



# **SISTEMAS DE APOYO A LA GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Autor:

**OSCAR RAUL DÖLLING**

Universidad Nacional de San Juan  
e-mail : [odolling@unsj.edu.ar](mailto:odolling@unsj.edu.ar)

Tesis presentada a la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, para optar al grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Financiado por Universidad Nacional de San Juan con fondos del Programa FOMEC – proyecto: 261/95-06.

Profesor Supervisor:

**EDUARDO VARAS CASTELLÓN**

Pontificia Universidad Católica de Chile

**Santiago de Chile, Enero, 2001**

**ISBN 92-9089-072-X**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

---

# **SISTEMAS DE APOYO A LA GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**OSCAR RAUL DÖLLING**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**EDUARDO VARAS C.**

**PEDRO HIDALGO**

**BONIFACIO FERNANDEZ**

**JAVIER PINTO**

**BASILIO ESPÍLDORA**

**GUSTAVO DÍAZ**

Para completar las exigencias del grado académico  
de Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Enero, 2001

Dedicada a mi amada esposa Lili, por su sostén inagotable y su entrega incondicional, a mis queridos hijos Esteban, Lucía, Diego y Laurita por su tierno amor y paciencia, a mis queridos padres y suegros quienes entregaron su apoyo en los momentos más difíciles. A mi querida abuela Antonia por su inconmensurable amor y preocupación. A mi añorado tío Nato quien me enseñó a ser fuerte aún en la más terrible adversidad. A todos mis hermanos que me estimularon a seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Mi mas profundo y sincero agradecimiento al Director de esta Tesis profesor Don Eduardo Varas Castellón, por su inestimable e incansable apoyo, su rectitud de trato, su guía permanente, su juicioso diálogo y su contagioso optimismo durante todo el desarrollo de esta Tesis.*

*Agradezco al profesor Daniel O. Coria Jofré del Departamento de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Juan, por su apoyo constante y a través suyo al Programa de formación docente F.O.M.E.C. por el aporte de los recursos que permitieron realizar mis estudios de doctorado. Un reconocimiento especial al profesor Orlando Graziani quien me inició en el camino de la investigación y de la búsqueda del conocimiento profundo.*

*A los profesores Bonifacio Fernández, Bernardo Domínguez, Javier Pinto, Miguel Nussbaum, y Lyonel Sotomayor, de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, les agradezco por su generoso aporte de conocimientos durante el desarrollo de esta Tesis.*

*Se agradece a las siguientes entidades nacionales: Unidad de Información Hidrometeorológica de la Universidad Nacional de San Juan, Centro Regional de Aguas Subterráneas (actual INA) y provinciales: Sección Hidrología del Departamento de Hidráulica, Departamento de Drenaje de la Dirección de Planificación de Obras hidráulicas y Subsecretaría de Recursos Energéticos, por los datos proporcionados a esta investigación.*

*Al personal del Departamento de Hidráulica de la provincia de San Juan en especial al ingeniero Joaquín Riveros y al personal de la Dirección de Planificación de Obras Hidráulicas, les agradezco la información proporcionada, así como las interesantes conversaciones mantenidas acerca del comportamiento del Sistema Hídrico de la cuenca del río San Juan, necesaria para la modelación matemática de la cuenca.*

*Un reconocimiento especial al personal del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile que de una u otra forma colaboraron en la edición de este informe de Tesis.*

## INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE DE TABLAS .....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN .....	xii
I. INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ALCANCES .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos y alcances del trabajo .....	3
1.3 Contenido del presente Estudio .....	6
II. ANTECEDENTES .....	8
2.1 Sistemas de Apoyo a la Gestión existentes .....	8
2.2 Simulación continua de Sistemas Hídricos complejos. ....	14
2.3 Redes Neuronales Artificiales .....	17
2.4 Métodos de Optimización en la gestión de los recursos hídricos. ....	28
2.5 Evaluación de Fallo de un Sistema de Administración de Recursos Hídricos .....	32
2.6 Sistema de Apoyo a la Gestión de Recursos Hídricos basado en reglas.....	34
2.6.1 Diseño de reglas de operación deterministas en sistemas hídricos complejos.....	41
2.6.2 Parametrización de reglas.....	43
2.6.3 Optimización de reglas de operación en sistemas hídricos complejos.....	44
2.6.4 Valoración e introducción de restricciones operativas .....	47

III.	GESTIÓN DE UN SISTEMA HÍDRICO MULTIPROPÓSITO.....	49
3.1	Introducción.....	49
3.2	Antecedentes del Método .....	52
3.3	Esquema Conceptual del Método .....	53
3.4	Descripción del Método .....	55
3.5	Método de elaboración de redes neuronales artificiales .....	58
3.6	Utilización conjunta de métodos de simulación heurística y métodos de optimización .....	67
3.7	Diseño de Funciones Objetivo Dinámicas.....	69
3.8	Implementación del proceso de búsqueda de soluciones.....	73
IV.	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE APOYO A LA GESTIÓN .....	84
4.1	Introducción.....	84
4.2	Interfaz usuario del SARH-2000 .....	88
4.2.1	Interfaz de Nivel I.....	90
4.2.2	Interfaz de Nivel II .....	92
4.2.3	Interfaz de Nivel III.....	98
4.3	Búsqueda de los parámetros de Gestión óptimos .....	109
V.	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GESTIÓN AL SISTEMA HÍDRICO DEL RÍO SAN JUAN-ARGENTINA .....	111
5.1	Introducción.....	111
5.2	Planteamiento del Problema .....	111
5.2.1	Descripción Física del Sistema .....	112
5.2.2	Diagnóstico de la situación actual .....	116
5.2.3.	Esquema conceptual del aprovechamiento hídrico integral del Río San Juan.....	118
5.3	Etapa de Medición del Sistema .....	119
5.4	Etapa de análisis de datos.....	121
5.4.1.	Caracterización de la cuenca de aporte de aguas superficiales.....	121
5.4.2	Elementos de almacenamiento y distribución de agua superficial.....	122
5.4.3	Interacción de la cuenca subterránea del valle de Tulúm con el río y los sistemas de extracción y drenaje .....	126
5.4.4	Caracterización de la zona bajo riego.....	127

5.4.5	Caracterización de la oferta de agua.....	130
5.4.6.	Caracterización de las demandas de agua.....	130
5.5	Modelado del Sistema .....	134
5.5.1	Supuestos del Modelo de Simulación Continua .....	134
5.5.2.	Módulos del Modelo de Simulación.....	145
5.5.3	Red Neuronal para el pronóstico de aportaciones mensuales .....	158
5.5.4	Modelo de red neuronal para la estimación de índices de Fallo del sistema .....	167
5.5.5	Optimización de la gestión .....	174
5.6	Síntesis del Sistema .....	180
5.6.1.	Utilización de la interfaz usuario como herramienta de diseño y aprendizaje .....	180
5.6.2	Utilización de la interfaz usuario como herramienta de evaluación y análisis de alternativas de gestión .....	186
VI.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	196
6.1	Conclusiones.....	196
6.2	Trabajos Futuros.....	200
VII	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	202
 A N E X O S		
ANEXO A – Mapas		
Mapa A-1	.....	213
Mapa A-2	.....	214

ANEXO B – Tablas

Tabla B-1: Volúmenes de escurrimiento mensual cuenca río San Juan. Estación Km 47.3 ..... 216

Tabla B-2 : Superficies Anegadas en el Valle de Tulúm - San Juan Argentina (por Departamentos) ... 220

ANEXO C- Redes Neuronales Artificiales - Método Backpropagation .....



## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II.1: Reglas generales para manejo de embalses en serie .....	39
Tabla II.2: Reglas generales para manejo de embalses en paralelo.....	40
Tabla III.1: Metodología de Análisis de Sistemas.....	54
Tabla III.2: Estadísticos utilizados para la comparación de modelos .....	65
Tabla V.1: Volúmenes mensuales de Demanda .....	132
Tabla V.2: Pesos relativos asignados a cada propósito dentro del sistema de aprovechamiento de agua (columna 2) y pesos relativos de las medidas de efectividad usadas para evaluar la probabilidad, magnitud y capacidad de recuperación de fallo (columna 4) para los cinco propósitos evaluados en el Sistema del Río San Juan en el ejemplo 1 .....	175
Tabla V.3: Cuantificación de errores y medidas de dispersión para el ejemplo 1 .....	177
Tabla V.4: Pesos relativos asignados a cada propósito dentro del sistema de aprovechamiento de agua (columna 2) y pesos relativos de las medidas de efectividad usadas para evaluar la probabilidad, magnitud y capacidad de recuperación de fallo (columna 4) para los cinco propósitos evaluados en el Sistema del Río San Juan en el ejemplo 2 .....	178
Tabla V.5: Cuantificación de errores y medidas de dispersión para el ejemplo 2.....	180

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Esquema de red neuronal multicapa completamente conectada (una capa de entrada, dos capas ocultas y una capa de salida) con arquitectura ANN(13,10,10,1).....	19
Figura 2.2: Esquema de Neurona Artificial con función de activación Sigmoide (las flechas indican el sentido del flujo de los datos) .....	21
Figura 2.3: Red neuronal artificial feedforward (capas ocultas a,b,c,d) (capa de salida z).....	23
Figura 2.4 : Arquitectura de DSS según Guariso y Werthner (1989) .....	35
Figura 3.1: Pirámides de jerarquía para un sistema de control .....	50
Figura 3.2: Fases de elaboración de un ANNS para predicción hidrológica .....	60
Figura 3.3: Implementación del proceso de búsqueda de soluciones.....	75
Figura 3.4. Árbol de decisiones en un análisis basado en riesgo .....	78
Figura 4.1: Arquitectura del ambiente SARH-2000.....	85
Figura 4.2: Interfaz Usuario sistema SARH-2000- pantalla inicial.....	89
Figura 4.3: Interfaz Usuario sistema SARH-2000- Base de Herramientas .....	91
Figura 4.4: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de simulación Extend .....	92
Figura 4.5: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de simulación de redes neuronales .....	93
Figura 4.6: Sistema SARH-2000- Sub.Entorno de análisis estadístico SPSS .....	94
Figura 4.7: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de análisis estadístico Statgraphics DOS .....	95
Figura 4.8: Sistema SARH-2000- Sub-entorno Optimización en VBA-Excel.....	96
Figura 4.9: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de ajuste de curvas Curve-Expert 1.3 .....	97
Figura 4.10: Sistema SARH-2000- Sub-entorno generador de reportes (Word). .....	98
Figura 4.11: Sistema SARH-2000- Interfaz Aplicación Extend .....	99
Figura 4.12: Sistema SARH-2000- Pantallas de Visualización de variables Extend .....	102

