meteorología

Relevamiento de la información meteorológica

Del análisis del Informe final del EZDS se desprende que, tanto la precipitación como la evaporación fueron objeto de estudios a fin de determinar períodos base para los datos de ambas variables y realizar reconstitución y extrapolación de datos faltantes. En cuanto a las restantes variables meteorológicas, no surge de la documentación consultada que se haya realizado tratamiento estadístico alguno. En consecuencia, se hará referencia principalmente a las variables precipitación y evaporación.

En cuanto a los informes internos, en general, puede decirse que los que se refieren a los archivos disponibles reflejan exactamente lo hallado en los mismos, con la única excepción de los archivos originales de datos mensuales de precipitación a los que hace referencia en algunos informes internos. Estos archivos que se mencionan como existentes en discos, no habrían sido conservados de acuerdo a lo expresado por el personal que trabajó en aspectos computacionales. De cualquier modo se sabe que los archivos perforados y/o grabados contienen las reconstituciones y extrapolaciones efectuadas para completar las series.

Los archivos de precipitaciones diarias existentes en el EZDS son fotocopias de resúmenes del Servicio Meteorológico Nacio-

nal y en ellos es imposible distinguir los valores, ya que la fotocopia no permite apreciar el diferente color con que fueron consignados esos datos en el original. La reconstitución a que se alude en este caso consiste en obtener el valor diario de un mapa de isoyetas diario. No obstante ello, se piensa que esa información puede brindar buenas aproximaciones de los períodos de lluvias (diarios).

En lo referente a estudios sobre intensidad- duración- ocurrencia, se consignan las representaciones gráficas para las estaciones Azul y Capital Federal pertenecientes al trabajo de intensidades de lluvia de L. MEDINA y C. MOYANO (INCYTH).

En general , los informes internos que se refieren a los archivos, contienen instrucciones y programas de extracción de información, pero no figuran los archivos numéricos. Idénticos comentarios corresponden a los informes referidos a los archivos de evaporación.

En lo que se refiere a evaporación, hay informes que contienen cálculos de regresiones, discusiones, artículos sobre el tema y cálculos con el Método de Thornthwaite para algunas estaciones. Por otra parte, existe una representación de siete polígonos de Thiessen y mapas de evaporación mensual. Dado lo poco explícito de los informes internos respecto a las metodologías usadas para la representación de los diversos campos y períodos elegidos, es difícil ir más allá de un inventario en la mayoría de los casos.

Análisis de la información

Precipitación: Con la información disponible de precipitación, el área de Hidrología del EZDS realizó las siguientes tareas:

- Análisis de homogeneidad y selección de estaciones.
- Determinación de un coeficiente de peso de las estaciones pluviométricas.
- Asignación de precipitación a celdas de la cuenca.

En el análisis de homogeneidad y selección de estaciones pluviométricas, del total de estaciones con información suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional, se eligieron 171 por su ubicación geográfica dentro de la zona en estudio. Mediante un análisis de "diagramas de barras" de las estaciones pluviométricas, se determinó un período base de 41 años, desde 1930 hasta 1970. Las 171 estaciones se volcaron en mapas y se subdividió el área de estudio en 5 zonas: A, B, C, D y E. Se realizaron determinaciones de consistencia por el "método de las duplo acumuladas" con las estaciones de cada grupo y en caso necesario, con estaciones de solape. De las 171 estaciones se seleccionaron 110 estaciones básicas para las 5 zonas, de acuerdo al análisis de consistencia. Estas estaciones básicas presentaron interrupciones en la información y por lo tanto se reconstituyeron los valores correspondientes a esos períodos faltantes, usando correlaciones entre pares de estaciones, para completar el período total de 41 años en las 110 estaciones seleccionadas. Las series de valores mensuales de precipita-

1

ción para las estaciones de la cuenca fueron completadas reconstituyendo en total 4 166 valores. En el Anexo 1 se muestra un listado del número de estaciones originales por zona, número de estaciones seleccionadas por zona y número de valores mensuales reconstituídos.

Se reconstituyeron los valores faltantes mediante regresiones lineales. El período base elegido fue de 41 años. En la zona A se completó la información en el 50% del total de estaciones y, en 2 de ellas (SMN 416 y SMN 718) se extrapolaron valores de más de 15 años completos. En la zona B se completó la información en el 27.3% del total de estaciones, en la C el 33.3%, en la D el 86.6% y en la E el 63%. En las dos últimas zonas se reconstituyeron valores de más de 15 años completos.

En el Anexo 2 se incluyen listados con las estaciones cuya información pluviométrica fue reconstituida, clasificados por zona.

De los informes internos del EZDS consultados no se desprende que se haya realizado un estudio de error para el método elegido (regresiones lineales) para completar la información faltante en las estaciones pluviométricas. Por lo tanto y con el objeto de determinar la confiabilidad del método de trabajo utilizado, se decidió realizar en el INCYTH un estudio de error. Para ello se utilizó la información pluviométrica de un par de estaciones seleccionadas en el EZDS (PMU 73 y PMU 26), con sus series mensuales completas para el período básico (41 años).

Con esta información se calcularon los valores medios para ambas estaciones, el coeficiente de correlación, la recta de regresión y las series de errores absolutos, relativos y porcentuales, definidos como sigue:

$$\Delta(\text{error absoluto}) = \text{valor observado} - \text{valor calculado}$$

$$\mathcal{E}(\text{error relativo}) = \frac{\text{valor observado} - \text{valor calculado}}{\text{valor observado}}$$

$$\mathcal{E}\%(\text{error porcentual}) = \mathcal{E} \times 100$$

La serie de errores porcentuales, con numerosos valores cercanos y superiores al 100%, señala que el método elegido para reconstitución de información es desaconsejable. Estimamos que, en el caso de estrapolaciones de varios años de sumas mensuales de precipitación, como las que fueron realizadas, el método es inconveniente. En nuestro criterio, el método de regresiones lineales para reconstitución de información pluviométrica, podría ser aceptable cuando se trabaja con valores medios únicamente. En el Anexo 3 se presenta un listado con los errores de estimación para las estaciones PMU 73 y PMU 26.

La determinación de la precipitación mensual media sobre el área en estudio, se hizo en base al método de Thiessen. Para ello se trazaron los polígonos de Thiessen de las 110 estaciones pluviométricas base, en escala 1: 1 000 000. Se planimetraron los polígonos resultantes y se asignó a cada polígono un peso, dado por la relación de su área al área total de la cuenca. Con este valor se calculó la precipitación.

La asignación de las precipitaciones a cada una de las 261 celdas se realizó en base a las 110 estaciones seleccionadas con el período ya completado (1930-1970). El número de estaciones por celda, varía entre 1 y 6. Se confeccionaron los archivos por celda, donde fueron computadas las lluvias mensuales, totales anuales, medias mensuales y media anual, con sus respectivos desvíos standards.

Evaporación: Del total de nueve estaciones de evaporación del Servicio Meteorológico Nacional se seleccionaron siete, por su ubicación geográfica. Se tomó como período base para el análisis 1956-77.

Dado que los registros de las series son incompletos, se reconstituyeron, mediante regresiones lineales, los valores correspondientes a 904 meses faltantes (49%), según el siguiente detalle:

Estación	Nº meses reconstituídos	Porcentaje
Junín	191	72%
Coronel Vidal	63	21%
Dolores	197	75%
Lobos	154	58%
Mar del Plata	72	27%
Azul	14	5%
Chascomús	213	81%

Se calcularon los valores medios mensuales de evaporación corregida y se analizaron los mapas medios mensuales para el período de 22 años que se consideró.

Se definieron siete polígonos de Thiessen, relativamente centrados en cada estación.

Para el cálculo de la evaporación mensual corregida por celdas, se superpusieron los mapas de evaporación mensual con los de las divisiones por celdas y se les asignó una evaporación media. No se advierte que se halla realizado por planimetría, sino mediante una interpolación entre isolíneas.

Si bien los coeficientes de correlación obtenidos no son inferiores a 0.7, las estimaciones en casos particulares que son de interés (sequías y excesos), arrojan resultados no utilizables.

En cuanto a los mapas de evaporación, el análisis de los mismos muestra un mínimo permanente en la zona de Coronel Vidal, lo que es muy difícil de justificar, dada la homogeneidad climática en la región.

En principio, puede decirse que dado el volumen de datos a estimar, hubiera sido necesario analizar la homogeneidad de las series de evaporación y precipitación simultáneamente, pues es probable que la serie de evaporación contenga información errónea. De este modo se podría haber optado por el cálculo de

la evaporación mediante métodos climáticos o matemáticos, controlando los resultados con las observaciones en las estaciones evaporimétricas.

Conclusiones

De los informes consultados y sus resultados, se obtienen algunas conclusiones de interés general para el estudio. Estas son:

- Se juzgó que la información tenía un alto grado de homogeneidad y confiabilidad. Este hecho es evidente en los análisis de homogeneidad y control realizados.
- Los tratamientos y consideraciones para la evaporación y precipitación, se realizaron en forma independiente.
- Al efectuar la reconstitución de valores se ha supuesto implícitamente estacionaridad y normalidad en las series, como así también la preservación de las condiciones medias.
- La evaporación fue analizada exclusivamente mediante datos de tanque.
- La información de temperaturas y radiación no fue analizada.

Cabría señalar que toda consideración sobre los aspectos climáticos necesita de un planteo o hipótesis sobre los objetivos de los estudios. A este respecto, la documentación revisada no explicita un propósito definido y por otro lado, los distintos períodos analizados para la precipitación y evaporación y los métodos empleados, no permiten determinar el destino de la información.

Si la información meteorológica tiene como objetivo ajustar un modelo para condiciones normales, los campos climáticos son aceptablemente homogéneos, y pueden obtenerse de la información climatológica publicada en el país. Si por el contrario, la información es importante en los procesos extremos, tales como sequías e inundaciones, el tratamiento estadístico realizado con la información meteorológica no es aconsejable. La estimación de datos faltantes por medio de regresiones lineales, arroja resultados inaceptables, especialmente en los casos de sequías e inundaciones localizadas. El método de regresión es apto para valores medios de precipitación y evaporación, cuando los campos de estas variables son homogéneos en la región de interés.

Dado el carácter de la información que se posee, se estima que es necesario:

- Analizar la homogeneidad de las series, tomando como referencia algunas estaciones climatológicas.

- 1
- Analizar la consistencia de los datos, considerando precipitación, evaporación y radiación simultáneamente.

 - Reconstituir y/o extrapolar valores medios, mediante el análisis de los campos y usando métodos de regresión que permitan ajustar las situaciones extremas. En esos casos no es aconsejable la regresión lineal simple. En cambio, arroja mejores resultados reconstituir o extrapolar los datos de una estación mediante regresión múltiple con 3 o 4 estaciones circundantes.

 - Analizar la evaporación calculada mediante el uso de fórmulas o modelos climáticos, comparando los resultados con la información disponible de tanques.

 - Definir las situaciones típicas de inundaciones y sequías y sus campos respectivos, en términos diarios.

 - Clasificar las sequías e inundaciones.

 - En función de esto último, desarrollar métodos de interpolación, extrapolación y cálculo de volúmenes,

ANEXO 1

Zona	N° Estaciones originales	N° Estaciones seleccionadas	N° de Valores reconstituidos
A	35	20	665
B	44	22	192
C	29	18	539
D	32	23	1.161
E	31	27	1.609
Total	171	110	4.166

A N E X O 2

Estaciones pluviométricas con información reconstituida.

ZONA A

Estación	Reconstituciones	Coefficiente de correlación
PMU 22 (SMN 222)	2 años	0,88
PMU 26 (SMN 233)	3 años	0,88 y 0,93
PMU 39 (SMN 348)	1 año	0,94
PMU 56 (SMN 416)	15 años	0,86
PMU 70 (SMN 718)	18 años	0,89
PMU 125 (SMN 1410)	8 años	0,93
PMU 136 (SMN 1633)	5 años	0,84
PMU 161 (SMN 2101)	2 años	0,91

A N E X O 2

(continuación)

ZONA B

<u>Estación</u>	<u>Reconstituciones</u>
PMU 59	5,5 años
PMU 102	1 año
PMU 124	3 meses
PMU 182	7,5 años

ZONA C

<u>Estación</u>	<u>Reconstituciones</u>
PMU 168	reconstruída por <u>proximidad</u>
PMU 42	3 años
PMU 185	12 años
PMU 81	6 años
PMU 63	11 años
PMU 159	1 mes

A N E X O 2

(continuación)

ZONA D

Estación	Reconstituciones
PMU 62	4 años
PMU 166	5 años
PMU 179	2 años
PMU 201	<u>22 años</u>
PMU 79	7 meses
PMU 58	7 años
PMU 143	7 años
PMU 49	1 mes
PMU 183	<u>31 años</u> (extrapolados por lo menos 13 años)
PMU 16	<u>25 años</u> (extrapolados por lo menos 8 años)
PMU 217	1 año
PMU 225	12 años
PMU 216	1 año
PMU 50	1 mes
PMU 218	<u>22 años</u>
PMU 207	12 años
PMU 209	11 años
PMU 224	1 mes
PMU 215	1 año

A N E X O 2

(continuación)

ZONA E

Estación	Reconstituciones
PMU 199	<u>18 años</u>
PMU 38	6 años
PMU 190	2,5 años
PMU 155	<u>15 años</u>
PMU 193	7 años
PMU 214	1 año
PMU 198	<u>18 años</u>
PMU 213	1 año y 4 meses
PMU 211	1 año
PMU 210	8 años
PMU 221	1 año
PMU 153	<u>23 años</u>
PMU 96	12 años y 10 meses
PMU 195	<u>19 años</u>
PMU 66	<u>34 años</u> (extrapolados por lo me- nos 25 años)
PMU 114	1 mes
PMU 87	1 mes

ANEXO 3

Errores de estimación.

PERIOD 1
 NUMERO DE PUNTOS 455
 MEDIA DE X 78.28
 MEDIA DE Y 73.15
 COEF. DE CORRELACION 0.876
 DESVIA STD. DE X 53.88
 DESVIA STD. DE Y 55.74

RECTA DE REGRESION Y = 0.997 * X + -5.312

X	Y OBS.	Y CALC.	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	ERROR PORCENTUAL
11	80	83.3	3.3	1.43	14.3
23	90	91.5	1.5	1.19	11.9
...
77	73	82.1	9.1	2.66	26.6
...
117	87	126.3	39.3	2.77	27.7
...
147	73	150.6	77.6	1.54	15.4
...
177	87	174.9	87.9	1.62	16.2
...
207	73	209.2	136.2	1.71	17.1
...
237	87	233.5	146.5	1.80	18.0
...
267	73	267.8	194.8	1.89	18.9
...
297	87	302.1	215.1	1.98	19.8
...
327	73	336.4	263.4	2.07	20.7
...
357	87	370.7	283.7	2.16	21.6
...
387	73	405.0	332.0	2.25	22.5
...
417	87	439.3	352.3	2.34	23.4
...
447	73	473.6	400.6	2.43	24.3
...
477	87	507.9	420.9	2.52	25.2
...
507	73	542.2	469.2	2.61	26.1
...
537	87	576.5	489.5	2.70	27.0
...
567	73	610.8	537.8	2.79	27.9
...
597	87	645.1	557.1	2.88	28.8
...
627	73	679.4	605.4	2.97	29.7
...
657	87	713.7	625.7	3.06	30.6
...
687	73	748.0	674.0	3.15	31.5
...
717	87	782.3	694.3	3.24	32.4
...
747	73	816.6	742.6	3.33	33.3
...
777	87	850.9	762.9	3.42	34.2
...
807	73	885.2	811.2	3.51	35.1
...
837	87	919.5	831.5	3.60	36.0
...
867	73	953.8	880.8	3.69	36.9
...
897	87	988.1	900.1	3.78	37.8
...
927	73	1022.4	949.4	3.87	38.7
...
957	87	1056.7	969.7	3.96	39.6
...
987	73	1091.0	1018.0	4.05	40.5
...
1017	87	1125.3	1038.3	4.14	41.4
...
1047	73	1159.6	1087.6	4.23	42.3
...
1077	87	1193.9	1107.9	4.32	43.2
...
1107	73	1228.2	1157.2	4.41	44.1
...
1137	87	1262.5	1177.5	4.50	45.0
...
1167	73	1296.8	1227.8	4.59	45.9
...
1197	87	1331.1	1248.1	4.68	46.8
...
1227	73	1365.4	1298.4	4.77	47.7
...
1257	87	1400.7	1318.7	4.86	48.6
...
1287	73	1435.0	1368.0	4.95	49.5
...
1317	87	1469.3	1389.3	5.04	50.4
...
1347	73	1503.6	1439.6	5.13	51.3
...
1377	87	1538.9	1460.9	5.22	52.2
...
1407	73	1573.2	1510.2	5.31	53.1
...

Table with multiple columns of data. The top row contains numerical values and the following rows contain alphanumeric codes. Some rows are marked with a vertical line on the left side.

2.2. Hidrología

Discretización de la Zona Deprimida del Río Salado (ZDRS).

Con el propósito de aplicar un modelo matemático de simulación, se realizó la discretización de la zona en estudio (Figura 1) sobre la base de cartas en escala 1: 250 000 y reconocimiento de campo en unidades llamadas celdas. Se consideró que las características del suelo, la vegetación, la precipitación, el nivel freático, etc. dentro de cada una de estas unidades son iguales.

Cabe destacar que, en un principio se eligió dividir la zona en cajas de superficies mayores, y con posterioridad se subdividieron estas cajas, dando lugar a la configuración final de 261 celdas.

Al definir límites de cajas y luego de celdas primó el concepto de que el escurrimiento superficial se halla condicionado por la ocurrencia de terraplenes ferroviarios y camineros que determinan su dirección y magnitud y que, por lo tanto, el relieve natural tiene una influencia secundaria. La realidad demuestra que esta concepción es adecuada en el caso de inundaciones y en las zonas de bajas pendientes del terreno.

Sería de interés, sin embargo, evaluar si en estiaje la topografía pasa a ser relevante en la definición del escurri-

2

miento superficial, ya que si así fuera se podría cambiar en algunos casos la unidad celda por la unidad subcuenca, lo que provocaría una simplificación del sistema.

De igual manera, y considerando que las pendientes medias del terreno pasan del orden de 25m/km en cabeceras a aproximadamente 0.15 m/km en las zonas más llanas, cabe estudiar la posibilidad de modificar la discretización para plantear adecuadamente estas características zonales.

Cuencas de aporte a la ZDRS.