Figura 4.13:	Sistema SARH-2000- Interfaz modelo optimización Excel .....	103
Figura 4.14:	Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel-Panel de Usuario .....	105
Figura 4.15:	Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel-Función Objetivo .....	107
Figura 4.16:	Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel-Red Neuronal .....	108
Figura 5.1:	Diagrama del sistema físico futuro del río San Juan .....	114
Figura 5.2:	Red de Canales principales y secundarios Valles de Tulúm, Ullúm y Zonda. Provincia de San Juan – Argentina.....	115
Figura 5.3:	Bloque de reglas operativas del embalse Caracoles .....	137
Figura 5.4:	Bloque de reglas operativas del Embalse Punta Negra.....	138
Figura 5.5:	Bloque de reglas operativas del embalse Ullúm.....	139
Figura 5.6:	Esquema de Entrada y salida de datos del Modulo embalse2 .....	147
Figura 5.7:	Esquema de Distribución de agua a Red de Riego y operación del Sistema de Bombeo.....	150
Figura 5.8-1:	Modelo de pronóstico de superficie de anegamiento .....	153
Figura 5.8-2:	Volumen de Anegamiento (estrato 0 a 1m.) en distintos instantes de observación.....	154
Figura 5.9:	Algoritmo de cálculo de índices de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad.....	156
Figura 5.10:	Curvas de entrenamiento del set de validación para distintos parámetros de aprendizaje del método backpropagation momentum .....	160
Figura 5.11:	Curvas de error para el modelo ANN 27 20-7 (sin ENOS) y ANN 30-20-7 (con ENOS) para distintos ciclos de entrenamiento .....	163
Figura 5.12:	Diagrama de dispersión de valores de volúmenes de escurrimiento observados y pronosticados, escalados (0 a 0,7) para la red ANN 30-20-7 (con ENOS) entrenada con 4000 ciclos .....	164

Figura 5.13:	Funciones de Autocorrelación Simple (FAS) y de Auto-correlación parcial (FAP) de la serie de residuos. Calculadas con la aplicación SPSS incluida en el sistema Los límites de confianza indican el 95% de probabilidad de que la serie sea considerada un proceso de ruido blanco.....	165
Figura 5.14:	Gráfico de 17 patrones (Julio a Enero) de Volúmenes de escurrimiento observados comparados con los mismos valores calculados con la red ANN 30-20-7 (con ENOS) entrenada con 4000 ciclos .....	166
Figura 5.15:	Nomenclatura de los diagramas de dispersión de la Figura 5.16.....	171
Figura 5.16:	Diagramas de Dispersión de Índices de Fallo entre modelo ANN y Extend .....	172
Figura 5.17:	Análisis cuantitativo de los diagramas de dispersión de los indicadores de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para los distintos usos del agua. (Los nombres de las columnas siguen la nomenclatura de la Figura 5.15).....	173
Figura 5.18:	Diagrama de dispersión que compara la Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.) calculada por la red neuronal ANN 5-10-10-15 (ordenadas) y el modelo de simulación del Sistema Hídrico del Río San Juan desarrollado en Extend (abcisas) .....	176
Figura 5.19:	Diagrama de dispersión que compara la Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.) calculada por la red neuronal ANN 5-10-10-15 (ordenadas) y el modelo de simulación del Sistema Hídrico del Río San Juan desarrollado en Extend (abcisas), para el ejemplo 2 .....	179
Figura 5.20:	Diagrama de Fallas en el suministro de agua.....	182
Figura 5.21:	Estado de la cota del embalse Quebrada de Ullum en función del tiempo .....	183
Figura 5.22:	Estado del volumen acumulado en el acuífero en función del tiempo.....	184
Figura 5.23:	Volúmenes extraídos del acuífero en función del tiempo.....	184
Figura 5.24:	Volumen entregado al sector energético en función del tiempo .....	185
Figura 5.25:	Volúmenes almacenados en los embalses Caracoles, Punta Negra y Ullum durante 330 meses de simulación .....	186
Figura 5.26:	Evolución temporal del valor de resiliencia del sector riego para 2 reglas de descarga distintas de los embalses en serie Caracoles-Punta Negra-Ullum.....	187
Figura 5.27:	Variación de la Resiliencia del propósito Riego, en función de los parámetros de las reglas de operación del embalse caracoles (bC) y del embalse de Ullum (bUII). Observar que el parámetro bPN del embalse Punta Negra se mantiene fijo .....	188

Figura 5.28:	Diagramas de Resiliencia del sector de riego para un horizonte de planificación de 323 meses en función de los parámetros de las reglas de descarga CC(Caracoles) CPN (Punta Negra) y CU (Ullum) .....	190
Figura 5.29	Representación de los Indices de Ocurrencia de Fallo, Resiliencia y Vulnerabilidad para los cinco propósitos analizados en el Sistema Hídrico del Río San Juan .....	193

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL**

**SISTEMAS DE APOYO A LA GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**Tesis enviada a la Dirección de Investigación y Postgrado en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería**

**OSCAR RAÚL DÖLLING**

## **RESUMEN**

En esta Tesis se formuló un sistema de apoyo para la gestión de sistemas hídricos complejos. Se presentan las etapas de elaboración de los modelos matemáticos y las herramientas de análisis necesarias para la aplicación de una metodología de gestión de sistemas de múltiples embalses, múltiples usos y sistemas de distribución temporal y espacial de agua. El sistema computacional desarrollado es capaz de simular distintas alternativas de operación del sistema hídrico y predecir los resultados de la implementación de ciertas acciones en el sistema a largo plazo; sugerir al usuario políticas de operación óptimas; explorar los efectos de las políticas alternativas introducidas al sistema y evaluar e identificar ineficiencias o fallas del sistema bajo distintos escenarios de oferta y demanda de agua.

Se hizo una revisión de los antecedentes en materia de sistemas computacionales existentes, técnicas de simulación, redes neuronales, optimización y reglas de operación

aplicados a sistemas hídricos complejos. Se desarrolló un sistema computacional, (SARH-2000) que integra herramientas de simulación continua, redes neuronales artificiales, análisis estadístico y optimización para apoyar las decisiones de gestión en cuencas con sistemas hídricos multipropósito provistos de sistemas complejos de distribución y almacenamiento de agua. El sistema SARH-2000 resuelve problemas de diseño de sistemas hídricos y apoya en la evaluación de tareas de operación de corto plazo y en la formulación de políticas de gestión a mediano y largo plazo.

En la fase de planificación estratégica de cuencas con sistemas de regulación, esta investigación utilizó los conceptos de **ocurrencia de fallo** (frecuencia), **resiliencia** (duración y capacidad de recuperación de un estado de fallo) y **vulnerabilidad** (severidad o magnitud del fallo) como índices de la evaluación de los distintos propósitos del sistema, e introdujo un concepto de indicador global del sistema, el cual combina en forma ponderada el efecto de dichos índices en una única Medida de Efectividad Global del Sistema (**M.E.G.S.**).

La revisión de las reglas de operación incluye temas relacionados con el diseño y obtención de reglas para un sistema de recursos hídrico complejo. Se analizan en particular, las reglas determinísticas parametrizables, que permiten estudiar una franja de operación factible, creada por un conjunto de restricciones impuestas a los elementos de regulación y control de almacenamiento y distribución de agua presentes en el sistema.

Se describe la metodología de análisis de sistemas, abordándose conceptos de simulación de procesos y de optimización no lineal, también se discuten algunos conceptos relativos a redes neuronales artificiales del tipo feedforward y se detallan conceptos sobre el método de entrenamiento backpropagation momentum.

En el capítulo V se presenta la aplicación de la metodología propuesta al sistema de recursos hídricos de la cuenca del río San Juan, Argentina, sistema compuesto por tres embalses en cadena, centrales de generación de energía hidroeléctrica y elementos de distribución de agua para riego y extracción de agua del acuífero subterráneo, sirviendo como comprobación del funcionamiento básico de la metodología de gestión.

Los resultados de la metodología propuesta dependen del modelo de simulación utilizado, de los supuestos, del modelo de generación sintética de caudales, de la caracterización de la demanda, del diseño de las reglas de operación, del encapsulamiento del modelo de simulación en una red neuronal artificial, de la definición de los estados de fallo para cada propósito, de las medidas de efectividad utilizadas, de la ponderación de los propósitos, de los índices de evaluación de fallo y de las restricciones del modelo de optimización.

El trabajo se ha orientado al análisis de cada uno de estos factores, utilizando para ello el caso de estudio del río San Juan, obteniendo conclusiones del mismo y desarrollando criterios y métodos para la selección de los valores adecuados de los parámetros que intervienen en el proceso.

La integración de la metodología en el sistema de apoyo a las decisiones SARH-2000 se concretó en tres niveles, los dos primeros dedicados a usuarios del sistema que tengan por objetivo utilizar el sistema como herramienta de desarrollo y análisis de sistemas hídricos complejos (usuario analista) y un tercer nivel orientado conceptualmente al usuario encargado de la gestión de un sistema hídrico particular (usuario gestor), nivel que debe ser desarrollado por el usuario analista de acuerdo con los requerimientos del usuario gestor.

Los resultados de la aplicación de la metodología al caso del río San Juan establecen pruebas concluyentes relativas a la importancia de la simulación en el estudio de alternativas de gestión de sistemas hídricos con multipropósito; al potencial de la capacidad de las redes neuronales artificiales como modelos de pronósticos de volúmenes de escurrimiento en cuencas de respuesta no lineal; a la factibilidad de utilizar las redes neuronales como modelo encapsulador del comportamiento de modelos de simulación continuos complejos y al buen comportamiento de la red neuronal como elemento de conexión entre los modelos de simulación y de optimización; al aporte de la utilización de reglas de operación parametrizadas y al uso de índices de evaluación de fallo como elementos fundamentales en el apoyo a la toma de decisión de operación en la fase de explotación y como elementos de evaluación de alternativas de gestión en la fase de planificación del sistema hídrico.



**Miembros de la Comisión de Postgrado**

**Eduardo Varas C.**

**Bonifacio Fernández**

**Javier Pinto**

**Basilio Espíldora**

**Gustavo Díaz**

**Pedro Hidalgo**

**Santiago, Diciembre, 2000**

## **I. INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ALCANCES.**

### **1.1. Introducción**

La gestión de los recursos hídricos en cuencas de montaña debe afrontar una multiplicidad de problemas, entre los que se destacan el manejo de la oferta hídrica para aumentar la disponibilidad de agua en el tiempo y en el espacio; la gestión de la demanda para lograr la más alta eficiencia en la utilización del agua, las interacciones sectoriales con las actividades económicas; el equilibrio de la demanda de los diferentes sectores; la preservación de la integridad de los ecosistemas que dependen del agua y el control de los acuíferos de poca profundidad.

En este contexto, la gestión estratégica de sistemas hídricos puede enfocarse a la mitigación de eventos extremos como son las sequías o las crecidas hidrológicas o bien, a la mejor distribución temporal y espacial del agua en épocas de características hidrológicas normales. La ciencia busca hoy de realizar un aporte en el desarrollo de reglas dinámicas para manejar las variaciones hidrológicas y cumplir con determinados requerimientos definidos a priori por el encargado del manejo del sistema hídrico.

Debe destacarse que no existen reglas o estrategias de gestión universales para el manejo de los recursos hídricos, sin embargo algunas reglas son extrapolables a sistemas con topologías y propósitos similares. Lund y Guzmán, (1999); Morel-Seytoux, (1999); Belaineh et al, (1999); Sánchez Quispe, (1999) y Nalbantis y Koutsoyiannis (1997) entre otros, proponen una amplia gama de experiencias en el manejo de sistemas complejos que pueden utilizarse como ejemplos para adoptar reglas para un sistema particular.

Las reglas de operación *normal*, las reglas de operación *conservadora* y las reglas de operación *arriesgada* (Loucks et al, 1981); (Hashimoto et al, 1982); (Bayazit y

Ünal, 1990) son tres tipos de reglas deterministas que han sido frecuentemente estudiadas por diferentes autores para la gestión de sistemas hídricos complejos compuestos por múltiples embalses con objetivos múltiples. Sin embargo cualquier tipo de clasificación que se introduzca a las reglas de operación de los elementos de un sistema hídrico complejo no hace más que apartar cada vez más al modelo matemático de la realidad a representar. Para evaluar las consecuencias de la adopción de una determinada regla de un grupo de alternativas posible se deben poseer índices de evaluación de fallo del sistema asociados a cada alternativa de gestión.

Numerosos han sido los estudios realizados para definir un conjunto de reglas de operación óptimas para distintos sistemas de embalses (en serie o en paralelo) con múltiples propósitos. Sin embargo cuando los sistemas hídricos se tratan desde una perspectiva integrada al entorno de la cuenca donde están insertos, los esfuerzos por lograr una generalización de las reglas de gestión deben reemplazarse por la búsqueda de soluciones dinámicas que permitan adaptarse a los cambios que el sistema sufre en forma permanente. Es decir, todo sistema computacional rígido, definiendo como *rigidez* al grado de dificultad que presenta el sistema computacional de adaptarse fácilmente a la dinámica del sistema real y de su entorno, será una herramienta de aplicación limitada, en el mejor de los casos, a resolver alguna situación específica y puntual de la vida del sistema real.

Esta Tesis muestra el uso de la simulación continua y las redes neuronales artificiales para representar matemáticamente al sistema real y realizar un exhaustivo análisis de las alternativas de gestión a partir de la partición del sistema en procesos y subprocesos que interactúan en forma jerárquica, incluyendo las restricciones de operación y la parametrización de un subespacio de reglas de operación. Este esquema de análisis permite al gestor encontrar aquel conjunto de reglas de explotación que otorgue al sistema ciertas garantías, fijadas como objetivos de gestión, analizar su

capacidad de recuperación en situaciones de fallo y cuantificar las magnitudes y duraciones de dichos fallos.

En esta Tesis se estudió la aplicación de sistemas computacionales al desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la planificación a mediano y largo plazo de sistemas de aprovechamiento de agua en cuencas cordilleranas. Se elaboró una metodología de gestión y se ilustró su aplicación en una cuenca con un sistema complejo de administración del agua con problemas concretos asociados a la distribución actual de este recurso. Se eligió para ello a la cuenca del río San Juan, Argentina, que es un sistema caracterizado por tener propósitos múltiples, estar conformado por un conjunto de tres embalses en serie (dos en construcción), un sistema de riego superficial y un sistema de bombeo del agua del acuífero bajo el sistema de riego, destinado fundamentalmente a satisfacer las demandas de tres sectores distintos, que son agua potable e industrial, agua de riego y agua para hidroenergía, además de servir para fines de protección contra crecidas, control de anegamientos y satisfacer usos de recreación.

Se desarrolló un sistema de apoyo a las decisiones de gestión de un sistema a mediano y largo plazo que integra distintos sistemas computacionales y un sistema de control que define un ambiente donde el usuario pueda acceder ágilmente a cada uno de ellos.

## **1.2 Objetivos y alcances del trabajo**

El aporte más significativo que realiza esta Tesis en el campo de la gestión de los recursos hídricos, se concentra en el desarrollo de un procedimiento que potencia las posibilidades de búsqueda de soluciones, brindando al gestor de un sistema hídrico complejo una herramienta dinámica que le permita fácilmente personalizar tanto el problema como la búsqueda de la gestión óptima del sistema global.

Tal aporte se materializó a partir de la combinación estratégica de tres herramientas matemáticas y cuatro conceptos básicos, que ya han sido utilizados en forma separada por otros investigadores en el pasado. Las tres herramientas son la *simulación de procesos continuos*, las *redes neuronales artificiales* y los *métodos de optimización*. Los cuatro conceptos son *la utilización de reglas y restricciones*, *la parametrización de reglas de operación*, *el cálculo de medidas de efectividad de los distintos usos del sistema* y *la ponderación relativa del multipropósito y de medidas de efectividad de los usos*. La combinación de estas 7 piezas fundamentales, permitió generar novedosas y potentes ideas tales como la utilización de las redes neuronales artificiales para construir un modelo matemático mixto resultante de la mezcla del modelo de simulación del sistema hídrico y del modelo de optimización seleccionado, que resalta las bondades de ambos al funcionar en forma simultánea y minimiza las limitaciones de cada método usado en forma independiente. Como resultados de esta Tesis se introduce un concepto simple, pero potente, el cual consiste en la construcción de *funciones objetivo dinámicas* adaptables fácilmente por el usuario para realizar la búsqueda de políticas de gestión óptimas de acuerdo a los requerimientos cambiantes de los usuarios, sin necesidad de modificar el modelo de simulación.

El sistema de apoyo computacional, dá la posibilidad, al usuario para adaptar fácilmente el modelo matemático a las variaciones constantes del sistema físico real, las cuales son inevitables por el dinamismo de la oferta y las demandas de agua. Este mismo sistema computacional le permite adaptar la respuesta del modelo a los cambios de las condiciones de entorno tales como las prioridades relativas asignadas a los distintos propósitos y fijar una importancia relativa a cada índice de evaluación del fallo de cada uso.

El sistema desarrollado, SARH-2000, incluye varios sistemas de modelación entre los que se destacan:

- a) Un ambiente de simulación de procesos continuos que permite al usuario modelar con detalle y precisión sistemas complejos de recursos hídricos que incluyan múltiples embalses, acuíferos, elementos de distribución de agua, y que además le otorgue la capacidad de realizar la simulación de distintas políticas de operación del sistema de aprovechamiento y distribución de agua modelado, bajo distintos estados de las variables iniciales y distintos pronósticos probables de la oferta y de demanda de agua. Así, entrega al administrador la posibilidad de visualizar gráficamente y de almacenar digitalmente la evolución de los valores de todas y cada una de las variables que sean de interés durante el proceso de simulación.
- b) Un módulo de diseño, entrenamiento, validación y test de redes neuronales artificiales que incluye un sistema dedicado a desarrollar tales modelos para el pronóstico de volúmenes de escurrimiento en cuencas pluvio nivales y para encapsular el comportamiento del modelo de simulación. Este último debe ser capaz de entregar las mismas respuestas que el modelo de simulación (indicadores de evaluación de fallo) para las mismas prioridades de uso, políticas y restricciones de operación.
- c) Un módulo de apoyo a la toma de decisiones que utiliza el modelo de red neuronal para encapsular al modelo de simulación y permitir al usuario definir su propia función objetivo y buscar dentro de un espacio de soluciones acotado por las restricciones dadas por el propio usuario, aquella política de gestión que optimice el valor de la función objetivo formulada.
- d) Un **Sistema de control** que permite al usuario: interactuar con los distintos ambientes incluidos en el sistema bajo un entorno tipo *windows*, crear el modelo de simulación de un sistema hídrico complejo, crear y modificar fácilmente las reglas de operación de cada elemento para el control de aguas presentes en el sistema, desarrollar modelos de redes neuronales, gestionar las bases de datos, visualizar resultados, alternar de un ambiente a otro y elegir, en base al análisis de índices de evaluación de fallo del sistema, aquel conjunto de reglas que optimice la gestión del sistema en base a una

función objetivo diseñada por el propio usuario, dando la posibilidad al usuario de personalizar los propósitos de la gestión a través de los valores de importancia relativa que el mismo asigne a cada uso y la importancia relativa dada a cada índice de evaluación de fallo para cada uso o propósito en particular.

### **1.3 Contenido del presente Estudio.**

En el capítulo II denominado Antecedentes, se ofrece una exposición de definiciones y métodos relacionados con los temas de sistemas de apoyo a la gestión de cuencas, simulación de sistemas hídricos, redes neuronales artificiales, optimización de la gestión y reglas de operación de sistemas hídricos.

En el capítulo III se presenta, la descripción de la metodología de gestión de sistemas de recursos hídricos complejos basada en el análisis de sistemas y el método de diseño y validación de redes neuronales artificiales para el pronóstico de volúmenes de escurrimiento en cuencas de montaña, así como su utilización en la vinculación de las técnicas de simulación de procesos y de optimización, sentando las bases para su aplicación práctica.

En el capítulo IV se presentan los elementos del sistema de apoyo a la gestión SARH-2000 y la descripción de los distintos niveles de la interfaz usuario elaborada, explicando su potencialidad como herramienta en la gestión de sistemas hídricos complejos.