El límite de la ZDRS que se pretende estudiar es, en algunos tramos, coincidente con la divisoria hidrográfica o bien con la divisoria topográfica. En otros tramos se definió el límite de la zona de estudio siguiendo el trazado de terraplenes, sostén de caminos o vías férreas. Esta delimitación da como resultado que las cuencas altas de algunos cursos de agua y las cuencas altas y medias de otros queden fuera de la zona que se intenta modelar. (Figura 1). Este es el caso de los siguientes cursos mayores, siguiendo un ordenamiento norte-sur:

Río Samborombón
Río Salado
Arroyo Vallimanca
Arroyo Brandsen
Arroyo Tapalqué

En la Figura 1 se destacan las áreas de aporte de estos cursos que yacen fuera de la ZDRS. Los caudales generados por estas zonas de aporte son introducidos en el modelo como entradas puntuales en los cruces de líneas de delimitación de la zona con los cauces de los cursos en cuestión.

Estas entradas puntuales a la zona se presentan como hidrogramas en la forma de tablas del tipo:

t	Q
\vdots	\vdots
t_i	Q_i
t_{i+1}	Q_{i+1}
\vdots	\vdots
t_n	Q_n

donde Q_i es el caudal medio mensual del mes i y $t_{i+1} - t_i = \Delta t$ es el paso de tiempo del modelo, o sea un mes.

Las estaciones de entrada de caudales al modelo son:

Estación	sobre el curso
Achupallas	Río Salado
Ruta N°226	Arroyo Vallimanca
Ruta N°226	Arroyo Brandsen

No se proveen hidrogramas de entrada en el caso del Río Samborombón y del Arroyo Tapalqué. Se presume que en el primer curso, los aportes son escasos, en función de que el área de aporte a la zona es pequeña. En el caso del Arroyo Tapalqué

sería conveniente evaluar la posibilidad de conocer los caudales entrantes, y confeccionar el hidrograma correspondiente, ya que según se ha informado los caudales provenientes de sus cabeceras han provocado inundaciones en la localidad de Olavarría en las crecidas de Abril-Mayo del presente año.

Hidrogramas de entrada: Con el propósito de establecer los hidrogramas de entrada, llamados funciones de transferencia de borde (entrada), $Q=f(t)$, y debido a que las estaciones de observación ya mencionadas carecen de registros completos en el período 1960-1970 adoptado como período de calibración, se efectuó la reconstitución de la información faltante.

Para ello se recurrió a las estaciones próximas con registros más completos, y se adoptaron como base las siguientes estaciones:

Estación con registros incompletos	Estación base
Achupallas (Río Salado)	Ernestina (Río Salado)
Ruta N°226 (Arroyo Vallimanca)	La Emma (Arroyo Vallimanca)
Ruta N°226 (Arroyo Brandsen)	Gral. Alvear (Arroyo Las Flores)

La estación Achupallas cuenta con alturas diarias y caudales correspondientes en el período 1967-1976, por lo tanto para completar el período de calibración fue necesario reconstituir los años 1960 a 1966.

Debido a que la estación Ernestina posee buen registro de alturas entre 1960 y 1966 se trazó la curva caudal diario (mensual) en Achupallas vs. altura diaria (mensual) en Ernestina, con la cual se obtuvieron los caudales en Achupallas para el período faltante. Como los puntos del gráfico están dispersos y por lo tanto la curva resultante no presenta un buen ajuste, se sugiere comparar con métodos alternativos que puedan dar mayor precisión en la determinación de los caudales buscados.

La estación Ruta N°226 sobre el Arroyo Vallimanca, como la anterior, posee registro de alturas y caudales diarios en el período 1967-1976, o sea que se debieron completar caudales para el período 1960-1966. La estación La Emma posee un registro de alturas diarias, que está relativamente completo para el período 1960-1966, ya que no existen observaciones en los años 1962 y 1965. Con el fin de reconstituir alturas en la estación sobre Ruta N°226 se utilizó la recta de regresión entre alturas medias mensuales en ambas estaciones. Con los valores de alturas medias mensuales de La Emma se obtuvieron las correspondientes alturas en Ruta N°226 y luego, con la curva de descarga (Figura 3) se obtuvieron caudales mensuales para el período faltante.

Para completar los registros de la estación Ruta N°226 sobre el Arroyo Brandsen entre los años 1960 y 1966 se utilizó idéntica metodología a la aplicada sobre el Arroyo Vallimanca, por regresión con la estación General Alvear. Los caudales se obtuvieron mediante la curva de descarga correspondiente.

Debe notarse que en los dos últimos casos fue necesario completar los registros correspondientes a siete de los diez años elegidos para la calibración. Esto puede generar dificultades en el logro de un ajuste adecuado. Sería de interés estudiar la posibilidad de elegir otro período de calibración, o bien de definir las entradas de caudales en secciones con registros más completos.

Evaluación de los caudales salientes.

En la región en estudio hay dos zonas de salida de caudales hacia el Océano Atlántico: al este de la provincia de Buenos Aires, la Bahía de Samborombón, y al sudeste, la comprendida entre la desembocadura del Arroyo Vivoratá y Punta Mogotes, aproximadamente (Figura 1).

A los efectos de evaluar el derrame al Atlántico, se instalaron doce estaciones de aforos en la Bahía de Samborombón, y se realizaron aforos periódicos entre el 7/78 y el 12/79.

Los cursos sobre los que fueron realizados dichos aforos son:

Río Samborombón	Canal El Porteño
Río Salado	Cañada Fernández
A°El Tala	Canal El Tordillo
Canal 15	Canal A
Canal 9	Canal 1
Canal Sta. María	Canal 2

Según consta en informes internos, en varias oportunidades se observó flujo inverso debido a la influencia de mareas. Asimismo, el análisis de la información de aforos permitió detectar, en el período mencionado, fluctuaciones importantes en el nivel de los lechos, estimadas en 1.64m para el Canal 15, 0.82m para el Río Samborombón y 0.45m para el río Salado. Debido a que, por requerimientos de la definición de las leyes de transferencia de borde (salida), era necesario definir un nivel de lecho único, se tomó este valor como el promedio de los observados y en consecuencia se modificaron los tirantes medidos refiriéndolos a este nuevo nivel de fondo. Tanto el efecto de marea como la fluctuación del lecho hacen difícil encontrar una relación altura-caudal adecuada, lo cual puede observarse en la dispersión de los puntos en el Informe Final. Por ello se aconseja utilizar metodologías alternativas de medición y posteriormente comparar resultados.

Asimismo, cabe mencionar que no existen registros de caudales en la segunda zona de salida al mar, y por lo tanto sería necesario estudiar la posibilidad de realizar mediciones sobre los siguientes cursos:

- Canal N°5
- Arroyo Grande
- Arroyo Guaranguyú
- Arroyo Dulce
- Arroyo Vivoratá
- Arroyo Seco

Niveles hidrométricos

Se contó con los registros de 42 escalas hidrométricas y 16 limnógrafos operados por la Dirección Provincial de Hidráulica y por el Servicio Meteorológico Nacional. Asimismo se contó con alturas de lagunas, información que no fue incluida en el modelo, por considerarla poco confiable.

La frecuencia de las observaciones en las 58 estaciones sobre cursos de agua es diaria, mientras que en lagunas se efectuaron mediciones diarias, semanales o hasta mensuales en algunos casos.

En el EZDS se clasificó la calidad de los registros de las estaciones hidrométricas sobre cursos de agua de la siguiente manera:

N°de estaciones	Calidad
2	Completa
4	faltan pocos datos
39	faltan meses
12	incompleta

Con el propósito de relacionar registros de pares de estaciones, ya sea de aquellas ubicadas sobre un mismo curso o sobre cursos diferentes, se efectuaron correlaciones y regresiones. Aparentemente, se pretendió de esta manera fijar criterios para reconstituir los registros incompletos, tarea que no llegó a concretarse, probablemente debido a que algunos coeficientes de correlación fueron considerados bajos y las rectas de regresión no ajustaron adecuadamente.

Puntos elegidos para efectuar la calibración del modelo: Del total de estaciones hidrométricas y limnigráficas analizadas, se seleccionaron a fin de realizar la calibración del modelo 33, ubicadas en la Figura 2, cuyas características y registros pueden apreciarse en el cuadro 1. Cada una de estas estaciones está ubicada en una celda tipo cauce a la cual aporta caudales un cierto conjunto de celdas tipo cauce y tipo cuenca. Por lo tanto, al obtenerse la calibración de aquélla, se supondrán ajustadas las celdas de aporte. El número de celdas que poseen información histórica confiable es bajo si se lo compara con el número de elementos en que se dividió la ZDRS y el número de parámetros a definir por cada elemento. Sería conveniente, por lo tanto, reducir en lo posible el número de celdas, y por ende parámetros, hasta tanto se disponga de mayor información.

Variables escogidas para efectuar la calibración del modelo:

Como se menciona en el punto anterior, se seleccionaron 33 estaciones con registros más o menos completos de alturas y cau-

dales diarios para intentar el ajuste. De los registros de estas estaciones se tomaron como variables de calibración los valores de alturas hidrométricas leídas el primer día de cada mes.

Debido a que el modelo produce como resultado de cada paso de tiempo mensual un valor de altura en celda, que no es representativa de una altura real observada, sino que es el resultado de un balance mensual de entradas y salidas de volúmenes, no resulta clara la razón por la cual se optó, para efectuar el contraste, por la altura de un día en especial.

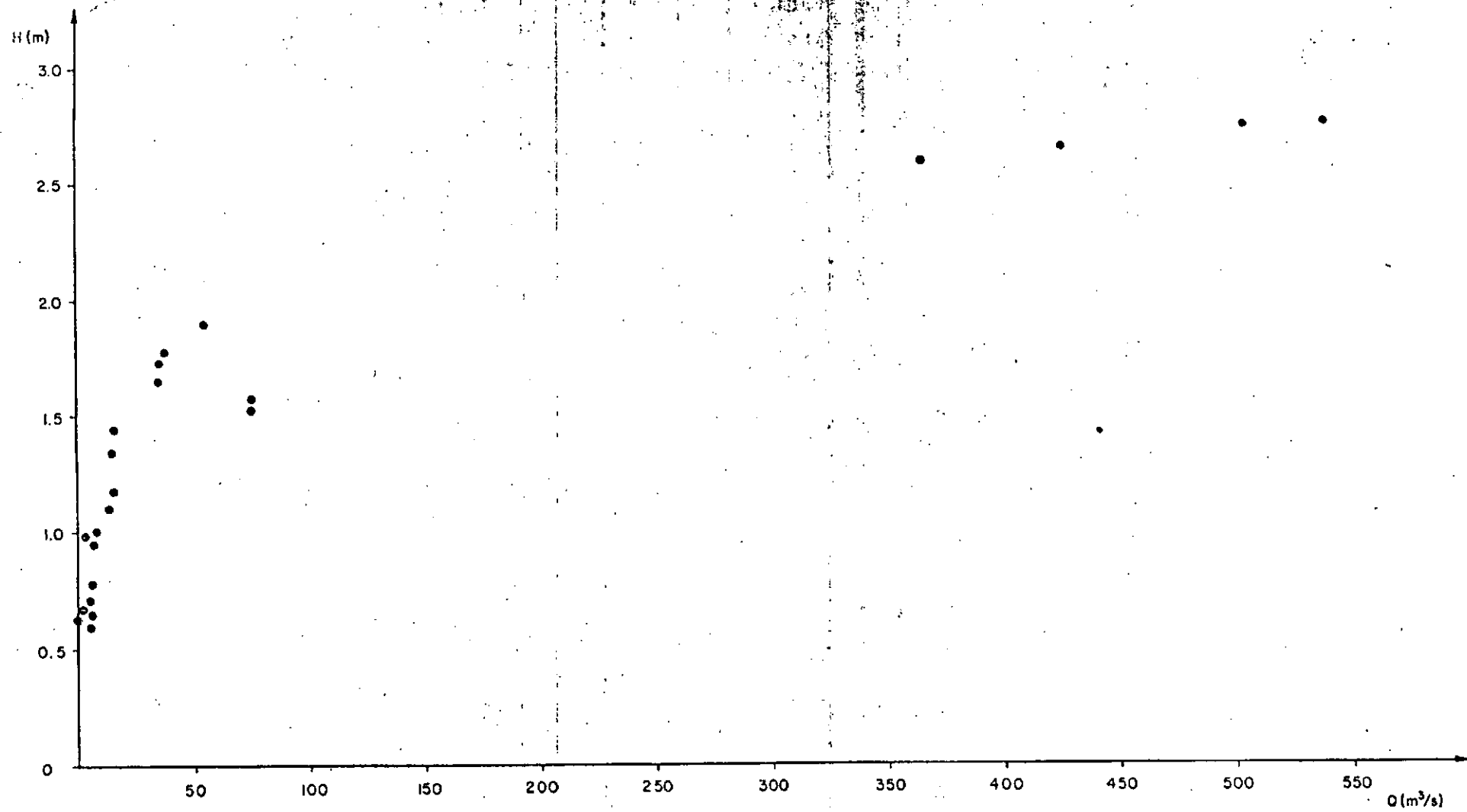


Figura 3: Curva de descarga del Arroyo Vallimanca en la estación Bolívar (Ruta N°226)

Cuadro 1 : Estaciones hidrométricas seleccionadas para la
calibración (período 1960-1970)

Referencias:

DPH	Dirección Provincial de Hidráulica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
Ao.	Arroyo
ESC	Escala hidrométrica
LGRAF	Limnógrafo
M	Monografía de estaciones
H	Alturas
Q	Caudales
C	Registro completo
i++	Faltan pocos datos
i+	Faltan meses
i	Incompleto
PT	Perfil transversal
PM	Promedio mensual

N° Estación	N° Archivo	Nombre Estación	Instru- mento	Organismo que opera	Descripción de la información
2	HMU/02	Ao. Azul Seminario. Azul	LGRAF.	DPH	M, 86 aforos, H y Q diarios para 1962-76 (C). Algunos hidrogramas con 4 lecturas diarias. Curva H-Q para 1963-1966 y para 1967-70.
3	HMU/11	Ao. Los Huesos R. Nac. 226 Azul Tandil	LGRAF.	DPH	M, H y Q 1962-76 (i++), curva H-Q con 24 aforos con ajuste regular.
4	HMU/04	Ao. Chapaleofú R. Nac. 226	LGRAF.	DPH	M, H y Q 1962-76 (años 62 y 63 (i), 64 y 76 (i++)). Hidrograma de crecida 4 horas. Curva H-Q 66 aforos.
105	HMU/105	Ao. Napaleofú R. Nac. 226 Tandil-Balcarce	LGRAF.	DPH	M, H y Q 1962-76 son (i) antes de 1973, 33 aforos pero con un cambio de secc. de aforos, 2 curvas H-Q con 10 aforos y 23 aforos.
8	HMU/08	Ao. Vallimanca La Emma	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1960-76 (i+), PM, 4 aforos.
9	HMU/09	Canal 11 HM. 2463	ESC.	DPH	H diarias 1941-78 (i) (hay muchas alturas bajo el cero).
10	HMU/10	Ao. Azul Puente Azul	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1960-77 (i++), PM, 43 aforos.

N° Estación	N° Archivo	Nombre Estación	Instrumento	Organismo que opera	Descripción de la información
12	HMU/12	Canal 12 HM 650-Miranda	ESC.	DPH	H diarias 1961-77 (i++), H y Q diarias 1949-70, curva H-Q con 18 puntos.
14	HMU/14	Ao. Tandileofú Ayacucho	LGRAF.	DPH	M, H y Q diarias 1962-76 (C), 57 aforos entre 1962-78, curva H-Q.
15	HMU/15	Ao. Las Chilcas	LGRAF.	DPH	M, H y Q diarias 1962-74 (i), 33 aforos, curva H-Q con ajuste regular.
16	HMU/16	Ao. Grande Cruce Vidal-Balcarce Ruta Prov. 55	LGRAF.	DPH	M, H y Q diarias 1966-76 (i+), 42 aforos, curva H-Q (ajuste malo).
17	HMU/17	Canal 16 HM 1178.3	ESC.	DPH	H diarias 1970-77 (i) (muchas bajo el cero de la escala).
19	HMU/18	Ao. Las Flores Gral. Alvear	ESC.	SMN	M. PT, H diarias 1960-75, PM, 5 aforos.
				DPH	M, H y Q diarias 1966-76 (i+) curva H-Q, 33 aforos, verif. para 17 aforos posteriores. Perfil transv.
20	HMU/20	Canal 11- HM 1673 El Gualichu	ESC.	DPH	H diarias 1941-77 (i) (hay interrupciones y alturas bajo el cero de la escala), H y Q diarias 1941-69, curva H-Q con 14 puntos.

N° Estación	N° Archivo	Nombre Estación	Instrumento	Organismo que opera	Descripción de la información
23	HMU/23	Canal 1 HM 1328	ESC.	DPH	H y Q diarias 1913-69, curva H-Q con 12 puntos. H diarias 1941-77 (i) (1941-59 registro muy malo).
24	HMU/24	Canal 5 HM 684.5 Ruta 2	ESC.	DPH	H diarias 1939-77, (1939-69 incompleto) H y Q diarios 1939-69, curva H-Q con 10 aforos realizados en 1969-71.
26	HMU/26	Canal 16 HM 418.5 Alvarez de Toledo	ESC.	DPH	H diarias 1932-77 (i+), H y Q diarias 1932-69, curva H-Q con 7 puntos.
27	HMU/27	Ao. Las Flores Las Flores	ESC.	SMN	H diarias 1960-76, M, PT, PM, 3 aforos.
31	HMU/31	Ao. Las Saladas Moll	ESC	SMN	M, PT, H diarias 1960-77, PM, (algunas interrupciones por alturas bajo el cero de la escala) (i++).
32	HMU/32	Río Salado Ernestina	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1932-77, PM, 12 aforos.
33	HMU/33	Río Salado Roque Perez	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1932-62 (i), PM (con 5, 9, 10 etc. datos diarios).

N° Estación	N° Archivo	Nombre Estación	Instru- mento	Organismo que opera	Descripción de la información
35	HMJ/35	Ao. Saladillo Pte. Tronconi	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1960-77 (i++), PM, 4 aforos.
39	HMJ/38	Canal 9-Real Audien- cia HM 1300	ESC.	DPH	H diarias (i++) 1945-77, H y Q diarias 1945-70, curva H-Q con 6 puntos.
41	HMJ/41	Río Salado Bonnement	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1932-73 (i++), PM.
45	HMJ/45	Río Salado Guerrero	ESC	SMN	M, H diarias 1932-77 (i++), PM
				DPH	21 aforos DPH, curva (ajuste bueno), H medias men- suales 1932-77 (SMN), Q medios mensuales.
49	HMJ/49	Canal 9 HM 767	ESC.	DPH	H diarias 1941-77 (i).
51	HMJ/50	Canal 9 HM 415 Pte. La Picasa	ESC.	DPH	H diarias 1941-76 (i), H y Q diarios 1941-69, cur- va H-Q con 31 puntos entre 1959-70.
53	HMJ/53	Canal 1 Pte. El Tigre	ESC.	SMN	M, PT, H diarias 1960-77, PM.