En el capítulo V se describe detalladamente un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en la cuenca del río San Juan, Argentina. Sistema simplificado formado por tres embalses en cadena, un dique derivador de aguas para riego y un dique partidador de aguas en tres canales principales de riego, también se representa en el modelo desarrollado un sistema de bombeo distribuido en el valle de inundación. Se

detallan todos los pasos del método de gestión esto es: medición del sistema, análisis de datos, caracterización de elementos del sistema, modelación del sistema, síntesis del sistema y toma de decisiones. También se describe la utilización del sistema SARH-2000 como herramienta de aprendizaje y de evaluación y análisis de alternativas de gestión.

En el capítulo VI se analizan los resultados generales y las conclusiones principales de aplicación de la metodología así como el análisis de los factores que intervienen en la metodología. Finalmente se proponen líneas futuras de investigación.

Para los Anexos se dejan aquellos aspectos de detalle y profundización de conceptos matemáticos, que si bien han sido fundamentales en el desarrollo del trabajo, su inclusión en el cuerpo principal del texto podría distraer.



## II. ANTECEDENTES

Este capítulo presenta una revisión de los antecedentes y conceptos necesarios de las técnicas utilizadas para el desarrollo del sistema computacional de apoyo a la gestión integral de cuencas que se ha bautizado como SARH-2000 por Sistema de Apoyo a la gestión de Recursos Hídricos. En el punto 2.1. se incluyen los antecedentes sobre algunos sistemas computacionales de apoyo a la gestión de sistemas hídricos desarrollados recientemente. Los puntos 2.2, 2.3 y 2.4 presentan los conceptos principales relacionados con las técnicas de simulación de sistemas hídricos, de redes neuronales artificiales, de optimización matemática y de evaluación de estrategias de gestión. Finalmente, en el punto 2.5 se incluye una descripción de los conceptos relevantes sobre sistemas de apoyo a la gestión basados en reglas operativas y las técnicas de diseño y parametrización de dichas reglas.

### 2.1 Sistemas de Apoyo a la Gestión existentes.

El trabajo de científicos y expertos relacionado con la aplicación de herramientas informáticas destinadas a resolver distintos problemas del área de la hidrología y de la gestión de los sistemas hídricos se ha incrementado en la última década, prueba de ello son los numerosos sistemas de computación desarrollados para ayudar a los hidrólogos en el diseño, planificación y explotación de un sistema hídrico.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los sistemas computacionales actualmente operativos en el campo de la gestión de sistemas hídricos.

**ARIANE:** Es una herramienta para toma de decisiones sustentable en forma inteligente en el proceso de desarrollo de la HydroQuebec. Incluye una guía a los usuarios de los procesos de planificación para la operación plurianual. El Sistema permite monitorear la actualización sistemática y validación de datos, la consistencia de

datos, el uso del conocimiento heurístico y la llamada secuencia de modelos matemáticos interdependientes de la Hydro-Quebec (Bakonyi, P. , 1993).

**SID(WMS)** Es un sistema experto destinado a la planificación en el manejo de sequías. SID está basado en una metodología en la cual el ambiente del Sistema se usa en la evaluación y presentación gráfica de la información de los planes de manejo. Usa un modelo de programación lineal para generar políticas de operación óptima, en función de numerosas experiencias anteriores. Estas políticas se introducen en el Sistema Experto y el usuario identifica cual es el grado de similitud entre la situación de sequía actual y un evento similar pasado. El sistema ha sido diseñado para ser operado por el departamento de Aguas de Seattle (Palmer y Tull 1987; Palmer y Holmes 1988).

**REZES:** Es un programa diseñado como herramienta para la asistencia al análisis de embalses. El Sistema formula el problema matemático del embalse mediante una descripción en pseudo-ingles a través de expresiones algebraicas. En base a esto, el programa reconoce la formulación y selecciona el algoritmo mas apropiado para resolver el problema. Después de la selección el programa asiste al usuario durante la ejecución del programa y en la interpretación de los resultados. Actualmente se pueden incluir hasta nueve embalses (dimensionamiento, planificación de operación, operación a tiempo real) y métodos de optimización (programación lineal y dinámica determinística) programación dinámica estocástica, cambio de restricciones y confiabilidad de la programación (Simonovic and Savic, 1989).

**MHOES:** Es un Sistema Experto desarrollado por Nagy et al (1989). El Sistema se ha desarrollado capturando algo de la experiencia de los ingenieros que programan el embalse Manitoba, en una base de conocimientos. El desarrollo comenzó con tres sistemas prototipos que actuarían como un pre y post-procesador inteligente para el programa EMMA (Energy Management and Maintenance Analysis). EMMA es un modelo de optimización determinístico usado para planificar la operación integral de generación hidráulica y térmica y líneas enlazadas. En cuanto a las salidas el post-

procesador del Sistema Experto negocia entre las soluciones factibles y no factibles. Teniendo una respuesta factible generada por EMMA, el Sistema ayuda al usuario a evaluar la practicabilidad del plan de operación a través de la observación de estados y niveles de embalse históricos. Si la solución no es factible, EMMA señala las variables y restricciones involucradas. En base a las restricciones indicadas, el Sistema indica las posibles causas de la no factibilidad y los valores de input correspondientes.

**OASIS** (Floris Vinio; Goforth, Gary F., 1990) es un sistema de simulación inteligente y asesor de operaciones. En la primer fase del proyecto, se ha desarrollado un prototipo para probar la aplicabilidad de la inteligencia artificial a la operación y manejo de los recursos hídricos. La segunda fase de OASIS siguió un plan estratégico de cinco años para desarrollar y desplegar un sistema de asesoramiento con una base de conocimientos de gran escala para la operación y manejo de agua a tiempo real dentro de los límites del Distrito de Aguas de South Florida.

**RAISON** (Lam, D.C.L. ; Swayne D.A., 1993) es un ejemplo de interacción de base de datos, modelos y GIS a través de un sistema inteligente. Es un Sistema Experto en el cual la lógica de inferencia y las técnicas de diseño interactivo se usan para realizar ambas operaciones fundamentales y resolver casos especiales y proveer una arquitectura de programación abierta de base de datos, modelos, GIS y Sistemas Expertos. Las aplicaciones básicas y avanzadas se ilustran mediante dos ejemplos.

**ILWIS** (Meijerink A.M.J.; Mannaerts, C.M.; De Brower H.A. y Valenzuela C.R., 1993) acoplan datos de satélite y de terreno a un modelo y a una base de reglas en un GIS para evaluar la magnitud de la degradación ambiental en una extensa área de captación tropical. El GIS ha sido usado para varios modelos aproximados y aplicado aquí a la evaluación del riesgo de erosión-sedimentación con el objeto de determinar la presente y futura degradación de suelos y especialmente en las áreas fuente de los sedimentos. Con un modelo bien ajustado del mapa ecológico, se pueden producir escenarios que indiquen donde conviene trabajar para incrementar la producción agrícola

(aguas arriba) y determinar las áreas de peligro de aluviones (aguas abajo). Los múltiples escenarios de alternativas de manejo que se pueden graficar, permiten ayudar a los tomadores de decisión evaluando la interrelación entre la productividad económica y la degradación ambiental en toda la extensión del área de captación tropical analizada.

**Smallworld GIS:** (Ruland P. ; Arnaold U.; Rouvé G., 1993) es la fusión de un poderoso manejador de datos, graficador interactivo y modelos de simulación sofisticados dentro de un simple sistema de información. Este sistema presenta una solución aproximada con orientación a objetos, en el contexto de la hidráulica ambiental. Los componentes claves son el GIS orientado a objetos Smallworld, modelos de elementos finitos de fluidos y transporte, y tipos de objetos especiales necesarios para incorporar las herramientas de simulación de elementos finitos en la estructura del GIS. Un primer prototipo de este sistema de Información integrado fue desarrollado para evaluar riesgo y planes de restauración de sedimentos contaminantes en ríos , lagos y embalses. Se ha realizado una aplicación en el estudio del río Agger Alemania.

**AQUARIUS** ( Díaz G. y Brown T., 1997) es un sistema orientado a la distribución temporal y espacial de agua entre los usuarios en una cuenca hidrográfica. La versión 96 del modelo esta dirigida a un criterio de eficiencia económica operacional que permite la redistribución del agua hasta que los retornos marginales netos en todos los usos sean iguales, esto es, hasta que sea alcanzada una condición de Pareto óptima. Esto se logra examinando en forma sistemática (usando optimización no lineal) la factibilidad de redistribuir los valores marginales o no utilizados de almacenamiento y descargas entre los usos alternativos. Debido a que los componentes del sistema pueden interpretarse como objetos de una red de flujo en la cual ellos interactúan, el modelo considera cada componente del sistema hídrico como un nodo equivalente o un enlace en el entorno de programación utilizando un lenguaje de programación orientado a objeto (C++). Este modelo no permite simular las reglas de distribución existentes ni las prioridades de uso.

**IRAS** (Interactive River and Acuífer Simulation) de Taylor M., Loucks D. y French, P. (1995), puede simular escurrimientos y almacenamientos de agua, calidad de agua, y energía hidroeléctrica consumida y producida por un sistema de embalses superficiales y subterráneos interdependientes. Posee una interfaz gráfica que permite al usuario introducir datos, operar el modelo, producir y visualizar gráficas de series de tiempo y análisis estadístico de los resultados de la simulación. También permite al usuario definir y cuantificar la vulnerabilidad, resiliencia y ocurrencia de fallo del sistema de aguas modelado. Por lo tanto IRAS permite ayudar a identificar el rango y probabilidad de variados impactos asociados con una política de operación diseñada para un sistema particular.

**AQUATOOL** (Andreu et al, 1996). Es un sistema formado por diversas unidades de control: SIMWIN, OPTIWIN y AQUIVAL, desarrollado en el Departamento de Ing. Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia. La unidad SIMWIN, es una unidad de diseño gráfico específico para simulación, tiene un módulo de análisis gráfico de resultados, un módulo que contiene el modelo matemático de simulación de la gestión: SIMGES que permite desarrollar modelos de simulación de la gestión de cuencas con múltiples embalses, acuíferos, demandas e infraestructuras de transporte, útiles en la etapa de planificación del sistema hídrico. El módulo SRIESGO (Sanchez, 1999) lo integran 3 submódulos: RIESGO, SIMULADOR y APRENDIZAJE, los que permiten la simulación de la gestión con toma de decisión basada en riesgo. Además posee otros módulos para generación de series de aportaciones sintéticas que modelan el comportamiento estocástico de las series de entrada hidrológicas produciendo series de datos condicionados por la situación inicial. El módulo APRENDIZAJE permite al usuario evaluar si el riesgo calculado es admisible o no para cada mes de gestión.

Simonovic, Slodoban; Venema, Henry D.; Burn, Donald H., (1992) desarrollaron una metodología para determinar el horizonte de operación óptimo de

embalses a corto plazo. El procedimiento de operación incluye: un algoritmo de pronóstico adaptable; un modelo de operación de embalse en tiempo real y un algoritmo de programación multiobjetivo de compromiso. Los algoritmos requieren la asignación de pesos predeterminados definiendo la importancia relativa de los dos objetivos. La metodología desarrollada está basada en el riesgo como ayuda al tomador de decisión en la selección de los pesos más apropiados. Utiliza ocurrencia de fallo, vulnerabilidad y resiliencia como los tres criterios de riesgo para asistir a la selección de la ponderación. La metodología se basa en la construcción de un sistema de bases de reglas diseñado para asistir al usuario en el proceso de selección. La metodología ha sido utilizada en la operación del embalse Green en Kentucky. El modelo del embalse se implementa para cuatro períodos históricos distintos y su realización en términos de penalidades totales, ocurrencia de fallo, vulnerabilidad y resiliencia, se presenta como una función de los parámetros que ponderan los multi-objetivos. La base de reglas del Sistema Experto se usa entonces para derivar recomendaciones considerando una selección de pesos apropiada.

Simonovic S.P., (1993) presenta un prototipo de sistema de apoyo a las decisiones Sustentables DSS el cual puede asistir en la determinación de planes óptimos y decisiones de operación a un sistema de control de crecidas urbano. El desarrollo de herramientas de software integrado a sido reforzado en los años recientes por el incremento en la capacidad y velocidad de procesamiento de las computadoras acompañada de la emergencia de nuevas tecnologías como los sistemas de Información Geográficos y los Sistemas Expertos que ya han sido aplicados satisfactoriamente a varios aspectos de la ingeniería hidráulica. Algunos de los usos dirigidos en el desarrollo de los sistemas incluyen la efectiva integración de GIS, Sistemas Expertos y técnicas de optimización y la interrelación de sus módulos. El usuario es asistido también en la generación de escenarios posibles por medio de un Sistema Experto que recomienda opciones de manejo de crecidas basadas en las opiniones de los expertos. Se ha utilizado como apoyo al sistema de control de crecidas de la ciudad de Winnipeg.

Droesen, W. J. ; Geelen, L., (1993) desarrollaron un modelo de lógica difusa para ecohidrología. El modelo consiste en la aplicación de los conjuntos difusos (fuzzy sets), relaciones difusas (fuzzy relations) y algunos operadores de agregación difusos (fuzzy aggregation operators). Los conjuntos y relaciones se definen por expertos y representan su conocimiento del sistema ecohidrológico. Esencialmente los conjuntos y relaciones difusas permiten la modelación de un Sistema complejo dentro de un conjunto limitado de reglas de decisión, introduciendo vaguedad, para representar la incertidumbre involucrada. Los beneficios de la modelación ecohidrológica sobre la modelación del tipo crisp, son presentados usando los datos de un sitio de pruebas en el área de captación de agua subterránea para el abastecimiento de aguas de la ciudad de Amsterdam.

Fürst J.; Girstmair y Nachtnebel H.P., (1993) desarrollaron sistema de apoyo a las decisiones (DSS) de manejo de aguas subterráneas en el entorno de un sistema de información geográfico (GIS). Es un esquema de DSS basado en un modelo de análisis de escenarios que puede ser soportado por los componentes de un GIS. La mas importante contribución del GIS al DSS es la base de datos espacialmente referenciada, el análisis de datos espaciales y el álgebra de mapas. Los GIS utilizados son ARCINFO y GRASS, ambos presentan algunas deficiencias en el tratamiento de datos en 3 D, otra dificultad puede ser también en algunos casos lo tedioso del procedimiento de la interface de las herramientas GIS para ingresar los datos de los modelos de aguas subterráneas existentes y el mal comportamiento de los gráficos interactivos.

## **2.2 Simulación continua de Sistemas Hídricos complejos.**

Los Sistemas hídricos pueden ser extremadamente complejos, sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada

por medio del concepto de *análisis de sistemas* . El objetivo del análisis del sistemas hidrológicos es estudiar la operación del sistema y predecir sus respuestas o salidas a un determinado impulso ingresado en el mismo. Un modelo de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones (en el caso de un modelo matemático) que conectan las entradas y las salidas.

Se entiende como *Sistema de Recursos Hídricos* a cualquier intervención humana encaminada a utilizar dichos recursos para satisfacer las necesidades en materia de aguas.

El *Enfoque de Sistema* es un método para resolver problemas complejos que define como *sistema* a un conjunto de objetos que interaccionan en forma regular e independiente. El *análisis de sistemas* tiene por objeto, permitir al analista modificar las características del sistema, en forma tal que la función valor de los datos de salida del sistema alcance el valor óptimo (Beard, 1973). La simulación del sistema permite abordar de un modo racional el problema de decidir entre una gama de posibles opciones de gestión. En el supuesto de que se cuente con suficiente información numérica sobre los elementos y relaciones que constituyen el sistema, se pueden ensayar muchas posibles configuraciones del mismo y encontrar la que mas se aproxima al objetivo buscado, o la que proporciona mayores beneficios de acuerdo con los criterios que se hayan establecido para determinar el *valor del sistema* propuesto. Como *valor del sistema* se entiende a aquel índice o grupo de índices que permiten evaluar la respuesta o comportamiento del sistema ante distintos *escenarios de simulación*, que se construyen a partir del cambio en las distintas variables y parámetros que modelan el sistema.

La *simulación continua* significa que el tiempo de simulación posee un valor inicial el cual se va incrementando progresivamente, según un intervalo de tiempo constante, para cada paso de simulación, y los valores de las variables cambian basados directamente en este cambio del valor tiempo.



Se pueden identificar cuatro tipos de elementos principales que forman parte de los métodos de simulación hidrológica: *componentes, relaciones, variables e intervalo de Tiempo.*

Los *componentes* son el equivalente conceptual a los componentes físicos de un equipo (hardware), y que en su conjunto constituyen el proyecto de aprovechamiento de los recursos hídricos, es decir, las presas, los túneles, los aliviaderos, bombas, canales, centrales de generación, etc.

Las *relaciones* son las formulaciones de las distintas interacciones que caracterizan el comportamiento de los componentes individuales del sistema. Entre los diversos tipos de relaciones que se han de cuantificar, hay dos que son fundamentales en los métodos de simulación, a saber, los *procedimientos de operación* y los *criterios de comportamiento*. Los *procedimientos de operación* son una variable que puede ser controlada por el planificador y están íntimamente ligados a los objetivos perseguidos con el aprovechamiento. Los *criterios de comportamiento* permiten determinar la función objetiva que gobierna al modelo y la evaluación de las distintas opciones, ayudando a establecer una comparación entre diseños de sistemas alternativos o políticas de gestión alternativas de sistemas existentes en explotación.

Las *variables* del modelo se pueden dividir en cinco tipos: Las *variables de estado* que indican la condición en que se encuentran los distintos componentes del modelo y su valor cambia en el transcurso de cada ejercicio de simulación. Las *variables de entrada* que se pueden subdividir en dos clases, la primera constituida por aquellas variables no controlables. Las *variables exógenas* que son independientes del modelo y describen el comportamiento o condiciones sobre los cuales los planificadores del sistema no pueden ejercer ninguna influencia directa. Los *parámetros del modelo* que son las variables que caracterizan los componentes y relaciones del modelo y que se pueden definir como aquellas características definibles del sistema que permanecerán invariables a lo largo de los cálculos matemáticos. Las *variables de salida del Modelo*

que representan la respuesta del sistema simulado expresada en la forma escogida por el operador, pueden ser cantidades físicas, por ejemplo derrames o déficits mensuales, o económicas como ser beneficios anuales o índices de evaluación de fallo como la ocurrencia de fallo, la vulnerabilidad, o la duración del fallo de un propósito, o una variable resultante de la combinación de ellas.

El *intervalo de tiempo* usado en la simulación (hora, día, mes, año) depende de la finalidad del estudio y/o de los datos disponibles.

### **2.3 Redes Neuronales Artificiales.**

Una red neuronal artificial (Figura 2.1), es un modelo matemático del tipo conexionista *grafo dirigido*, una buena introducción a este tipo de modelos se puede encontrar en el libro Inteligencia Artificial de Rich y Knigh, (1996), específicamente en el capítulo 18 “Modelos Conexionistas” en el cual también se entregan conceptos fundamentales sobre el aprendizaje de las redes neuronales. Las características básicas de estos modelos es que están formados por *unidades o neuronas y conexiones o enlaces* entre ellas, que poseen un *peso* o valor de ponderación asociado al enlace. El procesamiento de la información entre las unidades se modela a través de elementos computacionales básicos (suma, multiplicación, umbral) (Pinto 1998). Una neurona está formada básicamente por una *función de activación* y una *función umbral o de salida* (Figura 2.2). Para los efectos del cálculo de los pesos dichas funciones deben ser funciones continuas y diferenciables y pueden ser funciones no lineales, tales como la función sigmoide o la función gaussiana. Un conjunto de neuronas forma lo que se llama una *capa*. A su vez las neuronas de estas capas pueden conectarse a las neuronas de otras capas (redes estáticas o feedforward) o recursivamente unirse a sí mismas (redes dinámicas o recursivas) lo que permite construir complejas estructuras conexionistas (Rumelhart et al, 1986). Existen muchos tipos distintos de arquitecturas y topologías de

redes neuronales. Las características que diferencian los distintos tipos de redes son: la arquitectura, el método de aprendizaje y la estrategia de entrenamiento (Nussbaum et al, 1996).