N° Estación	N° Archivo	Nombre Estación	Instru- mento	Organismo que opera	Descripción de la información
54	HMU/54	Canal 2 HM 886 Ruta 2	ESC.	DPH	H diarias 1962-77 (i), H y Q diarios 1962-68, curva H-Q (mal ajuste) con 18 puntos entre 1963/70.
55	HMU/55	Canal 2 HM 610	ESC.	DPH	H diarias 1962-71 (i+).
56	HMU/56	Canal 2 HM 30	ESC.	DPH	H diarias 1963-74* (i) (muy malo).
57		Río Samborombón Ruta Nac. 2 Altamirano	LGRAF.	DPH	M, H y Q diarios 1961-75 (i+), 51 aforos-curva H-Q de 2 tramos (ajuste regular).
58		Canal A HM 323 Ruta 11	ESC.	DPH	H y Q diarios 1941-69 (i) (alturas bajo el cero), PM, curva H-Q con 7 puntos entre 1963 y 1970 (ajuste malo).

2.3. Aspectos hidrogeológicos

El aporte de esta área a la problemática de la cuenca del Río Salado se relaciona con el movimiento de agua subterránea.

Para el estudio se consideró sólo el acuífero superior que presenta características de acuífero libre. Esto hace que el mismo interactúe con el suelo superficial aportándole agua mediante el ascenso por capilaridad, y se recargue por infiltración profunda del exceso de agua del perfil del suelo.

Los parámetros relevantes del acuífero para el problema en consideración son la profundidad del estrato impermeable sobre el que se apoya, la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica.

La profundidad del piso y la porosidad efectiva, determinan la capacidad de almacenamiento del acuífero. La profundidad del piso y la conductividad hidráulica, determinan su capacidad para conducir agua.

En el EZDS la profundidad del piso del acuífero se estimó en base a datos de perforaciones realizadas por distintos organismos. Tal estimación puede considerarse adecuada para la primera etapa del estudio, pero deberá ser mejorada con la información que se obtenga de las perforaciones programadas.

La porosidad efectiva fue estimada en base a la composición granulométrica de aproximadamente 100 pozos perforados a barrenos hasta una profundidad de 4 metros. La granulometría obtenida se refirió a tablas standard que la relacionan con la porosidad efectiva. Se debe hacer notar que para los espesores de acuífero estimados, la profundidad a que se toman las muestras para los ensayos granulométricos es escasa, por lo que este parámetro deberá reevaluarse cuando se realice el programa de perforaciones previsto para el estudio.

La estimación de la conductividad hidráulica presenta discrepancias entre las referencias citadas*, tablas de correlación granulometría-conductividad, y los valores adoptados.

De acuerdo a la descripción geológica de la región y a los perfiles de las líneas Olavarría-Magdalena y Brandsen-Villa Gesell que aparecen como Anexo B.4.1. del informe de Primera Etapa, la composición característica del perfil es limo arenosa o arcillo arenosa, a veces con lentes calcáreos. Para esta granulometría los valores de tablas dan velocidades de $1 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-1}$ metros por día. Sin embargo, cuando se asignan valores de conductividad a las distintas regiones se usan valores de $5 \cdot 10^{-8}$ a $2 \cdot 10^{-4}$, lo que haría suponer que el acuífero está formado por arcillas compactas. En ensayos de bombeo realizados en sedimentos similares a los descritos se han obtenido en algunos casos, valores aún mayores a los tabulados, del orden de 1m/día. Esta discrepancia deberá resolverse con ensayos de bombeo en los pozos que se

* EZDS, Vol. III Parte B, Secc. 2.6

3

Realicen dentro del programa de perforaciones.

La información freaticométrica disponible para el estudio es, en general, deficitaria para el nivel de resolución que se impone en el modelo. Este plantea la resolución del sistema de escurrimiento subterráneo a nivel de las celdas en que se discretizó la región. Esto implica la necesidad de un dato freaticométrico cada 350 km^2 , sin embargo las 62 estaciones freaticométricas seleccionadas como aceptables implican un dato freaticométrico cada $1\ 500 \text{ km}^2$.

Hay que hacer notar respecto a este punto un problema de carácter metodológico. El mismo es el criterio utilizado para la reconstitución de la información faltante en los registros históricos. Los vacíos de información en las series freaticométricas son sustanciales (aproximadamente 50% de los datos en las estaciones SMN) y las correlaciones que se realizaron entre pares de estaciones dieron en un comienzo valores muy bajos, que fueron mejorados mediante el procedimiento de eliminar datos discrepantes. A los períodos sin información de una de las estaciones les fueron asignados valores inferidos a partir de la estación base, mediante una ecuación de regresión lineal. Este criterio presenta el inconveniente de regenerar un valor medio correspondiente a la medición en la estación base, sin tener en cuenta la variabilidad local del fenómeno, y sobre todo sin tomar en consideración los valores precedentes en la estación que está siendo completada. El resultado de esta metodología es la reducción de la variabilidad del fenómeno, y la consiguiente im-

posibilidad de contrastar los resultados del modelo. El problema metodológico discutido se hace particularmente crítico cuando la longitud de los períodos completados es grande en proporción a la longitud de los períodos en que se dispone de información, que es el caso de las estaciones SMN que son las que forman la base informativa histórica de la freatimetría.

Otro factor de error es el uso de la interpolación para obtener las curvas iso-freáticas. Este procedimiento es razonable cuando la densidad de las observaciones permite suponer que el espacio intermedio es homogéneo, situación ésta que casi seguramente no se da en la región en estudio donde se cuenta con un freatómetro cada 1 500 km².

Como conclusión, la información hidrogeológica disponible en el EZDS tiene carácter indicativo, que deberá ser perfeccionado con el análisis de la red de pozos freatimétricos proyectada, ensayos de bombeo y la observación sistemática de la red existente y a implementar.

Desde el punto de vista de la modelación del sistema subterráneo, éste deberá ser discretizado con un tamaño de grilla compatible con la red freatimétrica, ya que una grilla más densa sólo introducirá dificultades para la calibración.

Cuando se plantee la simulación del acuífero se deberán

considerar las condiciones de contorno en la región norte y noroeste de la cuenca, definidas como regiones de conducción y el efecto del aporte de canales y lagunas. Del mismo modo, debe ser incluida la zona de las dunas costeras sudorientales que bajo ciertas condiciones puede actuar como área de aporte.

2.4. Factores edáficos

Los parámetros hídricos del suelo relevantes para la respuesta de la cuenca a sequías e inundaciones son la capacidad de retención de agua y la capacidad de infiltración.

La capacidad de retención de agua o la capacidad de campo (C.C.), se define como la cantidad de agua que es capaz de retener un suelo bien drenado en sus conductos capilares. El valor de este parámetro varía con las propiedades físicas y químicas del suelo, y se expresa como la relación entre el volumen de agua retenida capilarmente y el peso seco del suelo.

Para representar los fenómenos que ocurren con el agua del suelo es además necesario conocer qué espesor de suelo es relevante para los procesos que se consideran y cómo varía la tensión de retención a distintos niveles de desecación.

El espesor relevante del suelo depende de la profundidad de exploración de las raíces y de la existencia de estratos limitantes para su penetración. Con esta información es posible entonces conocer el volumen de agua almacenable en el suelo.

La tensión de retención de agua en el espacio poroso del suelo varía según curvas características, generalmente asociadas a la composición granulométrica de éste. La tensión de retención se expresa en unidades de presión o, lo que es más común, en el logaritmo decimal de la altura expresada en cm de la columna de agua equivalente (pF). La tensión de retención a capacidad de campo se ubica generalmente alrededor de pF 2.4. La

figura muestra algunas curvas características.

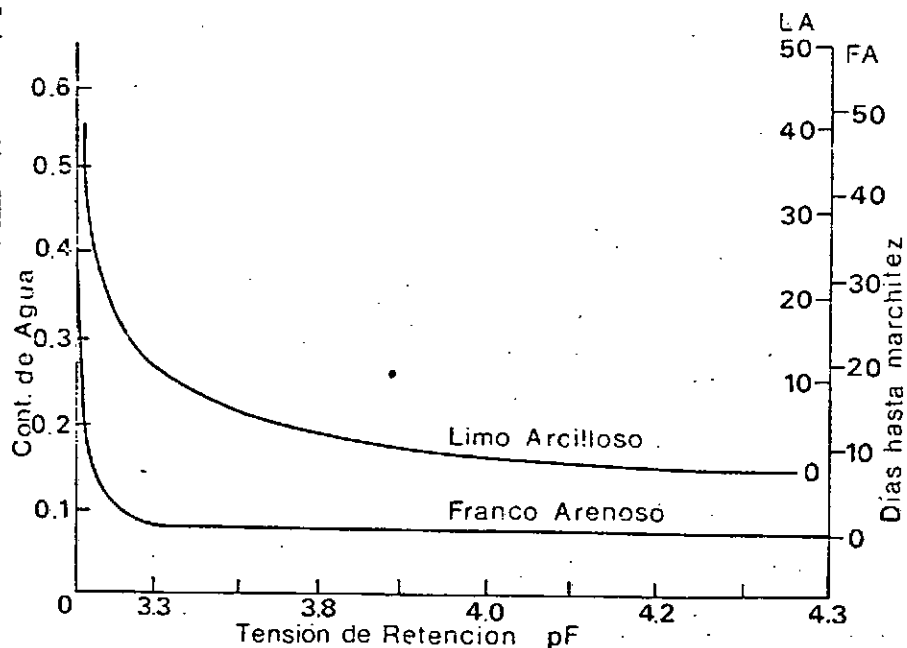


Figura 4: Relación entre la tensión de retención y el contenido de agua del suelo.

El límite inferior de humedad al cual las plantas pueden extraer agua del suelo se denomina punto de marchitez (P^m) y depende de la adaptabilidad de las plantas a la sequía. El valor de tensión al punto de marchitez está alrededor de pF 4.2.

Las curvas de retención adquieren formas complejas como consecuencia de las variaciones del perfil.

Con los parámetros C.C. y profundidad de exploración de las raíces y la curva de tensión es posible representar el estado relativo de la humedad del suelo y su efecto sobre la vegetación y de allí pasar a calificar situaciones de déficit de agua en el suelo de distinta magnitud para determinar las condiciones que configuran la sequía.

El espacio poroso disponible del suelo es el que puede ser eventualmente llenado de agua. Se define como la diferencia entre porosidad total y contenido de agua del suelo y por tanto es variable con el estado de humedad para un suelo dado.

Esta variable es relevante para el análisis de las situaciones de inundación ya que es equivalente al volumen de agua que puede ingresar al suelo antes que se produzca encharcamiento.

El concepto anterior está limitado por la capacidad de infiltración que es la velocidad a la cual el agua aportada a la superficie penetra en el suelo.

Obviamente, si la velocidad de aporte es superior a la velocidad de infiltración, se producirá encharcamiento aún cuando no se haya saturado el suelo y si el suelo está saturado se producirá encharcamiento independiente de la magnitud del aporte.

La capacidad de infiltración es un parámetro particularmente difícil de medir ya que está condicionado por numerosos factores y las técnicas de medición existentes son muy primitivas.

En primer lugar, la infiltración es un fenómeno que aunque se observa en superficie, es efectivo en todo el perfil. Así, una medición superficial que dé gran capacidad de infiltración, no garantiza que todo el perfil se comporte de la misma forma; ya que si existe un horizonte compacto será éste el que establezca el límite de la C.I.

Los horizontes de baja C.I. se producen por causas tan comunes como el laboreo (piso de arado) o acumulación de iones sódicos o materiales muy finos a cierta profundidad.

A la inversa, reducida C.I. superficial puede deberse a condiciones de operación fácilmente subsanables, como las originadas por el pisoteo, si el resto del perfil tiene una composición granulométrica potencialmente más permeable. Estas situaciones debieran detectarse cuando se realizan los ensayos de infiltración.

Al usar el infiltrómetro de doble anillo para medir C.I. se deben tomar en consideración los factores mencionados, además de los inherentes a la técnica de ensayo. Entre estos últimos cabe mencionar la necesidad de hacer el suficiente número de repeticiones para poder descartar resultados anómalos provocados por accidentes locales como grietas y microtúneles que causan velocidades de infiltración muy grandes, o lugares pisoteados o manchones sódicos que dan velocidades muy bajas.

En cualquier caso, el conocimiento de todo el perfil permite aproximar la C.I. a valores representativos de la zona.

Otros parámetros relevantes para la representación del movimiento de agua en el suelo que no han sido considerados en el EZDS, son la velocidad y la altura del ascenso capilar. Estos son particularmente importantes en situaciones de sequía, por cuanto de ellos depende si el perfil del suelo será realimentado por el acuífero freático y si esa realimentación se realizará a una velocidad suficiente como para reducir bajo ciertas circunstancias, el déficit de humedad.

Los estudios de suelos realizados por el EZDS cubren parcialmente los aspectos discutidos. En primer término, las determinaciones de capacidad de campo en el perfil del suelo se realizaron en sólo cinco puntos en la cuenca, identificados por los números 2,39,40,41 y 42. Además se realizaron ensayos de humedad equivalente en todos los casos en que se hicieron ensayos de infiltración. Hay que hacer notar que por haberse utilizado muestras de suelo superficial, el dato extraíble de estos ensayos no puede considerarse representativo de la CC del perfil debido a la heterogeneidad a que se aludió anteriormente. En resumen, la información sobre este parámetro debería ser completada para satisfacer las finalidades del estudio.

En el estudio se han utilizado mapas de suelo realizados por INTA, TRICART, etc., pero la información que éstos proveen no ha sido explotada suficientemente, ya que no se la relaciona con los parámetros de interés hidrológico. Lo mismo puede decirse de los estudios de vegetación, que dan elementos para contrastar la información obtenida en los ensayos, pero no son utilizados con ese propósito.

En lo que se refiere a la capacidad total de almacenamiento de agua del perfil, se deduce de las planillas de datos que se ha adoptado una profundidad de alrededor de un metro. Este criterio aparentemente no está soportado por datos reales. De hecho, es probable que en algunas celdas se presentan impedimentos de profundidad. La curva de tensión de retención de agua no ha sido calculada ni se hace referencia alguna a ella, por lo que se infiere que su importancia ha sido desestimada.

En cuanto al parámetro humedad mínima del suelo, que se identifica como

RESMIN en el modelo, no ha sido evaluado en ensayos, sino que su valor ha sido fijado en la mitad de la capacidad de campo. Respecto a este parámetro, es necesario hacer un comentario en relación a la subrutina de balance hídrico del modelo de simulación.

En dicha rutina, la humedad del suelo es forzada al valor RESMIN, cuando resulta inferior al mismo, razón por la cual la representación de la sequía está sujeta a que RESMIN sea suficientemente pequeño para que se configure una situación de déficit severo de humedad. Por lo tanto, si se considera sequía al período durante el cual la humedad del suelo está a nivel de RESMIN, su ocurrencia y duración dependen de ese valor, por lo que su elección merece un cuidadoso análisis.

La variable porosidad efectiva no ha sido tomada en cuenta en los análisis realizados ni en el modelo, por lo que cuando el nivel freático intercepta el suelo superficial o se produce infiltración, el agua ocupa sólo el espacio poroso disponible hasta capacidad de campo y no se alcanzan situaciones de saturación del perfil.

El estudio de la infiltración es el que más atención ha concentrado. La observación que corresponde hacer es que la distribución geográfica de los ensayos es irregular, dándose situaciones de gran concentración como en los alrededores de Tandil (6 ensayos) y Rauch (7 ensayos) y de ausencia como en los partidos de Pila, Las Flores, Guido, Cnel. Vidal, Gral. Madariaga, Olavarría, etc., que constituyen una parte considerable del área bajo estudio.

En cuanto a los ensayos en sí, a juzgar por la dispersión que tienen los resultados, deberían haberse hecho en algunos casos más repeticiones.

Como se discutió anteriormente, el infiltrómetro permite la evaluación de la velocidad de infiltración en la superficie y, para extender los resultados a la totalidad del perfil, es necesario conocer su constitución, información ésta que no ha sido relevada.

En conclusión, se han detectado algunos errores metodológicos y conceptuales en la descripción de los parámetros hidrológicos del suelo que deberán ser subsanados en una etapa posterior.

En general, la información para una descripción razonablemente aproximada del perfil existe y está disponible en el mismo EZDS y es necesario realizar un esfuerzo de síntesis e inferencia. Esta síntesis deberá ser apoyada con evaluaciones decampaña de carácter regional que permita cubrir déficit de información en puntos específicos.

2.5 - Hidráulica

Escorrimento superficial.

A los efectos de describir el escurrimiento superficial se definieron unidades llamadas celdas con la posibilidad de realizar intercambio de caudales por sus bordes.

Se eligió describir el fenómeno real mediante un sistema de este tipo, al considerar que el escurrimiento superficial está principalmente influido por los terraplenes ferroviarios y camineros que son más relevantes que los accidentes topográficos.

Transferencias.

La transferencia de caudales superficiales se realiza a través de los bordes de las celdas, en su mayoría terraplenes.

Considerando las características físicas de los bordes, se los agrupó en tres tipos que definen otras tantas leyes de transferencia.

Ellas son:

- Transferencias cuenca-cuenca (Tipo 1)
- Transferencias cuenca-canal (Tipo 3)
- Transferencias imaginarias (Tipo 4)

A los efectos de reproducir el escurrimiento en cursos de agua, se discretizaron los cauces en tramos. Los caudales transferidos entre tramos se calcularon mediante la ecuación de Chézy-Manning (para flujo uniforme). A estas transferencias se las llamó cauce-cauce (tipo 2).

Finalmente, las transferencias tipo 5 y tipo 6 describen la salida y la entrada de caudales a la zona de estudio, respectivamente. Estas transferencias fueron tratadas en la sección Hidrología.

Transferencias cuenca-cuenca (tipo 1): Tras un análisis de las distintas situaciones de escurrimiento posibles sobre terraplén y a través de alcantarillas, se determinó, aceptando ciertas simplificaciones, que estas obras se comportan hidráulicamente, según la altura de lámina en las celdas que yacen a uno y otro lado de la línea, como:

- Terraplén ferroviario o caminero actuando como vertedero de pared gruesa.
- Alcantarilla actuando como orificio ahogado.
- Alcantarilla actuando como orificio con entrada ahogada y parcialmente lleno.
- Alcantarilla actuando como vertedero.