Para ayudar en la comprensión de qué se entiende por “aprendizaje” podemos dar una definición tal como “..*el aprendizaje implica cambios en el sistema que se adaptan en el sentido de que le permiten llevar a cabo la misma tarea o tareas a partir de las mismas condiciones de un modo más eficiente y eficaz cada vez*”. Así definido, el aprendizaje cubre una amplia gama de fenómenos. En uno de los extremos del espectro se encuentra el perfeccionamiento de la habilidad en el otro extremo se encuentra la adquisición de conocimientos. Todos los programas de Inteligencia Artificial confían principalmente en el conocimiento como fuente de recursos. Además podemos decir que existen distintos modos de aprendizaje tales como el aprendizaje memorista (basado en un simple almacenamiento de conocimientos), el aprendizaje operacionalizado (basado en consejos) y el aprendizaje a partir de ejemplos (basado en experiencias previas se puede clasificar cosas sin poseer reglas específicas) este último modo de aprendizaje puede ser supervisado o no supervisado. El proceso de ajuste de pesos de una red neuronal se realiza a través de un proceso de “aprendizaje a partir de ejemplos” existiendo distintos tipos de algoritmos de aprendizaje, cuya aplicación dependen del tipo de arquitectura que posea la red neuronal artificial.

*A modo de analogía, se puede indicar que, un modelo lineal puede ser representado a través de una red de una sola capa de neuronas (sin capa oculta) mientras que un modelo no lineal está asociado con las redes multicapas (con capa oculta) (LSWC, 1999). En esta Tesis se consideraron solo redes de tres o más capas (una o más capas ocultas), las cuales demuestran un buen comportamiento para pronosticar los caudales de salida y tienen capacidad de adaptación a cuencas de respuestas lineales y no lineales (Minns, 1998).*

Según Rich y Knigh, (1996) las redes multicapa pueden aprender cualquier función, lo cual implica que la metodología de diseño debe centrarse fundamentalmente en la definición del número de neuronas en cada capa y la estrategia de entrenamiento de la red.

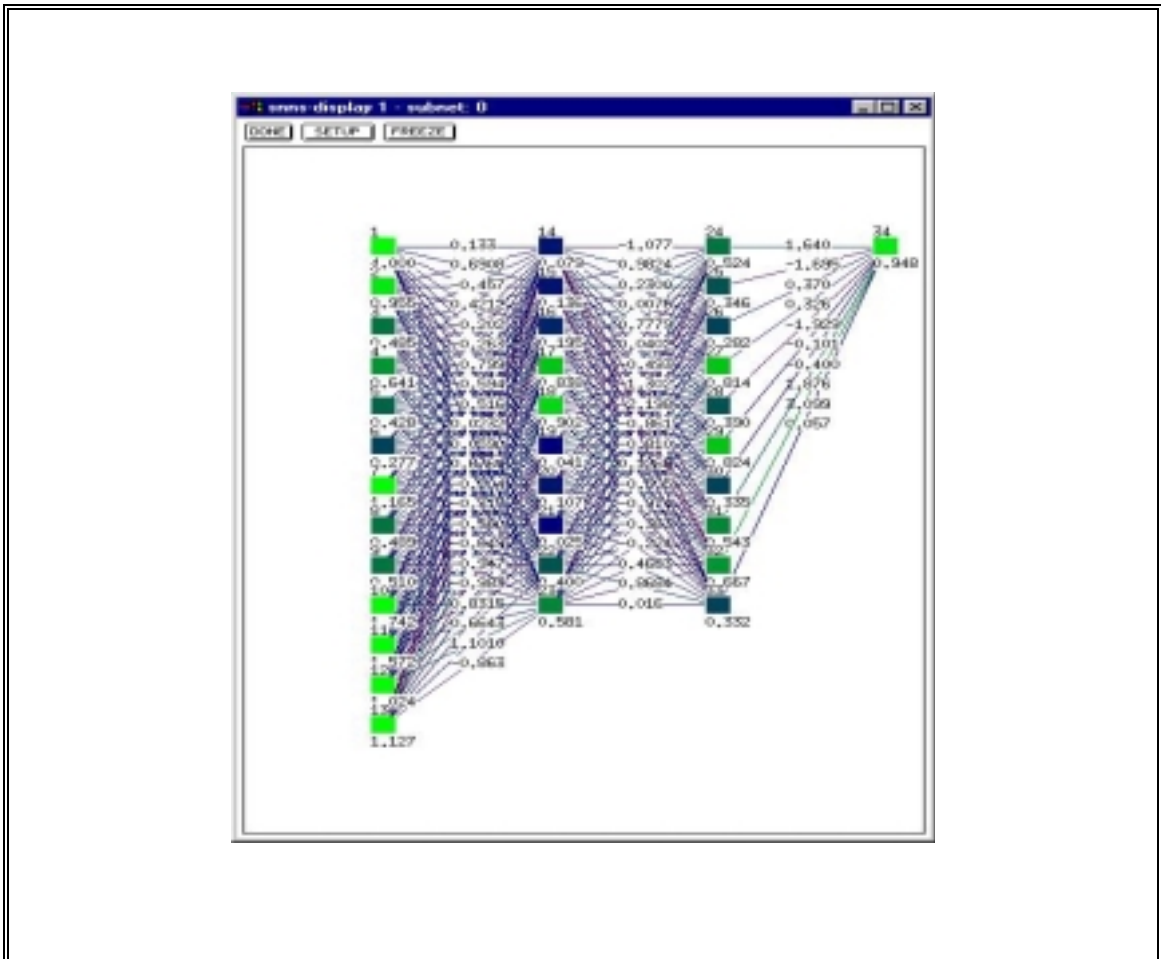


Figura 2.1: Esquema de red neuronal multicapa completamente conectada (una capa de entrada, dos capas ocultas y una capa de salida) con arquitectura ANN(13,10,10,1).

Las redes neuronales pueden reconocer regularidades en los datos. Sin embargo, normalmente la capacidad de reconocimiento se distribuye de manera difusa entre las funciones de activación de los nodos ocultos y los pesos de los enlaces,

haciendo incierto el rol que cumple cada uno de estos elementos en el modelo.(Winston, 1994).

Básicamente una red feedforward multicapa realiza una transformación no lineal de los datos de entrada con el objeto de aproximar los datos de salida. El número de nodos de entrada y de salida está determinado por la naturaleza del problema a ser modelado, el método de representación de los datos de entrada elegido y la forma de la salida de red requerida. Las neuronas de las capas ocultas tienen como misión, sumar las señales  $x_{j-1,i}$  ponderadas por los pesos  $w_{j-1,i,j,k}$  que llegan a la neurona  $k$  de la capa  $j$  desde la neurona  $i$  de la capa anterior  $j-1$  (puede ser la capa de entrada u otra capa oculta) y pasar el resultado de esta suma ponderada a través de una función de umbral o de salida no lineal (puede ser la función sigmoide u otra función no lineal continua y diferenciable). Además de sumar en forma ponderada las entradas, generalmente se incluye un término de sesgo que influye en la forma de la no linealidad de la función de activación (Figura 2.2). Las redes estudiadas abarcaron las redes de tipo feedforward con método de aprendizaje backpropagation momentum, función de activación Tangente Hiperbólica (capa oculta) y lineal (capa salida); las redes de topología igual a la anterior pero con función de activación Sigmoidal (capas oculta y de salida); las redes de igual topología a la anterior pero con método de aprendizaje estocástico; la red Radial Basis Function. Una descripción mas detallada de estas redes y sus métodos de aprendizaje se presenta en Dibike et al, (1999); Zell et al, (1995); Mitchel, (1997); Hassoun, (1995); Freeman y Skapura, (1992).

El procedimiento de entrenamiento backpropagation en las redes estáticas (feedforward) es un tipo de aprendizaje supervisado. Es decir que, permite encontrar (aprender) en forma automática los pesos de los enlaces de la red neuronal, a partir de muestras de entrenamiento.

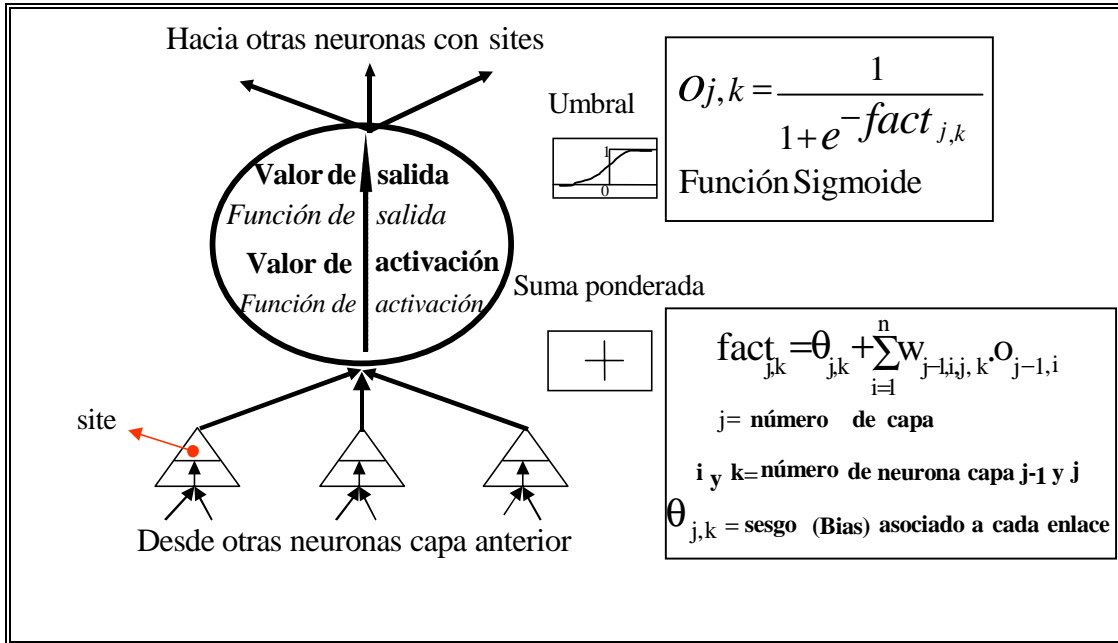


Figura 2.2: Esquema de Neurona Artificial con función de activación Sigmoide (las flechas indican el sentido del flujo de los datos).

El problema de determinar los parámetros (pesos) de la red puede ser considerado esencialmente un caso de optimización no-lineal que busca minimizar la función error de las salidas de la red (función de desempeño  $P$ ). Se puede utilizar una técnica de optimización haciendo uso del Jacobiano de la función objetivo para determinar la dirección de búsqueda.

El algoritmo backpropagation, es básicamente un algoritmo de búsqueda del mínimo de una función objetivo (error de predicción de la red) que implementa la técnica del gradiente descendente, el cual incluye una tasa de aprendizaje que influye en la rapidez del ajuste de los pesos. (Rumelhart y McClelland, 1987). Para entrenar la red con este algoritmo, se debe presentar a la red un conjunto de datos (patrones de entrada - salida) representativo del proceso.

Aplicando el método del gradiente y la regla de la cadena a la función de desempeño P:

$$P = - \sum_s \left( \sum_z (dsz - osz)^2 \right)$$

donde

P= es el desempeño medido (puede elegirse otra forma de evaluar el error, Tabla III.2)

s = es un índice que fluctúa entre las muestras

z = es un índice que fluctúa entre todos los nodos de salida

dsz = es la salida deseada para la muestra de entrada s en el nodo z-ésimo

osz = es la salida real para la muestra de entrada s en el nodo z-ésimo.

Se calcula  $\frac{\partial P}{\partial w_{j-1,j}}$  y luego de aplicar la regla de la cadena y definir

$\frac{\partial P}{\partial o_j} = \beta_j$  se puede, tras varios pasos matemáticos, deducir las fórmulas para calcular el

cambio de pesos, base para el desarrollo del método backpropagation error (ANEXO B):

$$\Delta w_{j-1,i,j,k}(t) = r \cdot \delta_{j,k} x_{j-1,i} + \alpha \Delta w_{j-1,i,j,k}(t-1)$$

donde:

r= tasa de aprendizaje

$$\delta_{j,k} = \left( \frac{do_{j,k}}{dfact_{j,k}} \right) [d_z - o_z] \quad \text{para la capa de salida}$$

$$\delta_{j,k} = \left( \frac{do_{j,k}}{dfact_{j,k}} \right) \sum_{i=1}^n w_{j-1,i,j,k} \cdot o_{j-1,i} \quad \text{para capas ocultas}$$

$\alpha$  = constante de mometum destinada a acelerar la convergencia del método de gradiente.

El algoritmo de retropropagación (*backpropagation*) es una forma relativamente eficiente de calcular la mejoría en el desempeño de la red (valor de la función objetivo) con cambios individuales de peso. Se conoce con este nombre porque primero calcula los cambios en los pesos en la capa final, reutiliza gran parte de los mismos resultados para calcular los cambios de los pesos de la penúltima capa y finalmente, regresa a la capa inicial. El esquema de red feedforward que se presenta en la Figura 2.3 ayuda a entender los conceptos de la heurística del algoritmo *backpropagation error*.

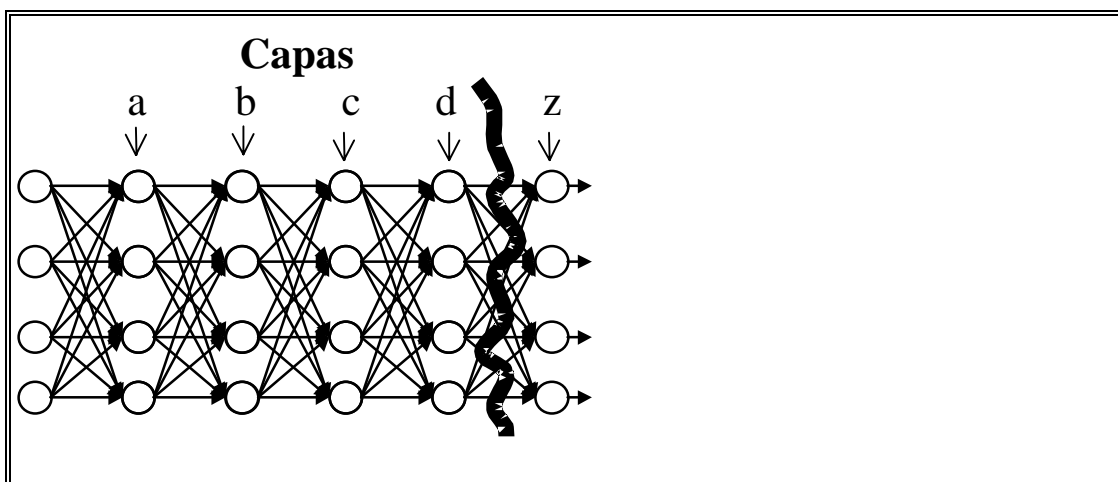


Figura 2.3: Red neuronal artificial feedforward (capas ocultas a,b,c,d) (capa de salida z)



La idea global que yace tras la retropropagación es hacer un cambio importante a un peso en particular,  $w$ , si el peso conduce a una reducción grande de errores observados en los nodos de salida.

A continuación se explica cómo el algoritmo de retropropagación hace para calcular el cambio para un peso,  $w_{bc}$ , entre un nodo de la capa  $b$  y un nodo de la capa  $c$ , (Figura 2.3), concepto que luego se puede generalizar para los demás nodos de las demás capas. Por simplicidad de notación no se incluye el subíndice del número de nodo, ni el subíndice del número de muestra en este análisis. Al incluirlos se obtiene una expresión general para todos los nodos y todas las muestras de entrada-salida.

Entonces, para cada combinación de muestras de entrada, se considera el valor deseado de salida  $dz$ ; el valor que entrega la red  $oz$ ; y la influencia de un peso cualquiera de la red  $w_{j-1,j}$ , sobre el error  $dz-oz$ . Un cambio grande sobre  $w_{j-1,j}$  solo tiene sentido de hacerse si tal cambio puede reducir en una gran proporción el error de salida  $dz-oz$ .

Por ejemplo, un cambio en la entrada de un nodo en la capa  $c$  trae como resultado un cambio en su salida el cual depende de la pendiente de la función de umbral. En la región donde la pendiente de la función umbral es más pronunciada, un cambio en la entrada tiene el máximo efecto en el valor de salida. En consecuencia, el algoritmo debe hacer que el cambio sobre  $w_{bc}$  dependa de la pendiente de la función de umbral en el nodo de la capa  $c$  sobre la base de que el cambio debe ser liberal sólo en aquellas partes en que genere mucho beneficio. La pendiente de la función Sigmoide está dada por una fórmula particularmente sencilla,  $o.(1-o)$ , siendo  $o$  el valor de salida del nodo, por lo tanto el uso de esta función de umbral conduce a la siguiente heurística para realizar los cambios en  $w_{bc}$ : 1- El cambio de un peso del enlace entre un nodo de la capa  $b$  y uno de la capa  $c$ ,  $\Delta w_{bc}$ , debe ser proporcional a la pendiente del umbral de

salida del nodo de la capa **c**,  $o_c(1-o_c)$ ; 2- El cambio en el peso de un enlace de **b** a **c**,  $\Delta w_{bc}$ , debe ser proporcional a  $o_b$ , la salida del nodo en la capa **b**. Debido a que un cambio en la entrada de un nodo en la capa **c**, motivado por un cambio en el peso  $w_{bc}$  debe hacerse solo si la salida del nodo de la capa **b** es alta; 3- el cambio en el peso  $\Delta w_{bc}$ , debe ser proporcional a un factor, que llamaremos  $\beta$ , que capte cuán benéfico en el resultado es cambiar la salida del nodo de la capa **c**. Estas tres consideraciones combinadas conducen a que:

$$\Delta w_{bc} \text{ debe ser proporcional a } o_b \cdot o_c (1 - o_c) \cdot \beta_c.$$

Si un nodo de la capa **c** está conectado a un nodo de la capa siguiente, la capa **d**, entonces el cambio a  $o_c$  debe ser proporcional a  $o_d(1-o_d)$ , la pendiente de la función umbral en el nodo de la capa **d**. Además, el cambio a  $o_c$  debe ser proporcional a  $w_{cd}$ , el peso del enlace que conecta el nodo de la capa **c** con el nodo de la capa **d**. Debe tenerse siempre presente que el nodo de la capa **c** está conectado a muchos nodos de la próxima capa **d**. Por lo que el beneficio general obtenido al cambiar  $o_c$  será la suma de los efectos individuales para los **n** nodos de la capa **d**, cada uno de los cuales incluye uno de los pesos,  $w_{cd}$ , una de las pendientes,  $o_d(1-o_d)$  y el factor  $\beta_d$  que indica cuán benéfico es un cambio en  $o_d$ . Así, el beneficio que se obtiene al cambiar la salida del nodo en la capa **c** se puede calcular como:

$$\beta_c = \sum_{k=1}^n w_{ck} \cdot o_k (1 - o_k) \cdot \beta_k$$

siendo **k** el subíndice que indica el número de nodo de la capa **c** de entre los **n** nodos existentes.

Por carácter transitivo, el beneficio que se obtiene al cambiar el valor de un nodo de salida dependerá directamente de la magnitud del error de salida

$$\beta_z = dz - oz.$$

Si  $(dz - oz)$  es pequeño, entonces el cambio en  $oz$  debe ser pequeño. Caso contrario el cambio en  $oz$  debe ser grande.

Finalmente los cambios en los pesos deben depender directamente de un parámetro de rapidez  $r$  de aprendizaje. Si se combinan todas las ecuaciones, se obtiene las siguientes fórmulas de retropropagación:

$$\Delta w_{bc} = r \cdot o_b \cdot o_c \cdot (1 - o_c) \cdot \beta_c,$$

$$\beta_c = \sum_{k=1}^N w_{ck} \cdot o_k \cdot (1 - o_k) \cdot \beta_k \quad \text{para nodos en la capa oculta}$$

$$\beta_{z-1} = \sum_{z=1}^M w_{(z-1)z} \cdot o_z \cdot (1 - o_z) \cdot \beta_z \quad \text{para nodos en la última capa oculta}$$

$$\beta_z = d_z - o_z \quad \text{para nodos en la capa de salida}$$

Existen dos maneras de calcular el cambio de pesos para una combinación de muestras dadas, uno es realizar el cambio después de considerar cada muestra de entrada, y el otro es sumar los cambios sugeridos por las muestras de entrada individuales y calcular un cambio luego de presentar todas las muestras a la red.

El procedimiento de retropropagación es directo, los pasos del método son los siguientes:

- Elegir una configuración inicial de pesos
- elegir un parámetro de rapidez  $r$ 
  - hasta que el desempeño sea satisfactorio
  - para cada muestra de entrada

- calcular la salida resultante
  - calcular  $\beta_z$  para los nodos de la capa de salida
  - calcular  $\beta_j$  para todos los nodos de las capas ocultas
  - calcular los cambios en los pesos  $\Delta w_{j-1,j}$
- sumar los cambios en los pesos de todas las muestras de entrada y cambiar los pesos.

La idea central es entonces realizar tantos cambios de pesos como sean necesarios para alcanzar un cierto valor de desempeño.