Con el propósito de efectuar simplificaciones en las fórmulas finales utilizadas, se hacen los siguientes supuestos:

- Las secciones de las alcantarillas son de dos tipos: circulares y rectangulares.
- Las alcantarillas circulares tienen un diámetro tipo de 0.80 m. El material es hormigón.
- En las alcantarillas rectangulares no se toma en cuenta la naturaleza del fondo.
- No se distinguen los terraplenes ferroviarios de los carreteros pese a que sus alcantarillas tienen longitudes diferentes.

Las fórmulas finales que se utilizan en cada uno de los cuatro casos descriptos son de la forma:

$$\frac{Q}{B} = \alpha H^{\beta}$$

donde se estima el caudal de transferencia Q por ancho B de obra en función de la carga hidráulica H .

El coeficiente α de gasto o de descarga tiene en cuenta, en el caso de alcantarillas, las pérdidas de energía por embocadura y por contracción de la vena líquida, y varía por lo tanto, con la agudeza de la arista de la embocadura. Asimismo es sensible a las dimensiones de la obra, a la rugosidad de la superficie interna de la alcantarilla, a la temperatura del agua y a la carga hidráulica.

En el caso de vertederos, α depende de la carga hidráulica y del ancho y del perfil longitudinal de la cresta.

El coeficiente β adopta el valor $3/2$ para vertederos y $1/2$ para alcantarillas.

Transferencias cuenca-canal (tipo 3): En las transferencias de este tipo se contemplan el escurrimiento sobre el terraplén actuando como vertedero y a través de alcantarillas como en el caso cuenca-cuenca, pero también se considera el escurrimiento por compuertas y sifones.

Para alcantarillas con compuertas rectangulares, se definen dos situaciones : entrada no ahogada y ahogada. De la misma forma, para alcantarillas de caño se calculan para los casos anteriores los coeficientes α de descarga, como promedio de los correspondientes a distintos estados de carga hidráulica.

En el caso de sifones, se evalúan las pérdidas por embocadura, fricción, por ensanche del conducto y las pérdidas por el paso de la corriente a través de rejillas y a la salida del sifón como funciones del cuadrado de la velocidad. Finalmente, se calcula el caudal de transferencia como el producto de la velocidad expresada como función de los niveles aguas arriba y aguas abajo del sifón por el área de paso y se llega a expresiones del tipo:

$$Q = \alpha (h_i - h_j)^{1/2}$$

donde h_i y h_j son los niveles aguas arriba y aguas abajo del sifón y α un coeficiente que se ajusta para cada sifón.

Transferencias imaginarias (tipo 4): Bajo esta denominación se encuentran aquellas transferencias de caudales que se realizan por sobre divisorias topográficas. Asimismo, se definieron líneas de transferencia de este tipo con el propósito de dividir celdas que de otra forma resultaban de superficie excesiva.

Para calcular los caudales de transferencia, se confeccionaron tablas con funciones altura-volumen de cada celda y volumen suma, de la forma:

Altura	Volumen 1	Volumen 2	Volumen suma
Z	V1	V2	V1+V2

El esquema de cálculo es el siguiente: Si ambas alturas Z_1 y Z_2 son inferiores al nivel H, no hay transferencia de caudales entre las celdas (Figura 5a).

Cuando alguna de las dos alturas Z_1 o Z_2 superan el nivel H, se produce transferencia de caudal entre las celdas 1 y 2, de la siguiente manera: Se calculan los volúmenes V_1 y V_2 a partir de las alturas Z_1 y Z_2 y posteriormente la altura H^* que corresponde a la suma de volúmenes V_1+V_2 .

Si H^* es mayor que H (Figura 5b), H^* será la altura final y se transferirá el volumen excedente ΔV . Si H^* es menor que H (Figura 5c), se hace $H^*=H$ y se procede de igual forma.

El caudal de transferencia se calcula efectuando la razón entre

el volumen hallado y el paso de tiempo.

Transferencias cauce-cauce (tipo 2): Los caudales de transferencia entre tramos de un curso se calculan mediante la fórmula de Chézy, utilizando la expresión de la rugosidad de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} i^{1/2}$$

donde

Q caudal.

A Área de la sección de paso entre tramos.

R radio hidráulico de la sección de paso.

n coeficiente de rugosidad de Manning.

i pendiente superficial del agua.

El parámetro i se calcula tomando alturas del tirante de agua, respecto de un plano de referencia horizontal, en la sección de paso y en la sección de paso inmediatamente aguas abajo. Se restan ambas alturas, respetando su signo, y se divide por la distancia horizontal entre secciones.

De esta forma, en la expresión interviene solamente la pendiente del tramo de aguas abajo.

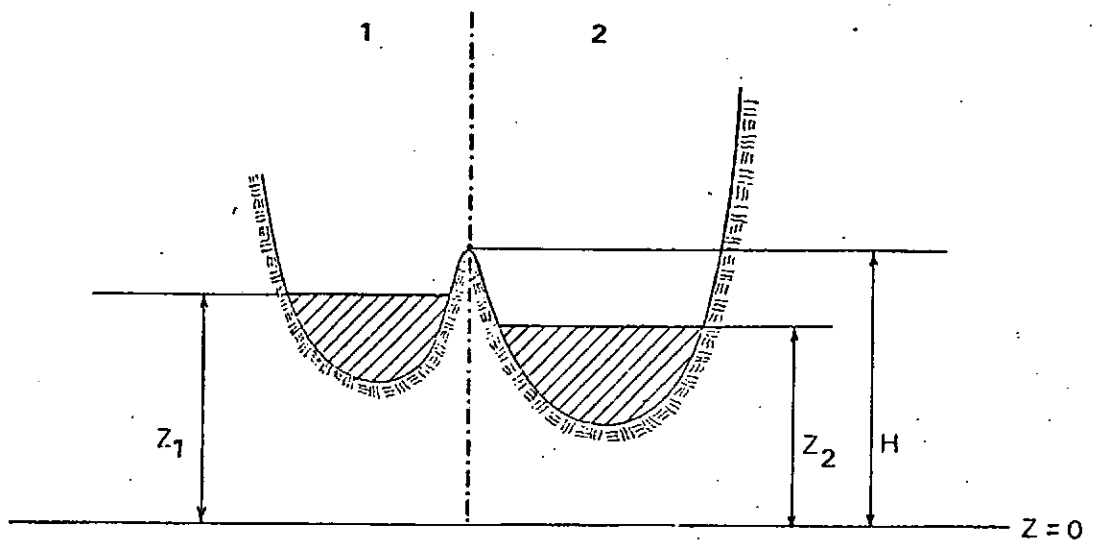


Fig. 5a

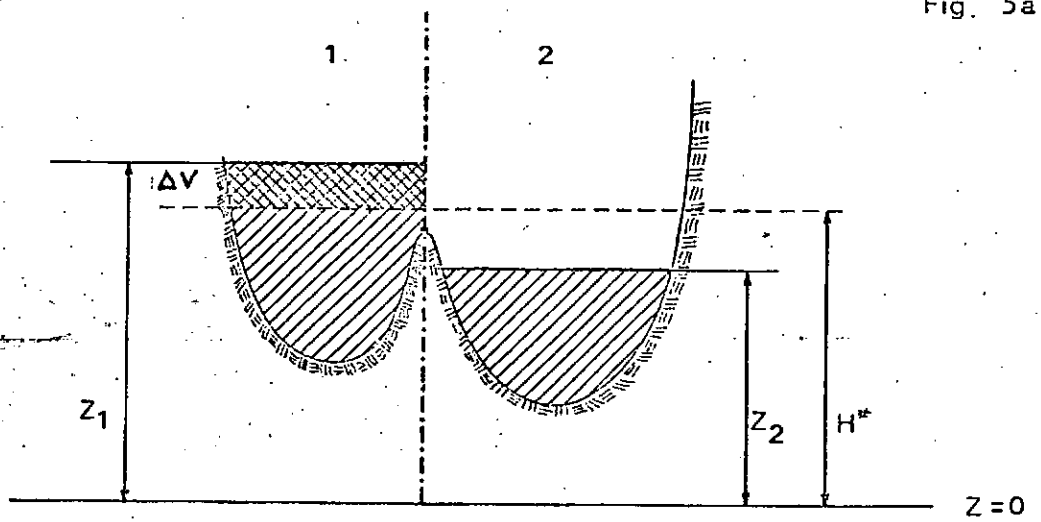


Fig. 5b

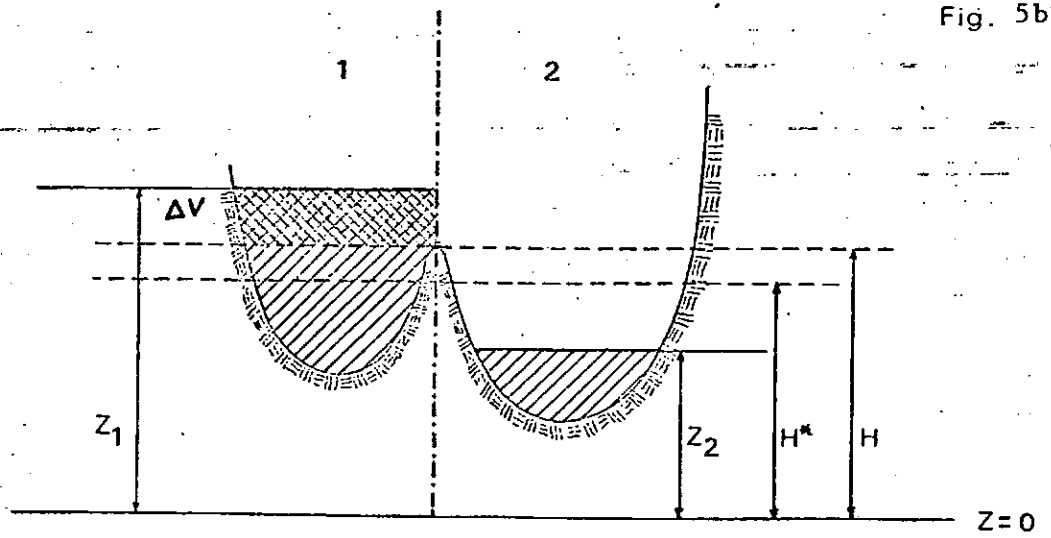


Fig. 5c

Figura 5: Transferencias imaginarias

3 - EVALUACION DEL
MODELO MATEMATICO

3.1- Discretización de la cuenca

El modelo matemático trabaja sobre la base de la discretización del área en estudio en "celdas".

Una "celda" se define como una subcuenca natural o artificial cuyos límites pueden ser divisorias netas (caso de límites topográficos), o divisorias parciales, llamando así a las que embalsarían las aguas y donde las transferencias de caudales quedan definidas por ecuaciones de la hidráulica (caso de terraplenes de caminos o ferrocarriles con obras de arte). Un caso especial de celda lo constituye el cauce propio de un curso de agua (río, canal) en el que las leyes de transferencia entre tramos están definidas por ecuaciones de escurrimiento fluvial.

Los lagos y lagunas sin desagüe, en los que se cuenta con información hidrométrica, son considerados celdas en sí mismos.

En los casos en que los límites reales conformaron celdas de áreas excesivas, se procedió a subdividir las mediante líneas de transferencia imaginaria, a fin de adecuarlas a la escala del modelo.

El área en estudio quedó subdividida en 261 celdas, relacionadas por 576 líneas de transferencia.

El criterio de discretización adoptado es una razonable a-

-proximación a las características de las grandes inundaciones en la zona deprimida de la cuenca. Sin embargo, en la región del pedemonte y periferia de la zona deprimida, donde las pendientes son significativas, se dan casos en que, desde la divisoria de aguas hasta el pie de la sierra de Tandil, se define una única celda en el sentido del escurrimiento.

Obviamente, este criterio de discretización hace que sea imposible estudiar el avance de una inundación en esa zona, perdiéndose al mismo tiempo la posibilidad de calibrar el modelo respecto a la influencia de las inundaciones que allí se originan.

3.2. Método de solución

El modelo consiste esencialmente de tres submodelos que tienen en cuenta, respectivamente, el balance hídrico en cada una de las celdas, las transferencias subterráneas y las transferencias superficiales entre celdas vecinas.

El período de tiempo básico es 1 mes, aunque es posible trabajar con períodos cuya duración sea una fracción del mes.

En este caso, la distribución de la precipitación mensual se realiza dividiendo el total por el número de períodos en que se ha fraccionado el mes, y asignando a cada uno de ellos dicho cociente. Obviamente, esta distribución no es equivalente a la real, por lo que no se considera conveniente utilizar un período menor que 1 mes, mientras no se cuente con datos de precipitación al nivel requerido.

Asimismo, cabe mencionar que el hecho de trabajar con $\Delta t=1$ mes puede ser razonable en el caso de simulación de sequías, pero no lo es en el caso de inundaciones, que son por lo general producidas por lluvias intensas y de corta duración, cuyo efecto quedaría amortiguado a lo largo del mes.

El modelo está estructurado sobre la base de un programa principal denominado ZODESA, cuyo diagrama en bloques se incluye en la figura 6. El mismo, carga los datos en memoria, corrige la evapotranspiración en función del tipo de vegetación, calcula la precipitación para cada período en la

5

forma antes indicada y finalmente llama a las rutinas de cálculo e imprime los resultados.

Además de las ya mencionadas rutinas de balance hídrico (BAL01), transferencias subterráneas (SUBTE) y transferencias superficiales (SAL01), el modelo cuenta con rutinas para el tratamiento de cada tipo de transferencia, carga de datos en memoria y listado de commons.

Subprograma BAL01

Es el encargado de realizar el balance hídrico en cada una de las celdas, para lo cual utiliza un algoritmo de 9 parámetros que, en base a la precipitación caída y a la evapotranspiración potencial corregida, computa el agua disponible superficialmente, la humedad del suelo y el nivel de agua freática.

Los parámetros utilizados por esta rutina y su significado son los siguientes (según la descripción contenida en Informe final - Modelo Matemático - Volumen IV)

CEVAP	coeficiente de evaporación
CINF1	coeficiente de infiltración 1 (tiene en cuenta la infiltración básica, la pendiente y un coeficiente de escala)

CINF2

coeficiente de infiltración 2 (determina la infiltración a partir del agua sobrante del subbalance de evaporación)

CEVSUE

coeficiente de evaporación del suelo (calcula el agua extraída del suelo para evaporar, en el caso en que la evaporación directa fuese menor que la evapotranspiración potencial)

CPERC

coeficiente de percolación (determina la cantidad de agua que pasa del suelo al estrato subterráneo)

RESM1

capacidad de campo (cantidad máxima de agua que almacenaría un perfil) --

RESMIN

almacenamiento de suelo mínimo (cantidad de agua útil para las plantas; se calcula sobre la base del 50% de RESM1)

RESM2

almacenamiento subterráneo máximo (máxima altura que puede alcanzar la napa freática)

PORO

porosidad eficaz (diferencia entre la porosidad total y la capacidad de retención específica del sedimento considerado).

Este parámetro afecta sólo al acuífero.

En el caso de celda tipo cauce, la rutina actualiza el nivel de agua superficial y calcula el nivel subterráneo:

$$Z = Z+P-ETP$$

$$RES2 = Z+CFB$$

Siendo P la precipitación, ETP la evapotranspiración y CFB la cota fondo del baricentro.

En el caso de celda tipo cuenca calcula en primer lugar los caudales de infiltración y de evaporación del agua superficial:

$$QINF = CINFI * (Z + P)$$

$$QEVAI = CEVAP * (Z + P) * \frac{ETP}{200 * \Delta T}$$

y actualiza el nivel superficial:

$$Z = Z + P - QINF - QEVAI$$

Cabe mencionar aquí que, tanto QINF como QEVA1 deberían estar afectados por un factor que tuviese en cuenta la relación área mojada / área total. Además, no ha podido ser aclarado el significado del coeficiente CEVAP.

Si el caudal de evaporación QEVA1 es menor que la evapotranspiración potencial, calcula un caudal de evaporación a partir del agua del suelo:

$$QEVA2 = - \frac{RES1}{RESM1} (QEVA1 - ETP)$$

y lo suma a QEVA1, obteniendo

$$QEVA = \text{caudal de evaporación total.}$$

Si QEVA es mayor que la evapotranspiración potencial, hace $QEVA = ETP$ y $QEVA2 = ETP - QEVA1$.

Luego, actualiza el almacenamiento en el suelo:

$$RES1 = RES1 + QINF - QEVA2$$

A partir del almacenamiento del suelo, y utilizando el coeficiente de percolación se calcula un caudal de infiltración

$$QINF2 = RES1 * CPERC$$

Si el almacenamiento restante en el suelo ($RES1 - QINF2$) es menor que el almacenamiento mínimo ($RESMIN$), hace

$$QINF2 = RES1 - RESMIN$$

$$RES1 = RESMIN$$

Es decir que se fuerza el almacenamiento en el suelo al valor $RESMIN$, con lo cual, como se mencionó en la sección Factores edáficos, la representación de una sequía dependerá de dicho valor. Además, a fin de llevar el almacenamiento en el suelo al valor $RESMIN$ se hace $QINF2$ negativo lo que equivale a tomar agua del almacenamiento subterráneo, sin tener en cuenta la altura de la napa freática ni la disponibilidad de agua en la misma.

Posteriormente, la rutina compara el almacenamiento en el suelo con la capacidad de campo $RESM1$. Si se superó $RESM1$, se incrementa el nivel superficial:

$$Z = Z + (RES1 - RESM1)$$

y se decrementa el caudal de infiltración:

$$QINF = QINF - (RES1 - RESM1)$$

Se actualiza el almacenamiento subterráneo a partir de $QINF2$, utilizando el coeficiente de porosidad eficaz

$$RES2 = RES2 + QINF2 / (PORO * 1000)$$

Si $QINF2 < 0$, como ya se ha mencionado, se decrementa el nivel de agua subterránea. Si $RES2$ resultase negativo, al entrar a la rutina SUBTE ese signo se pierde y es considerado positivo.

Si superó el almacenamiento subterráneo máximo ($RESM2$), se hace $RES2 = RESM2$ y se compara el almacenamiento en el suelo con $RESM1$.

Si $RES1$ es menor que $RESM1$ lo incrementa, haciendo

$$RES1 = RES1 + PORO * 1000 (RES2 - RESM2)$$

y decrementa a $QINF2$

$$QINF2 = QINF2 - PORO * 1000 (RES2 - RESM2)$$

Vuelve a comparar $RES1$ con $RESM1$ y si $RES1$ superó a la capacidad de campo hace

$$RES1 = RESM1$$

incrementa la lámina superficial

$$Z = Z + (RES1 - RESM1)$$

y decrementa el caudal de infiltración

$$QINF = QINF - (RES1 - RESM1)$$

Si $RES1$ es mayor que $RESM1$ incrementa el nivel superficial

$$Z = Z + PORO * 1000 * (RES2 - RESM2)$$

Se debe notar en este paso que si RESM1 fuese capacidad de campo como está definido en el informe, entonces su valor, podría ser superado sin necesidad de que aparezca agua libre en superficie.

Sin embargo, el tratamiento que se hace de esta variable implica que su significado para el modelo es de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo a nivel de saturación.

Subprograma SUBTE

Calcula las transferencias de agua subterránea entre cada celda y sus vecinas, mediante la ecuación de Dupuit

$$DH_i = - \sum_j (H_i^2 - H_j^2) * CES_{ij}$$

donde

DH_i caudal que se transfiere entre las celdas i y j .

H altura del nivel freático sobre el piso del acuífero.

CES_{ij} conductancia entre las celdas i y j .

La conductancia $CES_{i,j}$ se define como:

$$CES_{ij} = K_{ij} \frac{G_{ij}}{2 * D_{ij}}$$

donde:

K_{ij} conductividad hidráulica entre las celdas i y j

G_{ij} ancho de la sección de flujo

D_{ij} distancia entre los baricentros de las celdas respectivas

Es de notar que esta representación del sistema implica que las líneas de flujo deban ser normales a las secciones de paso, condición que no siempre es respetada en la división en celdas del área de estudio. Sin embargo, pruebas hechas en las que se modificó la configuración para respetar la condición antedicha no dieron resultados significativamente distintos a los de la configuración original.

DHi se convierte a altura y se recalcula

$$RES2_i = RES2_i + DH_i$$

Al convertir DHi se cambia su signo, resultando que la dirección del flujo subterráneo es desde la celda de menor a la de mayor altura.

Como se mencionó en la sección hidrogeología la utilización

del mismo criterio de discretización que para el sistema superficial no es apropiado en tanto la precisión de los parámetros del acuífero y los pozos freaticos existentes definen una escala mucho mas pequeña.

Subprograma SALO1

Para el cálculo del escurrimiento superficial se ha recurrido al modelo matemático del Delta del Mekong, desarrollado por SOGREA, bajo la dirección de D. Zanobetti.

El método consiste en la resolución para cada celda i, de la ecuación de continuidad discretizada en diferencias finitas:

$$\Delta z_i \left(-\frac{S_i}{\Delta T} + \theta \sum_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial z_i} \right) + \theta \sum_k \left(\frac{\partial Q_{ik}}{\partial z_k} \Delta z_k \right) + \sum_k Q_{ik} = 0$$

siendo:

Q_{ik} caudal de transferencia entre las celdas i y k.

S_i área mojada correspondiente a la altura Z_i (esta altura es la resultante del balance hídrico).

θ

factor de ponderación, $0 < \theta \leq 1$.

Al plantear la ecuación para todas las celdas, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, lineales en ΔZ_i .

A fin de resolver este sistema, se reenumeran las celdas con el objeto de obtener una matriz "banda" y se utiliza la rutina DGELB de la biblioteca científica de IBM, adecuada especialmente para estos casos.

La metodología empleada para la reenumeración de celdas es válida sólo para el esquema de subdivisión planteado en el EZDS. Esto quita flexibilidad al modelo, ya que, por ejemplo, la simple eliminación de una celda o la necesidad de analizar una subárea del área total, implicaría la reformulación del método y la consiguiente reprogramación de la rutina.

Funciones de transferencia

La rutina TRANF da control, en función del tipo de transferencia, a la correspondiente rutina de cálculo, que retorna los siguientes valores:

QT caudal de transferencia entre celdas
I y J.

DQI derivada del caudal respecto a la al

-tura de la celda I.

DQJ

derivada del caudal respecto a la altura de la celda J.

A continuación, se describe cada una de las rutinas de cálculo:

TRAT 1 - Transferencias cuenca-cuenca: Sean Z_0 la altura correspondiente al cero de la línea de transferencia, Z_V la altura del vertedero, Z_I la altura de la celda I y Z_J la altura de la celda J. Se supone siempre $Z_I > Z_J$ (si no lo es, se intercambian los valores) y se conserva en S el signo del caudal de transferencia ($S = -1$ si $Z_I > Z_J$, $S = 1$ si $Z_I < Z_J$).

Se definen

$$H_I = Z_I - Z_0$$

$$H_J = Z_J - Z_0$$

$$D_H = H_I - H_J$$

$$V_I = H_I - H_V$$

Esta rutina utiliza una tabla almacenada en el common DT5, que contiene en forma de matriz de dimensión (5,15) los caudales de transferencia entre las celdas I y J en función de H_J y D_H . Así, $Q(I,J)$ es el caudal correspondiente a

$$H_J = I - 1$$

$D_H = V(J+1)$ siendo V un vector de 16 elementos, que contiene:

V= (0.0;0.05;0.1;0.15;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8;
0.9;1.0;2.0;3.0;4.0)

Si $HI < 0$ y $HJ < 0$, la rutina devuelve los valores $QT=DQI=DQJ=0$.

Considera cuatro casos, según los valores de HI, HJ y HV:

$$HI \geq HV \quad y \quad HJ \leq \frac{2}{3} * HI$$

$$HI \geq HV \quad y \quad HJ > \frac{2}{3} * HI$$

$$HI < HV \quad y \quad HJ > \frac{2}{3} * HI$$

$$HI < HV \quad y \quad HJ \leq \frac{2}{3} * HI$$

Esta rutina, dada la complejidad de su programación y la falta de documentación, no ha podido ser analizada en detalle, aunque se pueden hacer algunos comentarios.

En el primero y en el último de los casos el valor HJ se hace igual a 0, con lo cual $DH=HI$. Al llevar a cabo el cálculo de las derivadas se hace $DQJ=0$ y DQI resulta positiva si $HI > HJ$ y negativa si $HI < HJ$. En realidad, en el caso de las derivadas no debería haber un cambio de signo sino un intercambio de valores, ya que HI y HJ fueron intercambiadas. Así, si $HJ > HI$ resultaría $DQI=0$ y DQJ igual al valor estimado a través de la tabla.

Asimismo, cabe mencionar que en algunos casos se utilizan valores de índices no definidos, por ejemplo V(17), siendo V un vector de 16 elementos.

TRAT 2 - Transferencia cauce-cauce: Esta rutina calcula el caudal de transferencia entre los tramos I (aguas arriba) y J (aguas abajo), mediante la fórmula de Chézy:

$$QT = \frac{1}{n} * A * R^{2/3} * P^{1/2}$$

siendo

QT	caudal de transferencia
A	área de la sección de paso
R	radio hidráulico de la sección de paso.
n	coeficiente de rugosidad de Manning
P	pendiente superficial

Calcula la pendiente P del tramo inferior ($P = \frac{|Z_I - Z_J|}{L * 1000}$),

siendo L la longitud del tramo. Esto implica un error conceptual, ya discutido en el capítulo de Hidráulica.

Utiliza la tabla Altura / Area / Radio hidráulico (H/A/R), contenida en el common DT2, para obtener a partir de $H = Z_I - Z_{OI}$ los valores correspondientes de A y R, interpolando cuando

fuese necesario (Z_{0I} es la altura del cero hidráulico de la celda I).

Por último, calcula Q_T a partir de la fórmula arriba indicada, afectándolo por un signo

$$Z_9 = \frac{Z_I - Z_J}{|Z_I - Z_J|}$$

El criterio adoptado para el signo del caudal, es diferente del adoptado en los otros tipos de transferencia, ya que el caudal saliente de la celda I resultará positivo y el entrante negativo. Como consecuencia de esto, ingresará el caudal a la celda de mayor altura.

Las derivadas de Q_T respecto de Z_I y Z_J se calculan como cociente incremental. Para ello se hace $\Delta Z = 0.1$, se recalcula Q y resulta:

$$DQ_I = \frac{Q(Z_I + 0.1, Z_J) - Q(Z_I, Z_J)}{0.1}$$

$$DQ_J = \frac{Q(Z_I, Z_J + 0.1) - Q(Z_I, Z_J)}{0.1}$$

Cabe mencionar que hay importantes errores de programación, tales como el uso de índices no definidos para entrar en la tabla $H/A/R$, o la confusión de la primera dimensión de la tabla (10) con el máximo valor de H tabulado (5).

TRAT 3 - Transferencias cauce-cuenca: Esta rutina utiliza una tabla HI/HJ/Q, almacenada en el common DT4 en forma de matriz de 11x11. El elemento A(I,J) de la matriz contiene el caudal de transferencia correspondiente a

$$HI = 0.5 * (I-1)$$

$$HJ = 0.5 * (J-1)$$

Inicialmente, se calculan $HI=ZI-ZO$ y $HJ=ZJ-ZO$, siendo ZI: altura de la celda I, ZJ: altura de la celda J y ZO: altura del cero de la línea de transferencia.

Con HI y HJ, se determinan los 4 elementos de la matriz entre los cuales se llevará a cabo la interpolación, para obtener el caudal de transferencia. Sean esos elementos:

$$A(N,M); A(N,M+1); A(N+1,M) \text{ y } A(N+1,M+1)$$

La rutina controla que los valores M y N no sean superiores a 11. En realidad, debería controlar que no sean superiores a 10, pues si N o M son iguales a 11, utilizará elementos no definidos (por ejemplo Q(12,M) y Q(12,M+1)).

Además, en caso de que M y/o N sean mayores que 11, retorna al programa de llamada, previa emisión de un mensaje con los valores $QT=DQI=DQJ=0$, incorrectos a los efectos de la continuidad del cálculo.

Las derivadas son calculadas en la forma ya descripta en la

rutina TRAT 2.

TRAT 4 - Transferencias imaginarias: Los valores de entrada a la rutina son: ZI (altura en la celda I), ZJ (altura en la celda J), HPR (altura a partir de la cual hay transferencia en algún sentido) y la tabla H/VI/VJ (altura / volumen celda I / volumen celda J).

Inicialmente, calcula $Z1=ZI-HPR$ y $Z2=ZJ-HPR$. Si $Z1=Z2$, o si $Z1$ y $Z2$ son menores que HPR, hace $QT=0$ y realiza el cálculo de las derivadas en la forma usual.

A partir de los valores $Z1$ y $Z2$, utilizando la tabla e interpolando en caso de ser necesario, calcula los volúmenes $V1$ y $V2$. Si $Z1$ y/o $Z2$ son mayores que la última altura tabulada, imprime un mensaje de error y retorna los valores $QT=DQI=DQJ=0$, incorrectos a los efectos del cálculo posterior.

Calcula la altura $H8$ correspondiente al volumen suma $V1+V2$, y posteriormente el volumen V de la celda de mayor altura correspondiente a $H8$.

Finalmente, calcula el caudal de transferencia a partir del volumen $V1-V$. Este es un evidente error, ya que $V1$ no es necesariamente la celda de mayor altura.

Las derivadas del caudal respecto a ZI y a ZJ se calculan en la forma descripta en la rutina TRAT 2.

Además de los ya mencionados, se han detectado otros errores en los cálculos realizados por la rutina. Por ejemplo, durante el cálculo de la altura H8 correspondiente al volumen suma, en un caso se hace H8=volumen. Además, se calcula mal el volumen V1 en el caso en que Z1 es menor que la primera altura tabulada, ya que hace

$$V1 = \frac{Z1 * V(1,1)}{ZT(1)},$$

y deberá hacer

$$V1 = \frac{Z1 * V(1,1)}{ZT(1)}$$

TRTB01 - Transferencia de borde (salidas de la cuenca): Esta rutina inicialmente controla la existencia de la línea requerida en la tabla almacenada en el common DT6. Dicha tabla contiene la curva altura/caudal(H/Q) correspondiente a cada línea de transferencia.

Si la línea no es hallada, fija un código de error en 3 y retorna QT=DQI=DQJ=0.

A partir del valor ZI de entrada, interpolando si es neces-

rio, determina el caudal de transferencia QT y sus derivadas.

Así, si $H(I-1) < ZI < H(I)$,

$$QT = - \left[Q(I-1) + \frac{ZI - H(I-1)}{H(I) - H(I-1)} * (Q(I) - Q(I-1)) \right]$$

$$DQI = \frac{Q(I-1) - Q(I)}{H(I-1) - H(I)}$$

$$DQJ = 0$$

Cabe mencionar que si ZI es menor que la primera altura tabulada H(1), en las expresiones anteriores resultaría I-1=0.

Si $ZI = H(I)$ e $I \geq 2$,

$$QT = -Q(I)$$

$$DQI = \frac{Q(I-1) - Q(I)}{H(I-1) - H(I)}$$

$$DQJ = 0$$

Si $ZI = H(1)$,

$$QT = -Q(1)$$

$$DQI = \frac{Q(I) - Q(I+1)}{H(I+1) - H(I)}$$

$$DQJ = 0$$

Con lo cual resulta erróneo el signo de la derivada del caudal respecto a la altura ZI.

Es necesario mencionar que la rutina supone que todas las tablas tienen dimensión máxima 31 o bien que luego del último valor significativo tabulado hay un valor de altura 0. Estas condiciones no siempre son satisfechas, razón por la cual el valor resultante de la interpolación puede no tener sentido.

TRTB02 - Transferencias de borde (ingresos a la cuenca): Esta rutina inicialmente controla la existencia de la línea de transferencia y del período procesado en la tabla almacenada en el common DT7. Dicha tabla contiene, en forma de matriz de dimensiones (3,120), los caudales mensuales correspondientes a un período de 10 años.

Si la línea o el período no son hallados fija en 1 el valor del código de error y retorna los valores de QT y sus derivadas en 0.

En caso contrario, retorna el correspondiente valor de caudal QT, y $DQI=DQJ=0$.

Cabe destacar que se han detectado errores de programación en esta rutina, como por ejemplo, la repetición innecesaria de grupos de instrucciones.

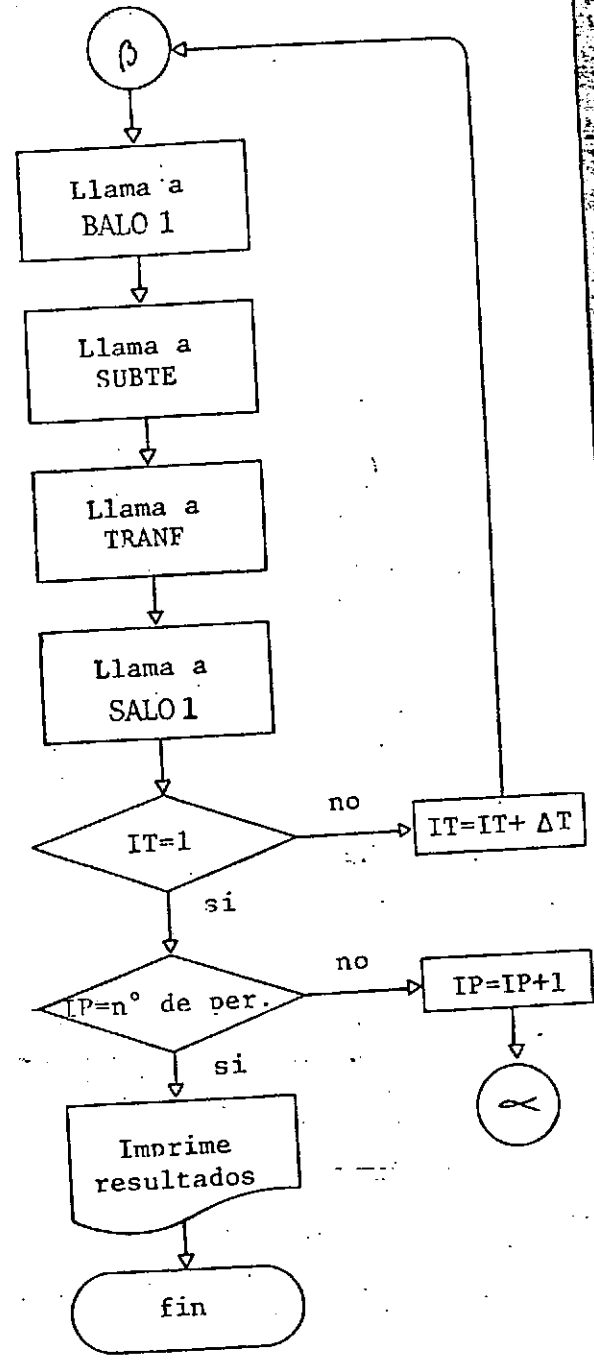
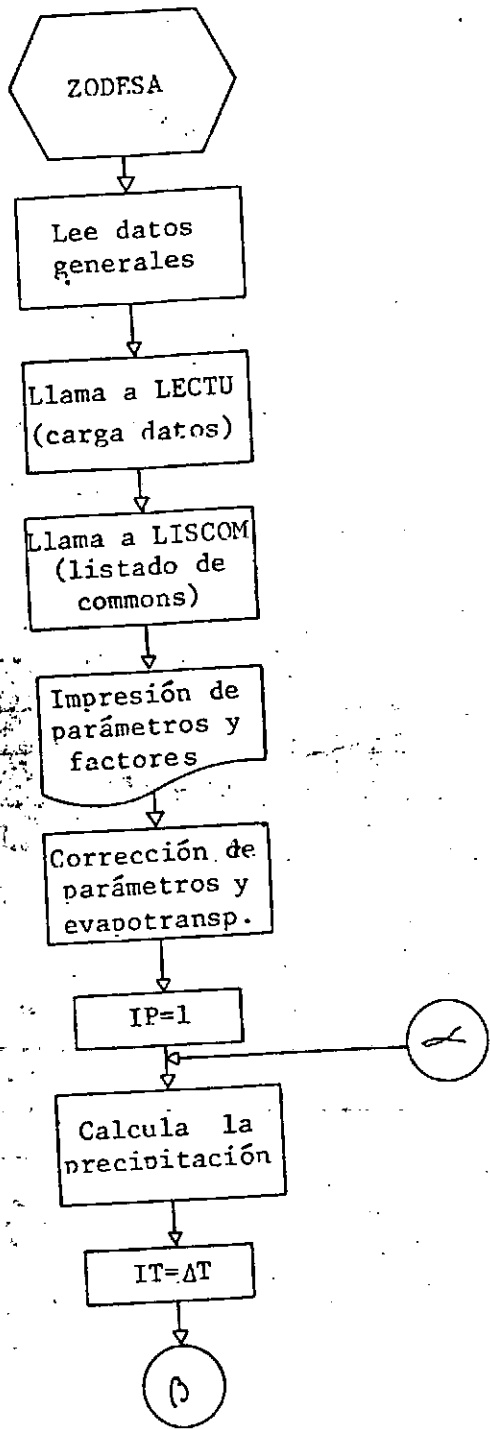


Figura 6: Diagrama en bloques del modelo ZODESA

3.3. Calibración

Como se discute más extensamente en la sección respectiva de la propuesta para la segunda etapa, el punto crítico de la calibración es la selección de los procesos de los que se requieren las respuestas más precisas.

En el modelo ZODESA se ha adoptado el criterio de simular largos períodos (10 años) en los que presuntamente estarán incluidos el número y variedad suficiente de sequías e inundaciones para permitir el ajuste de los parámetros.

Este concepto adolece de deficiencias que aunque se comentan en otras partes del informe vale la pena remarcar aquí.

En primer término, los parámetros involucrados en el fenómeno de la sequía son distintos a los de la inundaciones. Mientras que para la sequía tienen relevancia la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil de suelo y la capacidad evapotranspirativa de la vegetación, para las inundaciones los relevantes son la capacidad de infiltración y las funciones de transferencia entre celdas.

En segundo término, la adopción del criterio de simular largos períodos probablemente obligó a elegir un paso de tiempo básico mensual y a ingresar la información de entrada a ese nivel. Por ejemplo, las precipitaciones se toman como totales mensuales, lo que implica que precipitaciones intensas de corta duración no son necesariamente percibidas como causantes de inundaciones.

Si bien el modelo tiene la capacidad de subdividir el paso de tiempo básico, en fracciones tan pequeñas como sea necesario, el problema mencionado no se resuelve, pues simplemente asigna a cada fracción del paso de tiempo básico la alícuota correspondiente del total mensual de precipitación, suponiendo implícitamente que la misma se distribuye uniformemente a lo largo del mes.

Para la calibración, se intentaba comparar el escurrimiento superficial con las alturas hidrométricas del primer día de cada mes en 33 estaciones distribuídas en la cuenca.

Hay aquí un problema conceptual sobre la representación de los fenómenos en el modelo. Al realizarse la integración del sistema de ecuaciones entre el instante t y el $t + \Delta t$, el resultado es, implícitamente, un valor medio de la variable en el período y no el puntual al fin del mismo. De ahí que no sea adecuado usar este último para calibrar el modelo.

En lo que respecta a las sequías no aparece en el estudio referencia alguna a cómo se pensaba calibrar el modelo.

Suponiendo que los problemas mencionados puedan ser resueltos, se discutirá ahora el procedimiento de calibración.

Para poder calibrar un modelo es necesario que la información de entrada, el valor de los parámetros, la información de salida y la de comparación, sean presentadas en forma sintética. Esta situación no se da en el modelo ZODESA. En él los listados de

resultados están ordenados de modo que hace sumamente difícil su análisis y no tiene construída ninguna función que relacione el resultado de la simulación con los valores de contraste. Más aún, los datos hidrométricos de las estaciones de control no forman parte de la información que maneja el modelo. De cualquier modo, la comparación de los resultados de la simulación con los de control implica la observación simultánea de 33 hidrogramas de 10 años de longitud (120 puntos o más en cada uno de ellos) por cada corrida de calibración.

Un punto sumamente importante a considerar, es que por la construcción del modelo, éste no puede simular procesos en partes de la cuenca independientemente, lo que permitiría subdividir el problema y calibrar por subcuencas.

La última consideración, se refiere al número de parámetros a ajustar. En el subprograma de balance hídrico se utilizan 9 parámetros para representar el sistema, lo que implica manejar más de 2 300 parámetros a nivel de toda la cuenca. A éstos hay que agregar el parámetro que describe el tipo de vegetación, TIVE, del que se define un valor distinto para cada celda y cada mes del año, lo que implica más de 3 200 parámetros, y la conductividad hidráulica entre celdas que está definido para 576 líneas de transferencia. Esto hace un total de más de 6 000 parámetros de ajuste que deben manejarse simultáneamente.

Se debe hacer notar que para el escurrimiento superficial no se han definido parámetros de ajuste, ya que las tablas de transferencia se consideran información no modificable.

3.4 Procesamiento

La versión del modelo ZODESA facilitado por el EZDS, se procesó en una computadora IBM 370/158. Del análisis del procesamiento se puede determinar que el cálculo de cada paso de tiempo insume 24.8 segundos de unidad central de procesamiento (UCP) y produce 32 páginas de listado. Esto implica que procesar 10 años con paso de tiempo mensual insumirá aproximadamente 50 minutos de UCP y producirá un listado de 3840 páginas. Este listado requeriría el empleo de una impresora rápida (2500 lpm) durante más de dos horas.

La cantidad de memoria utilizada por el modelo es 2880 kilobytes en la etapa de linkedición y 1330 KB en ejecución. Se debe comentar aquí que para la estimación hecha por el EZDS de 100 corridas de calibración el tiempo de uso de unidad central e impresora se hace prohibitivo y los listados generados son imposibles de analizar manualmente.

El uso de memoria podría ser reducido en alguna medida si se dimensionasen correctamente las tablas y matrices que se definen en el programa.

4 - PROPUESTA PARA
LA SEGUNDA ETAPA

4.1. Complemento de la información existente

Como ha sido discutido en el capítulo de evaluación de la información existente en el EZDS, los datos para la formulación y calibración del modelo matemático de la cuenca están esencialmente disponibles. Las salvedades que hay que hacer se refieren fundamentalmente a la información de caudales de salida en el cierre de la Ruta N° 11 y evaluación de la curva de tensión de retención del agua del suelo.

Se estima que la información sobre precipitación diaria y pluviográfica existente es, en principio, suficiente, aunque deberá ser procesada y analizada con los criterios ya discutidos.

Análisis más detallados podrían indicar la necesidad de contar con registros para algunas situaciones de interés que no están incluidas en las series disponibles. En particular, habría que adquirir información de las inundaciones de 1978 y 1980.

Una información de la que no se dispone actualmente y que será necesario adquirir, es la de imágenes de satélite, que servirán para proporcionar información sobre el área afectada por las inundaciones y la duración de tales situaciones.

La información sobre las curvas H/Q en las estaciones hidromé

stricas deberá ser mejorada con aforos más frecuentes que permitan una mejor estimación de las mismas. Particularmente, en el caso de las estaciones sobre la Ruta N° 11, se deberá tomar en consideración el efecto de remanso provocado por las mareas. Mediante el análisis detallado de las mediciones realizadas y el estado de la marea en el momento de los aforos se podrá eventualmente, recuperar parte de la información existente en esos puntos.

En las secciones correspondientes (de este informe), se hacen comentarios específicos sobre la problemática de la información.

4.2 Estructura del modelo

La estructura del modelo que se propone está basada en el concepto de que los procesos físicos que actúan sobre la Cuenca son interdependientes pero separables. Por lo tanto, pueden ser simulados en forma separada e interrelacionados en un modelo unificado de la cuenca.

Se han tomado varios factores en consideración para la formulación de esta estructura. Ellos son:

- 1- El desarrollo de los subsistemas conceptualmente más simples no debe ser demorado por los problemas que surgen al modelar los más complejos.
- 2- Bajo diferentes circunstancias, un mismo proceso físico debe ser simulado con diferentes modelos, por lo que resulta conveniente una estructura modular.
- 3- La tecnología para representar los distintos procesos es cambiante. Por lo tanto, la estructura debe ser flexible como para adaptarse a los cambios.
- 4- La configuración de la cuenca sufre modificaciones debido a la intervención humana que el sistema debe ser capaz de incorporar sin modificar la estructura básica.
- 5- Debe ser posible analizar la respuesta a condiciones dadas sobre ciertos sectores de la cuenca sin necesidad de simular regiones irrelevantes

para el problema.

- 6- Debe ser posible calibrar los parámetros del modelo sin que se produzcan enmascaramientos debido a la complejidad del sistema.

En la Figura 7 se muestra esquemáticamente la estructura propuesta, que consiste esencialmente de un conjunto de procesos separados, a los cuales controla e interrelaciona un programa ejecutivo.

La información necesaria para la simulación, como así también los resultados producidos por la misma, residen en un Banco de Datos, al cual se accede a través de un Subsistema de Manejo de Archivos. Este permite obtener, corregir o grabar información, actualizar archivos, seleccionar el período requerido dentro de una serie, etc.

La adopción de una estructura como la propuesta implica ciertas consecuencias de interés. Ellas son:

- 1- La adopción del criterio de operación secuencial permite procesar el período de interés para cada subsistema en forma separada, y por lo tanto, calibrarlo independientemente.
- 2- La utilización de un Banco de Datos minimiza el uso de commons que requieren computadoras de gran capacidad de memoria. El concepto de Banco de Datos provee además la ventaja de permitir simular subregiones, recomenzar una corrida desde cualquier punto, acceder a los resultados para análisis a posteriori, etc.

- 3- El programa ejecutivo es el único que conoce la configuración del sistema completo y maneja los distintos procesos intervinientes a medida que son necesarios. Además, dado que opera con módulos predesarrollados, el usuario del modelo necesita sólo definir la configuración y los procesos a simular, desentendiéndose de los problemas de programación.
- 4- La estructura propuesta permitirá evitar que el desarrollo del modelo sea condicionado por las situaciones más difíciles, posibilitando la obtención de resultados sobre subcuencas sin que todo el sistema deba estar completado.
- 5- Los requerimientos computacionales serán moderados, tanto en tamaño de memoria como en tiempo de proceso. Será posible modificar configuraciones y procesos sin perturbar la operabilidad del modelo.

Los subsistemas que se implementarán para el procesamiento de la información y la simulación de los procesos físicos relevantes, se detallan en forma indicativa a continuación:

Procesamiento de la información

Se implementarán sistemas para la detección de inconsistencias en la información, ya sea que se produzcan sistemáticamente o en forma aislada. Para la detección de errores sistemáticos se usarán algoritmos de análisis de doble masa en pares de estaciones. Estos algoritmos detectan automáticamente el punto de inflexión y calculan los coeficientes de corrección. Para la detección de errores aislados se utilizarán algoritmos que toman en cuenta la variabilidad natural de las series de datos, analizan los que superan una desviación específica y recalculan los parámetros estadísticos para posteriormente reprocesar la serie hasta que todos los valores anómalos hayan sido detectados.

Dado que los fenómenos que interesa analizar son de características extremas, se implementarán algoritmos para analizar tales situaciones, se analizarán secuencias de períodos secos y lluviosos, como así también distribuciones de frecuencias de magnitud y duración de lluvias intensas. La información anterior permitirá utilizar algoritmos de generación de información sintética que preserven las características temporales y la distribución espacial de los fenómenos.

Simulación de procesos físicos

Los procesos físicos de interés que ocurren en la cuenca, se considera a priori que pueden separarse en dos situaciones claramente definidas. Por una parte las sequías, cuya influencia en la cuenca es generalizada y que puede, por lo tanto, tratarse en grandes subregiones y haciendo intervenir sólo los procesos de balance hídrico y escurrimiento subterráneo; por otra, las inundaciones, que pueden ser generalizadas o locales pero que necesitan mucho mayor detalle para la representación del escurrimiento superficial.

Para el tratamiento de la sequía se tomarán en cuenta las observaciones hechas en la introducción de la sección Edafología en lo que respecta a los efectos del aumento de la tensión de retención del agua del suelo y el ascenso capilar desde la superficie freática. La cuidadosa descripción del balance de agua en el suelo permitirá posteriormente, establecer un balance salino que refleje el deterioro de las condiciones agrológicas.

Para el análisis de inundaciones se tratarán las distintas subregiones o subcuencas en forma independiente con el doble objetivo de representar lo más ajustadamente posible las características físicas de cada una y obtener resultados a nivel operacional, sin que sea necesario completar el análisis de toda la cuenca.

A continuación, se describen los principales procesos que intervienen en la simulación.

Balancé de agua y flujo base: Atendiendo a las características de la región en estudio aparece como conveniente representar el perfil relevante para los procesos hidrológicos por tres estratos definidos como:

1- Almacenamiento superficial.

2- Medio poroso superior.

3- Medio poroso profundo.

El primero representa el exceso de precipitación que escurrirá superficialmente o quedará retenido en las irregularidades del terreno.

El segundo es el espesor no saturado del perfil; el mismo es variable con el nivel de la superficie freática libre.

El tercer estrato está conformado por el acuífero freático.

Las relaciones entre los estratos se dan por las funciones de infiltración, percolación y ascenso capilar. Estas funciones se eligen de modo que representen las características físicas del fenómeno. Por ejemplo, la infiltración se podría simular mediante la ecuación de Philip.

$$\frac{di}{dt} = K_m \left(1 + \frac{G (m - m_o)}{i} \right)$$

donde:

i infiltración acumulada hasta el momento en el perfil.

m	humedad del suelo.
m _o	humedad inicial del suelo.
K _m	conductividad capilar correspondiente al contenido de humedad m.
G	potencial capilar en el frente mojado

El valor de G se deriva de la curva de tensión de retención de agua en la matriz porosa.

El aporte del perfil al escurrimiento en los cauces se realiza en el primer estrato por escurrimiento superficial como se describirá más adelante.

En el segundo estrato se supone que no hay aporte directo al flujo base, debido a la escasa pendiente de la región.

La bibliografía existente sobre el tema indica que el aporte al flujo base de este estrato es relevante en el caso de pendientes superiores al 60%.

En el tercer estrato, el aporte se realiza por drenaje de la parte superior del acuífero hacia los cauces naturales o artificiales que drenan la región. Esto se puede simular eficientemente por el método de Dumm, Tapp y Moody, el cual se basa en la hipótesis de que la superficie freática, entre los cauces, adopta la forma de una parábola de 4º grado.

Partiendo de la ecuación inicial. (t = 0)

$$h_{x_0} = 8 h_{c_0} \left(\frac{x}{L} - \frac{3 x^2}{L^2} + \frac{4 x^3}{L^3} - \frac{2 x^4}{L^4} \right)$$

donde:

h_x altura de la superficie freática a la distancia x del cauce.

h_c altura de la superficie freática cuando $\frac{dh_x}{dx} = 0$

L distancia entre cauces.

se obtiene la ecuación correspondiente al instante t , en términos de los parámetros hidrológicos del medio poroso. Finalmente, se deriva el caudal de aporte a los cauces:

$$q = \frac{\pi K d h_{c_t}}{L}$$

donde:

K conductividad hidráulica.

d altura desde el piso del acuífero al cauce.

El aporte del acuífero al flujo base por debajo del nivel de los cauces, se realiza indirectamente, afectando la altura de la superficie freática. Este movimiento se realiza a una escala temporal y espacial mas pequeña y se computa mediante un modelo de flujo saturado en base a la ecuación de Darcy.

La Figura 8 muestra un esquema del perfil y sus relaciones.

Escorrimento superficial y en canales abiertos: Para la simulación del escurrimento se adoptará, en principio, el modelo conocido como "onda cinemática". Este representa una forma simplificada de las ecuaciones de St. Venant, en la cual intervienen sólo los términos de fricción de la ecuación dinámica. Esta ecuación es reemplazada por una relación altura-caudal, basada en las fórmulas de Chezy o Manning.

En el caso de escurrimento superficial, las ecuaciones son:

$$\text{Continuidad:} \quad \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p + \frac{q_0}{l} - i$$

$$\text{Momentos:} \quad a_c \cdot y^{m_c} = q$$

donde:

y	altura de la lámina de escurrimento (L).
q	caudal específico (L^2 / T)
t	tiempo (T)
x	distancia a lo largo del segmento (L)
p	intensidad de la precipitación (L / T)
i	infiltración (L/T)
q_0	escurrimento desde un segmento superior (L^2/T)
l	longitud del segmento (L)

Las ecuaciones correspondientes para el flujo en canales son:

$$\text{Continuidad:} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1$$

$$\text{Momentos:} \quad a_s A^{m_s} = Q$$

donde:

A sección de flujo (L^2)

Q caudal (L^3/T)

q_1 aporte lateral (L^2/T)

y las demás variables ya fueron definidas.

Como ya se ha mencionado, la relación altura-caudal se obtiene a partir de la ecuación de momentos simplificada, aplicando las fórmulas de Chezy o Manning. Considerando el equilibrio de fuerzas en un canal rectangular ancho, se obtiene la ecuación de momentos:

$$g S_o - \frac{f d v |v|}{2 d y} = 0$$

donde:

g aceleración gravitacional (L/T^2)

S_o pendiente del segmento (1)

f coeficiente de fricción (1)

d densidad (M/L^3)

v velocidad (L/T)

y altura de la lámina (L)

Despejando v , resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{f} S_0} y$$

$$v = C \sqrt{S_0} y$$

siendo $C = \sqrt{\frac{2g}{f}} (L^{1/2} / T)$ el coeficiente de Chezy.

Llamando a al producto $C \sqrt{S_0}$, se obtiene en el caso de un canal rectangular ancho

$$v = a y^{1/2}$$

$$q = v y = a y^{3/2}$$

En el caso general:

$$q = a_c y^{m_c}$$

o bien

$$q = v A = a_s A^{m_s}$$

Los parámetros a y m están relacionados a la rugosidad y geometría del canal. Como los factores que intervienen no pueden determinarse con precisión, en el modelo se tratan como parámetros de ajuste.

En la región de las sierras de Tandil y periferia de la Zona Deprimida, donde las pendientes son significativas y las subcuencas identificables sin dificultad, éstas se discretizarán en elementos geométricos equivalentes como muestra la Figura 9. Las ecuaciones de continuidad y momento se resuelven numéricamente sobre estos elementos obteniéndose como resultado la altura del escurrimiento superficial en los elementos y el cau-

dal en los cursos de agua.

En lo que respecta a la Zona Deprimida, se planteará como hipótesis de trabajo que hay una red de drenaje identificable y por ende una zona de influencia de cada elemento de la red. Estas zonas de influencia constituyen una aproximación al concepto de subcuenca.

Esta hipótesis probablemente sea válida en situaciones de escurrimiento normal o inundaciones moderadas en volumen y/o limitadas en cuanto a su área de influencia.

Mientras persista la validez de esta hipótesis el tratamiento puede ser similar al discutido anteriormente.

En el caso de grandes inundaciones, la hipótesis anterior debe ser modificada para admitir la fusión de subcuencas al superar el nivel de agua la divisoria entre ellas.

A modo indicativo se planteará un método para la simulación de las situaciones mencionadas.

Se hace notar que la estrategia que se adopte en definitiva dependerá de los resultados que se obtengan en la simulación y que la que se presenta no es la única posible.

Esta estrategia se basa en la extensión del criterio planteado para la simulación de inundaciones moderadas usando el modelo de onda cinemática.

Se plantean aquí fundamentalmente dos situaciones: en la primera, la altura de la lámina en una de las subcuencas supera la divisoria de aguas como se esquematiza en la Figura 10a.

En este caso la lámina transferible de S1 se considera como un aporte desde aguas arriba a cada elemento de S2 y su caudal específico se estima por funciones exponenciales del tipo de las usadas para vertederos, es decir

$$q_{v_2} = \alpha (y_1 - h_d)^\beta$$

$$q_{v_1} = - q_{v_2}$$

donde

q_v caudal específico de transferencia (L^2/T)

y altura de la lámina de escurrimiento en S1 (L)

h_d altura de la divisoria de aguas entre S1 y S2 (L)

α, β parámetros de ajuste (En general, β adopta el valor $3/2$)

El caudal de transferencia se incorpora a la ecuación de continuidad de la cuenca correspondiente con su signo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p - i + \frac{q_v}{l}$$

donde

l longitud del elemento de escurrimiento superficial (L)

Se hace notar que q_v es positivo para la subcuenca que recibe el aporte y negativo para la que aporta.

La segunda situación posible es cuando el nivel de la lámina de escurrimiento en ambas subcuencas supera el de la divisoria de aguas como se esquematiza en la Figura 10b.

En este caso el caudal específico transferible es función de la diferencia de alturas y_1 e y_2 .

$$q_{v_2} = \alpha \left| y_1 - y_2 \right|^{\beta} \cdot \text{sg} (y_1 - y_2)$$

$$q_{v_1} = - q_{v_2}$$

El resto del desarrollo es similar al del primer caso.

Eventualmente, pueden darse situaciones en que haya que definir la transferencia con más de una función; por ejemplo en casos en que la divisoria de aguas sea un camino con alcantarillas. En estas situaciones se definirá

$$q_v = q_a + q_v$$

donde:

q_a caudal específico transferido por alcantarillas (L^2/T)

q_v caudal específico transferido por vertedero (L^2/T)

Las funciones q_a y q_v son de la misma forma que la ya planteada

q_v

Estas dos situaciones son relevantes mientras el nivel de la lámina de escurrimiento supere el nivel de la divisoria de aguas, lo que exige una estrategia particular de simulación.

El planteo de la estructura del modelo enfatizó las ventajas operativas y computacionales de simular las subcuencas secuencialmente y agregar posteriormente los resultados parciales.

En las situaciones de dependencia mutua entre subcuencas, que se da cuando ocurren transferencias entre ellas, no es posible ya la simulación secuencial y la estrategia se modifica de la forma siguiente:

- 1- Cada subcuenca se simula independientemente hasta el momento en que ella misma u otra adyacente haya rebasado el nivel h_d , generando situaciones de interdependencia.
- 2- Se reprocesan las subcuencas involucradas en forma simultánea a partir del momento en que se haya producido la interdependencia.
- 3- A medida que ésta desaparece se retorna al esquema original.

Es posible emplear esta estrategia de simulación sin degradar significativamente la eficiencia del sistema gracias a la estructura de archivos, que permite retomar los procesos desde puntos intermedios.

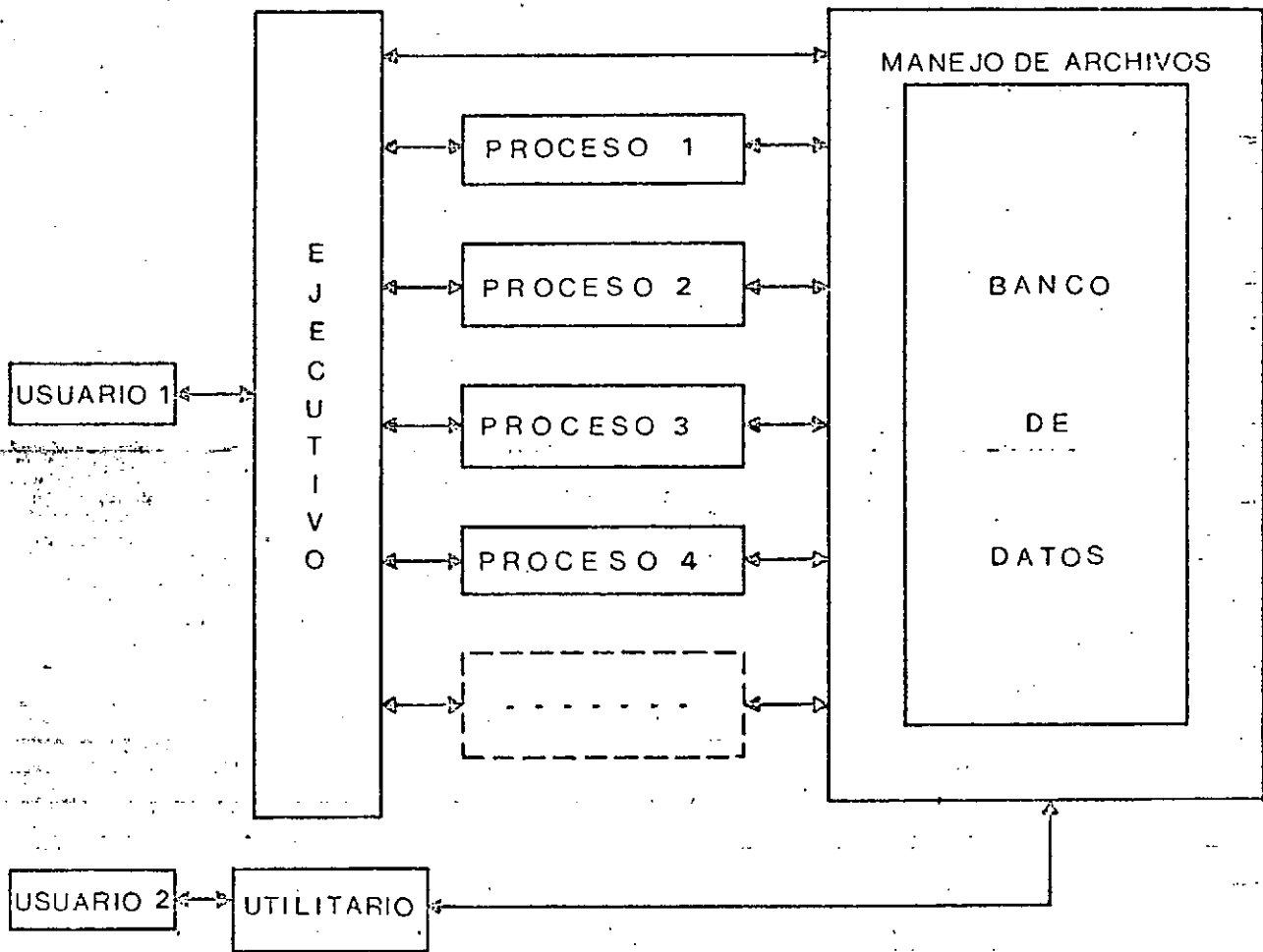


Figura 7: Esquema de la estructura del modelo

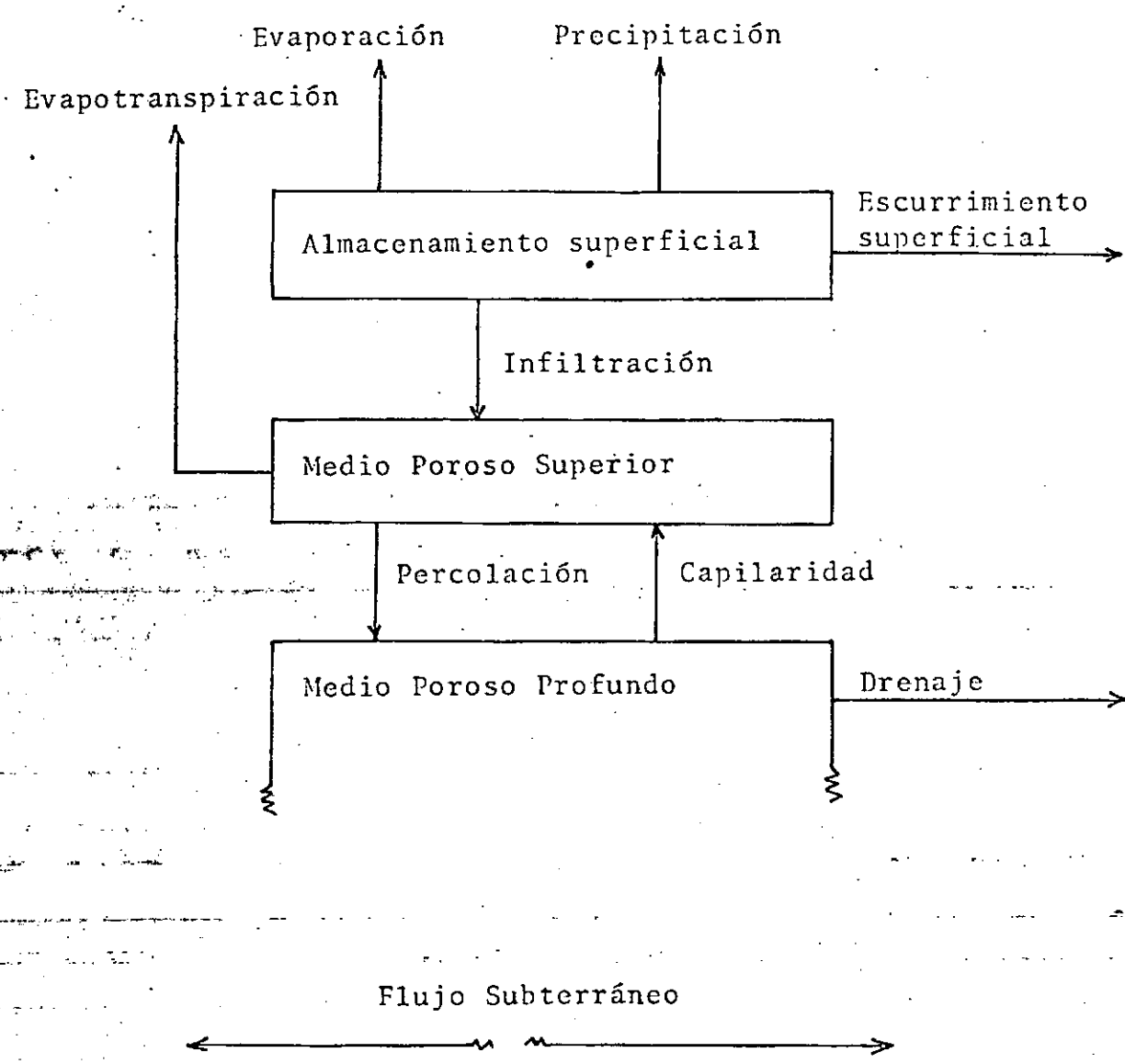


Figura 8

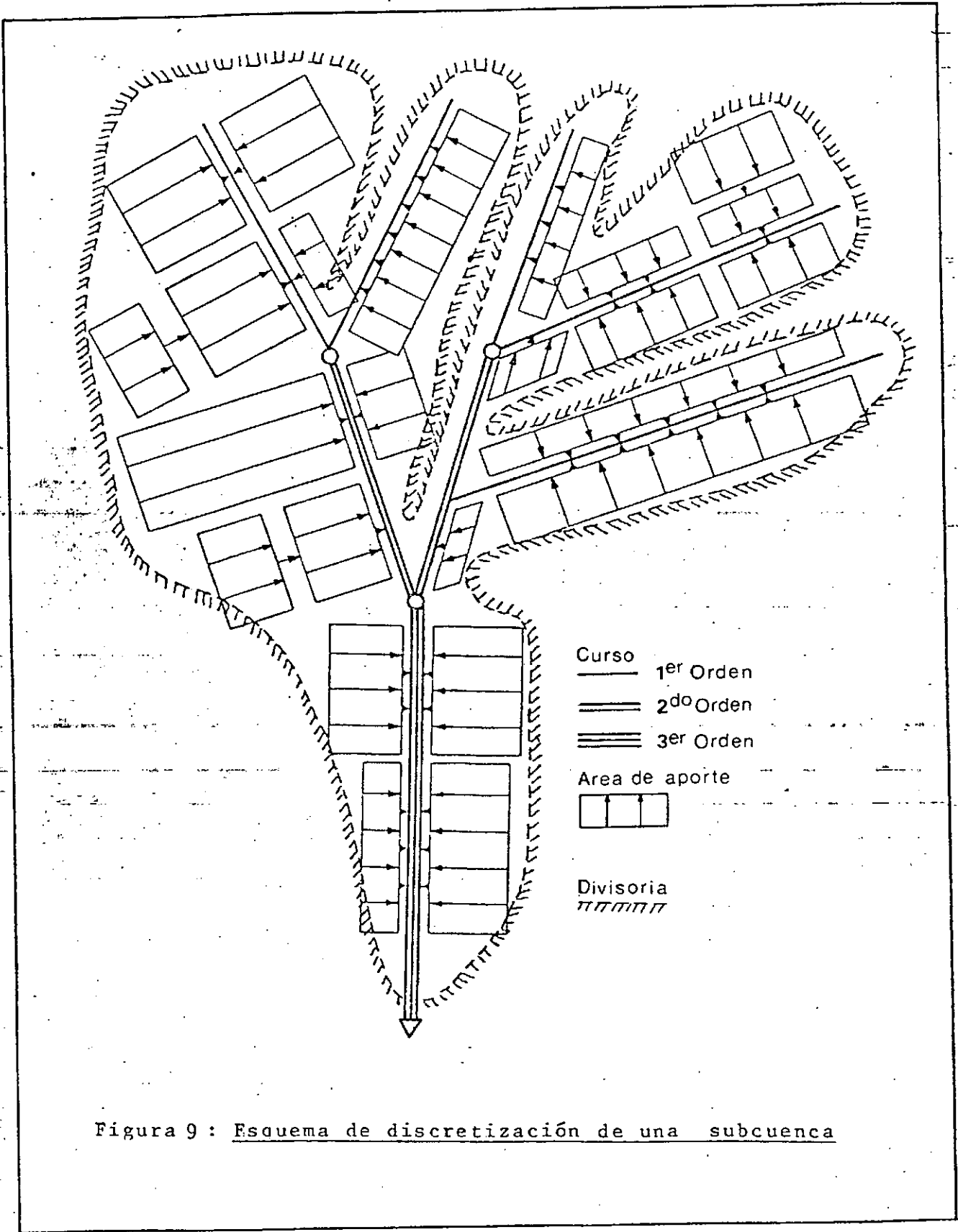
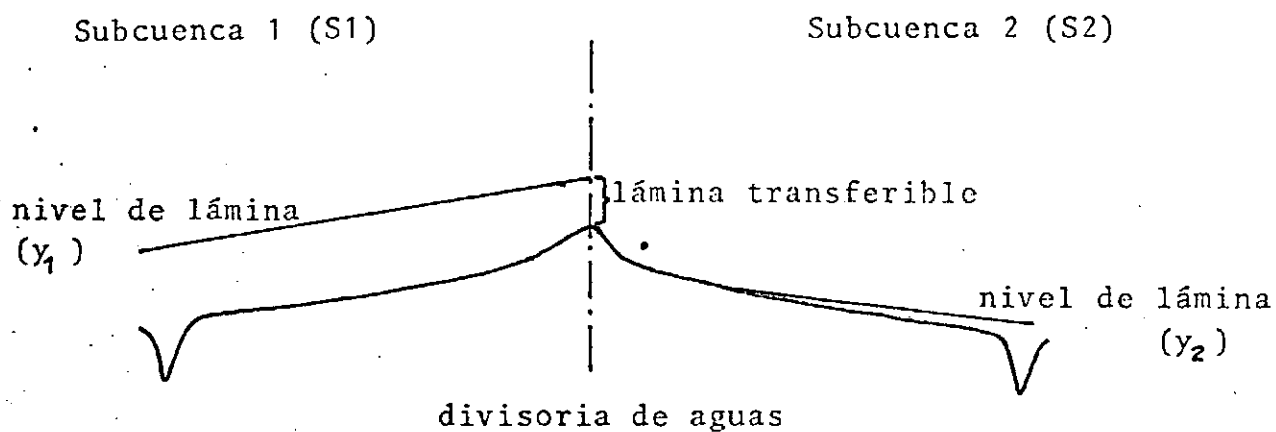
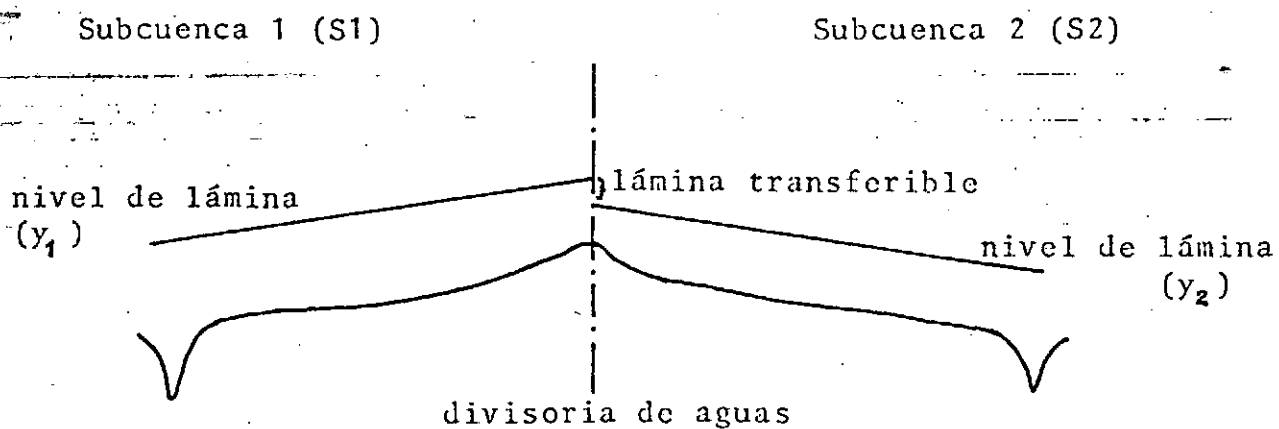


Figura 9 : Esquema de discretización de una subcuenca

Figura 10aFigura 10b

4.3. Criterios de calibración

Un problema que merece especial consideración en el desarrollo de un modelo hidrológico es el de la calibración o estimación de los valores óptimos de los parámetros.

La determinación de los valores óptimos de quince o veinte parámetros en forma manual puede representar un esfuerzo formidable. El término manual se refiere al procedimiento de corrección de los valores de los parámetros en base al comportamiento del modelo. Eventualmente, los procedimientos manuales pueden conducir a un conjunto suficientemente bueno de parámetros. Sin embargo, este método demanda una cantidad considerable de horas hombre y requiere un nivel de interacción con la computadora que muchas veces es difícil de conseguir cuando se procesan grandes sistemas. Además de estos inconvenientes, el equipo que realiza la calibración debe poseer una considerable experiencia adquirida a través del uso del modelo.

Existen por otra parte, métodos automáticos de calibración en que un subsistema de optimización evalúa los cambios en los valores de los parámetros respecto a un funcional que representa la divergencia entre los resultados del modelo y los datos contra los que se los compara. Estos métodos son rápidos y simples de usar y por tanto económicos desde el punto de vista del uso de computadora.

Sin embargo, los métodos automáticos tienen algunas desven-

tajas, entre las que se pueden citar su dependencia de una función de error construída en general en base a un único criterio, la dificultad en progresar hacia el óptimo en regiones en que el gradiente de la superficie de respuesta es pequeño y el riesgo de que los parámetros tomen valores irreales desde el punto de vista hidrológico.

La experiencia indica que el procedimiento de calibración debe integrar ambos métodos, compensando así los puntos fuertes y débiles de uno y otro.

Un punto crítico en calibración es la selección de los procesos de los que se requieren respuestas más precisas. Normalmente, no es posible representar con igual precisión las respuestas del modelo a todos los procesos involucrados en la simulación de un determinado fenómeno. Es entonces necesario definir con cuidado cuáles son los de mayor significación para evaluar respecto a ellos el resultado de la simulación.

En la región en estudio, se pueden identificar algunas situaciones características que implican otros tantos criterios de calibración. Estas son:

- 1- Sequías.
- 2- Inundaciones en la región pedemontana y periferia de la zona deprimida.

3.- Inundaciones en la zona deprimida.

Las situaciones de sequía se identifican por el descenso de la humedad del suelo por debajo de niveles considerados críticos, por el área que afectan y por su duración. El parámetro fundamental en este caso es el nivel crítico de humedad del suelo y las variables de contraste son el área afectada y la duración de la situación crítica.

Si bien no existe información cuantitativa de humedad del suelo, se puede recuperar información semicuantitativa y cualitativa relativa al área afectada por una sequía y a su duración de fuentes tales como los informes de situación de la secretaría de Agricultura, el Ministerio de Asuntos Agrarios, INTA y la Bolsa de Cereales, e información de la prensa local.

En la región pedemontana y periférica de la zona deprimida, el efecto perjudicial de las inundaciones proviene del desplazamiento de una masa de agua y el área que afecta. En principio no se piensa que sea relevante en esta zona la duración de la inundación, ya que por las pendientes de la región, el desplazamiento debiera ser razonablemente rápido y la duración de unos pocos días. Se supone por lo tanto, que no hay efectos perjudiciales atribuibles a la permanencia de la situación.

La variable de contraste en este caso, es el caudal registrado en las secciones de aforo que en esa región es razo-

nablemente confiable o, por lo menos, se puede reconstituir con suficiente aproximación a la realidad.

En la zona deprimida el perjuicio causado por las inundaciones se puede evaluar en términos de área afectada y de duración de esa situación, ya que por los tiempos característicos de permanencia, resulta poco relevante la altura de la lámina de agua.

En esta región de la cuenca por otra parte, la información sobre escurrimiento es escasa y ha sido evaluada en condiciones sumamente difíciles, lo que atenta contra la confiabilidad de la misma.

Dada esa circunstancia el contraste de los resultados de la simulación puede hacerse en este caso de modo similar al propuesto para sequías, haciendo uso de información de organismos regionales y prensa local con el agregado de información provista por imágenes de satélites de la serie LANDSAT. Estas imágenes se toman en siete bandas de longitud de onda distintas que se recomponen para destacar características específicas del terreno. La frecuencia de paso de los satélites es cada 18 días, por lo que se pueden obtener imágenes seriadas que muestren el desplazamiento de la línea de agua.

Para la calibración del modelo se elegirán situaciones dentro de una gama que cubra la amplitud de los fenómenos a simular, y el conjunto de parámetros óptimos obtenido para cada situación característica será verificado con fenómenos

pertenecientes a la misma categoría.

Identificación de los parámetros del sistema

Debido a la complejidad del tema, se ofrecerá aquí sólo una descripción sucinta del problema y una enumeración de los métodos de solución existentes.

La Figura 11 muestra esquemáticamente el sistema hidrológico real y su relación con el modelo.

El sistema real (desconocido) está dado por:

$$\underline{x}_{t+1} = \Phi (\psi, \underline{u}_t, \underline{x}_t, t)$$

donde

\underline{u} vector de perturbaciones

\underline{x} vector de estado

ψ vector de parámetros

Φ estructura del sistema

El modelo por otra parte está dado por:

$$\hat{\underline{x}}_{t+1} = \Psi (\psi, \underline{u}_t, \hat{\underline{x}}_t, t)$$

siendo $\hat{\underline{x}}$ la estimación de \underline{x} cuando se emplea el modelo Ψ con el vector de parámetros ψ , el cual no necesita ser de la misma dimensión de ψ .

Para evaluar el ajuste es necesario definir un indicador de performance $J(k)$ como una función escalar de \underline{x} y $\hat{\underline{x}}$, por ejemplo:

$$J(k) = \sum_t (\underline{x}_t - \hat{\underline{x}}_t)^T (\underline{x}_t - \hat{\underline{x}}_t)$$

donde:

k número de iteración

Se han desarrollado numerosos algoritmos para la identificación de parámetros y será necesario realizar un análisis extenso de los mismos para seleccionar el mas apropiado al modelo propuesto.

En forma indicativa se enumeran los siguientes:

- 1- Regresión secuencial multiparamétrica
- 2- Aproximación estocástica
- 3- Identificación secuencial
- 4- Cuasi-linearización
- 5- Invariant imbedding
- 6- Identificación predictiva
- 7- Identificación aleatoria
- 8- Filtros de Kalman

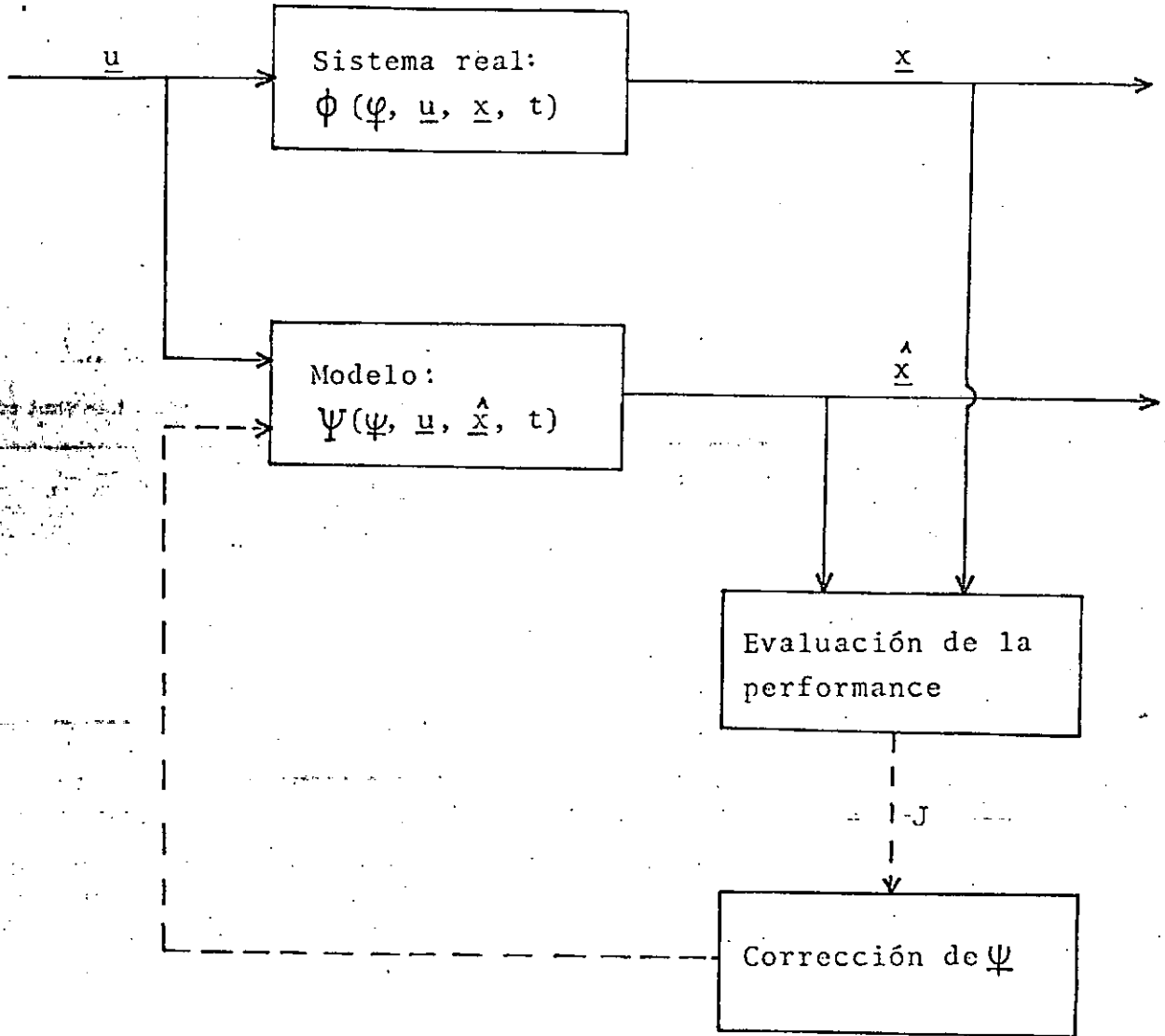


Figura 11

5.1- Listado de tareas

La duración de la segunda etapa se estima en 18 meses. Atendiendo a las necesidades operativas del EZDS, se proveerá de resultados a nivel de subcuenca desde el sexto mes de desarrollo del trabajo. El orden de tratamiento de las subcuencas será convenido con el EZDS teniendo en cuenta la disponibilidad de la información, con la salvedad que la zona deprimida deberá ser la última en calibrarse. Esto se debe a las dificultades para su tratamiento y a la necesidad de contar previamente con la simulación de las subcuencas.

A continuación se enumeran las tareas a realizar durante el desarrollo del estudio.

1- Análisis de la información

1- Meteorología

- 1- Análisis de las series de datos meteorológicos
- 2- Selección de sequías
- 3- Selección de tormentas
- 4- Análisis de las características de tormentas
- 5- Análisis de eventos extremos

2- Hidrología

- 1- Análisis de las series hidrológicas relevantes para las situaciones seleccionadas
- 2- Definición de subcuenca y criterios de discretización
- 3- Colección de información para calibración

1980

- 1- Información periodística
- 2- Imágenes satelitarias
- 4- Actualización de la información sobre el acuífero freático.
- 5- Definición del criterio de discretización del acuífero
- 6- Evaluación de los parámetros de la ecuación de momento (a, m) para escurrimiento superficial y canales
- 7- Evaluación de los parámetros de transferencia entre subcuencas (α , β).

3- Edafología

- 1- Determinación de los parámetros hidrológicos del estrato no saturado del perfil
 - 1- Capacidad de infiltración
 - 2- Curva de tensión de retención de agua

2- Formulación e implementación del Modelo Matemático

1- Sistema de archivos

- 1- Diseño de la estructura de la información
- 2- Subsistema de manejo de archivos

2- Sistema de tratamiento de la información

- 1- Tratamiento estadístico
- 2- Detección y corrección de errores

3- Generación y desagregación de series

4- Modelos de simulación

- 1- Sequías

2- Inundaciones

3- Identificación de parámetros

3- Operación del Modelo Matemático

1- Sequías

2- Subcuencas de la periferia de la ZDS

3- Zona Deprimida del Río Salado

4- Simulación del comportamiento de la cuenca bajo acciones correctivas

4- Elaboración de informes parciales y final

Nota: Para la elaboración del plan de trabajo se supuso que estará a disposición del estudio toda la información existente en el EZDS.

5.2- Cronograma de tareas

Trimestre Tarea	1	2	3	4	5	6
1 1 1						
1 1 2						
1 1 3						
1 1 4						
1 1 5						
1 2 1						
1 2 2						
1 2 3						
1 2 4						
1 2 5						
1 2 6						
1 2 7						
1 3 1						
2 1 1						
2 1 2						
2 2 1						
2 2 2						
2 3 0						
2 4 1						
2 4 2						
2 4 3						
3 1 0						
3 2 0						
3 3 0						
3 4 0						
4 0 0						

5.3- Informes parciales y final

Los informes se estructurarán en tres volúmenes dedicados respectivamente a:

Vol. 1- Análisis de la información.

Vol. 2- Formulación e implementación del Modelo Matemático.

Vol. 3- Operación del Modelo Matemático.

Trimestralmente se emitirán informes parciales con el detalle del avance alcanzado en cada tarea. En lo posible, se tratará que la organización de los mismos sea aditiva, de modo que el informe final sea la compilación de los informes parciales más las conclusiones y recomendaciones finales.

En particular, el Volumen 1 contendrá la información analizada y los resultados del análisis, tales como secuencias de sequías extremas, tormentas de baja probabilidad de recurrencia, homogeneidad de los campos sinópticos, parámetros estadísticos de las series hidrológicas, etc.

El Volumen 2 estará integrado por el desarrollo teórico de los procesos implementados y el manual de operación del Modelo.

El Volumen 3 incluirá los valores óptimos de los parámetros de cada subcuencia y modelo para las situaciones simuladas, pruebas de la bondad del ajuste logrado, sensibilidad del

Modelo respecto a los parámetros de calibración y discusión del comportamiento de la cuenca.

Con el Informe Final se entregará la versión operativa del modelo en soporte magnético conveniente.

5.4- Personal

El personal afectado al estudio será el siguiente

1- De la planta técnica del INCYTH

<u>Nombre</u>	<u>Especialidad</u>	<u>Función</u>
Dr. Ruben M. Vallojos	Hidrología	Dirección
Ing. Marcos M. Elinger	Hidrol.-Mod.Mat.	Dirección Ejecutiva
Ing. Martín L. Correa	Agronomía	Edafología
Dra. Dora Goniadzki	Física	Modelo Matemático
Lic. Elena J. Martinez	Matemática	Modelo Matemático
Dr. Mario N. Nuñez	Meteorología	Hidrología
Dr. Walter M. Vargas	Meteorología	Hidrología
Srta. María N. Capurro	Administración	Secretaría

2- A contratar

<u>Especialidad</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Función</u>
Tec. Hidrología	1	Hidrología
Geólogo	1	Hidrología
Analista de Sistemas	2	Modelo Matemático
Dibujante	1	General
Administrativo	1	Administración
Secretaria	1	Secretaría

3- Expertos

1- Locales

Se ha tomado contacto con el Doctor Javier Ulibarrena de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la UNLP como experto en geomorfología e interpretación de fotografías de satélites. El período de contratación será de 3 meses distribuidos en la duración del estudio.

Se ha tomado contacto con el Ing. Victor Pochat como experto en hidrología. El período de contratación será de 5 meses distribuidos en la duración del estudio.

2- Internacionales

Para el Modelo Matemático se contratarán los servicios del Doctor John C. Schaake, Subdirector de la National Oceanic and Atmospheric Administration (USA). El período de contratación será de un mes distribuido en tres visitas en la duración del estudio.

Para Hidrología de Llanuras Inundables se contratarán los servicios del Doctor Gregori Kovacs del Departamento de Investigaciones Hídricas de Hungría. El período de contratación será de un mes distribuido en tres visitas en la duración del estudio.

4- Tareas de campaña

1- Hidrología

Las tareas de relevamiento de información hidrológica se contratarán con empresas especializadas.

2- Edafología

Los estudios de suelos complementarios se contratarán con la cátedra de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNLP.

Con el objeto de que el CFI y la Provincia de Buenos Aires dispongan de personal capacitado para la operación del Modelo a la terminación del estudio, se recomienda que se integren al equipo de trabajo uno o dos técnicos durante los últimos dos trimestres del programa, a fin de recibir el adecuado entrenamiento.

- 1- Provincia de Buenos Aires - Consejo Federal de Inversiones.
Estudio de la Zona Deprimida del Río Salado - Informe Final
(1a. Etapa).
La Plata, 1980.
- 2- Provincia de Buenos Aires - Consejo Federal de Inversiones.
Estudio de la Zona Deprimida del Río Salado - Informes inter
nos.
La Plata, 1978-1980.
- 3- D. Zanobetti y H. Lorgeré
Le Modèle Mathématique du Delta du Mékong.
La Houille Blanche - N° 1, 4, 5, 1968.
- 4- John C. Schaake, Jr.
Modelos Determinísticos Lluvia - Escorrentía.
INCYTH - Escuela de Ingeniería Hidráulica, Buenos Aires, 1978.
- 5- Marcos M. Elinger, Elena J. Martínez
Sistema Generalizado de Simulación Hidrológica.
INCYTH, Buenos Aires, 1980 (en prensa).
- 6- M. M. Elinger, B. M. Harley, J. C. Schaake, J. B. Valdés,
G. J. Vicens.
A Model for the Detailed Simulation of River Basin Hydrologic
Processes and for Water Resources Systems Evaluation.
Massachusetts Institute of Technology - Department of Civil
Engineering, Report N° T76-5, 1973.
- 7- R. T. Clarke
Mathematical Models in Hydrology.
FAO, Roma, 1973.

- 8- Peter S. Eagleson
Dynamic Hydrology.
Mc Graw-Hill, 1968.
- 9- D. J. Gunaratman y Frank E. Perkins
Numerical Solution of Unsteady Flow in Open Channels.
Massachusetts Institute of Technology - Department of Civil
Engineering, Report N° 127, 1970.
- 10- Vijay P. Singh
Hybrid Formulation of Kinematic Wave Models of Watershed
Runoff.
Journal of Hydrology, 27, 1975.
- 11- B. S. Massey
Mechanics of fluids.
Van Nostrand Co, 1968.
- 12- Daniel Graupe
Identification of Systems.
Van Nostrand Co, 1972.
- 13- T.C. Hsia
System Identification.
Lexington Books, 1977.
- 14- Andrew P. Sage y James L. Melsa
System Identification.
Academis Press, 1971.
- 15- George N. Saridis
Comparison of Six On-line Identification Algorithms.
Automatica, Vol. 10, 1974.

16- R. Iserman et al

Comparison of Six On-line Identification and Parameter
Estimation Methods.

Automatica, Vol. 10, 1974.