Dado un parámetro de rapidez y una configuración inicial de pesos, deben calcularse los valores de salida de la red para cada muestra de entrenamiento, con estos valores se calcula el valor de  $\beta_z$  para los nodos de la capa de salida, con este valor se calcula  $\beta_j$  para todos los nodos de las capas ocultas y el valor de los cambios a introducir en los pesos  $\Delta w_{j-1,j}$ . Se realiza el cálculo de cambio de pesos para todos los patrones de entrenamiento, se suman los cambios de pesos de todas las muestras y se asigna un valor de cambio de pesos, finalmente se cambian los pesos de acuerdo al valor de cambio calculado y se repite el procedimiento del cálculo de desempeño para esta nueva configuración de pesos. A este proceso se le llama un ciclo y se debe repetir tantas veces hasta que el desempeño de la red sea satisfactorio. En caso que no lo sea se debe elegir un nuevo valor de parámetro de rapidez  $r$ , o una nueva configuración inicial de pesos.

El entrenamiento puede requerir miles de retropropagaciones, sin embargo, en términos computacionales este algoritmo es eficiente ya que el número máximo de sumas y multiplicaciones que se necesitan para ajustar cualquier peso en particular es del orden del número de enlaces que salen de un nodo. Este algoritmo no garantiza encontrar el óptimo global del problema, por lo cual puede conducir a óptimos locales o volverse

inestable. Los parámetros de rapidez y momentum juegan un rol importante en el proceso de búsqueda de la solución óptima, así también como el punto inicial y el rango de valores iniciales asignados a los pesos de los enlaces.

#### **2.4 Métodos de Optimización en la gestión de los recursos hídricos.**

La definición de los objetivos relevantes en la gestión de los recursos hídricos y la definición de la importancia relativa de cada uno de esos objetivos, es uno de los aspectos más difíciles a resolver. Siempre existen varios individuos y grupos de interés afectados por algún proyecto e involucrados en la toma de decisiones. A menudo cada individuo tiene más de un objetivo y además la importancia relativa de cada objetivo puede cambiar con el tiempo. Por otra parte, algunos objetivos son de difícil cuantificación y aquellos que pueden ser cuantificados frecuentemente están expresados en unidades no comparables entre sí.

Seguramente no existirá el plan de gestión óptimo que satisfaga todos los objetivos económicos y ambientales, conflictivos entre sí. Sin embargo los responsables del análisis y la formulación del plan de gestión deben identificar planes que representen razonables acuerdos (negociaciones) entre aquellos intereses y metas conflictivas.

Cualquier decisión que se tome en la gestión de sistemas de recursos hídricos debe ser una decisión justa, factible y eficiente, que satisfaga equilibradamente a la comunidad involucrada. En estos procesos de decisión se considera, generalmente, un conjunto de múltiples objetivos que se desean alcanzar. Tal problema se acostumbra a expresarlo matemáticamente de la siguiente forma general:

Maximizar  $Z(x)=(Z_1(x),Z_2(x),\dots,Z_q(x))$ , sujeto a  $g_k(x)\leq 0$  ,  $k=1,\dots,m$

Donde  $Z$  es el vector de las  $q$  funciones objetivo ( $q$  objetivos separados)  $Z_i$  dichas funciones objetivo pueden ser una combinación lineal o no lineal de indicadores de comportamiento del sistema,  $x$  es el vector de las  $n$  variables de decisión, las funciones

$g_k$  son  $m$  restricciones que definen el espacio factible  $S$ . En la Gestión de Recursos Hídricos, con frecuencia, las variables de decisión representan cantidades de agua asignadas para algún propósito o proyectos hidráulicos potenciales o también pueden ser parámetros introducidos en las reglas de operación de elementos de control y almacenamiento que se hayan elegido como estratégicos en la operación del sistema. Las restricciones, con frecuencia, están ligadas a la cantidad de agua y capital disponibles, a restricciones ambientales y a los objetivos perseguidos con la gestión. No existe una solución factible  $x$  que maximice simultáneamente todos los objetivos, ya que los objetivos pueden resultar mutuamente excluyentes. Debe buscarse entonces una solución satisfactoria y eficiente, que aproveche al máximo los recursos, es decir, si se desea mejorar en algún propósito, esto tal vez deba hacerse a expensas de otro. Si el espacio de decisión es continuo, existen infinitas soluciones eficientes y es mediante el juicio del decisor que puede escogerse una de ellas como solución al problema. Por lo tanto su solución requiere incorporar valoraciones objetivas y subjetivas, esta última expresadas mediante la estructura de preferencias del decisor (ponderación de propósitos y ponderación de las medidas de evaluación de alternativas).

El modelo de optimización (vector) es una forma concisa de formular un problema multiobjetivo. En realidad, un vector puede ser maximizado solamente si pueden hacerse comparaciones entre sus varios componentes y con eso reduce el problema a uno de tipo escalar. En este sentido es que se necesita en el análisis multiobjetivo incorporar el concepto de un índice de comportamiento global del sistema.

Existen básicamente dos estrategias de optimización por gradiente y por enumeración. En la primera se emplea un cierto procedimiento de gradientes (*hillclimbing*) y la segunda consiste en enumerar en forma explícita diversas combinaciones posibles de variables, y seleccionar entre ellas la mejor. En ambos procedimientos se realiza una búsqueda de acuerdo con reglas determinadas que permiten detectar el valor óptimo, cuando este se ha encontrado. Entre las técnicas más

utilizadas se encuentran la Programación lineal (gradiente) y la Programación Dinámica (enumeración). Cada una de las técnicas de optimización impone tanto a la función objetivo como a las restricciones, determinadas condiciones. Cuanto más restrictas son las condiciones, tanto más eficiente es la técnica de optimización correspondiente. La naturaleza del problema de optimización indica el tipo de técnica que debe emplearse para su solución. La programación dinámica es una técnica de optimización enumerativa aplicable a problemas con restricciones y funciones objetivo que pueden ser no lineales y regiones factibles no convexas. Se aplica a problemas que pueden descomponerse en etapas a lo largo del tiempo, pero también puede emplearse en problemas no secuenciales o con estructura en serie (Gerez V. y Grijalva, M., 1987).

El problema de gestión multiobjetivo involucra tres etapas: la *cuantificación de objetivos*, la *formulación de alternativas* y la *selección del plan de gestión*.

La *cuantificación de objetivos*, se refiere a la adopción de alguna escala cuantitativa (numérica) que provea un indicador de cuán bien el objetivo podría ser alcanzado. Por ejemplo, uno de los objetivos de un programa de conservación de una cuenca podría ser la protección y preservación de la vida silvestre. Con el objeto de ordenar cómo los numerosos planes encontrarán sus objetivos, se necesita un criterio numérico, tal como [has] de hábitat preservado o la población de especies silvestres en reserva.

La cuantificación no requiere que todos los objetivos sean descritos en unidades comparables. El mismo proyecto puede tener un objetivo de control de crecidas cuantificado como la altura del estado de la corriente para el cual hay protección, y, al mismo tiempo, un objetivo de desarrollo regional cuantificado como el aumento de los ingresos locales.

Una vez que los objetivos son cuantificados se puede proceder con los pasos de formulación y selección del plan.

La meta de la formulación del *plan multiobjetivo* es la generación de un juego de planes tecnológicamente eficientes y aceptables.

Dos aproximaciones comunes para la formulación del plan son los métodos de “pesaje” y “restricciones”.

La aproximación por ponderación significa asignar un peso relativo a cada objetivo para convertir el vector objetivo a un escalar que es la suma en peso de las funciones objetivo separadas. El modelo multiobjetivo pasa a ser:

$$\text{Max } Z = w_1 Z_1(x) + w_2 Z_2(x) + w_3 Z_3(x) + \dots + w_q Z_q(x) \text{ sujeto a } g_k(x) \leq 0, k=1, \dots, m$$

donde los pesos no negativos  $w_1, w_2, \dots, w_q$  son constantes especificadas. Estas pueden ser variadas sistemáticamente para generar un juego de planes técnicamente eficientes.

El mayor atributo de la aproximación por ponderación es que las relaciones o tasa marginal de sustitución de un objetivo por otro en cada punto identificado sobre el límite de la función objetivo está explícitamente especificado por los pesos relativos. La tasa marginal de sustitución entre dos objetivos cualquiera  $Z_j$  y  $Z_k$

$$-\left. \frac{dZ_j}{dZ_k} \right|_{z=const.} = \frac{w_k}{w_j}$$

es:

cuando cada uno de los objetivos es continuamente diferenciable en el punto en cuestión.

Estos pesos pueden variarse a lo largo de rangos razonables para generar un amplio rango de planes que reflejen diferentes prioridades. Alternativamente, pueden seleccionarse valores específicos de los pesos que reflejen ideas preconcebidas del peso relativo que debería otorgarse a cada objetivo.



Por último, la fase de selección del planteamiento multiobjetivo involucra a aquellos que son responsables de probar o desaprobar planes alternativos. Pueden ser usados distintos esquemas iterativos e interactivos que requieren la participación de analistas. Cada método difiere en el tipo de información solicitada por los tomadores de decisiones, de esta manera, el mejor método para una situación particular dependerá no del método en sí mismo sino también de quienes toman las decisiones, del proceso de toma de decisiones, y de las responsabilidades aceptadas por los analistas y de quien decide.

En resumen, toda función objetivo busca maximizar o minimizar algún índice que representa el comportamiento global del sistema frente a determinadas acciones que ha tomado el decisor para un horizonte de gestión definido. Es por ello que deben definirse con exactitud las medidas de comportamiento o efectividad de las alternativas de gestión que permitirán realizar el análisis del sistema. El punto siguiente define las medidas de efectividad adoptadas en este estudio.

## **2.5 Evaluación de Fallo de un Sistema de Administración de Recursos Hídricos.**

Para lograr una correcta gestión de sistemas hídricos complejos, teniendo en cuenta el riesgo asociado a la decisión adoptada, es necesario utilizar índices de evaluación del fallo del sistema. Se entenderá como concepto general que el término *fallo* hace referencia a una situación de insatisfacción de la demanda de un uso o la existencia de una situación inaceptable en el sistema tal como exceder un cierto caudal de escurrimiento máximo permitido aguas abajo del sistema de regulación, no satisfacer una demanda del sector riego o del sector hidroenergético, superar un cierto nivel de anegamiento máximo permitido en el valle de inundación o vaciar un embalse por debajo de una cota mínima necesaria para usos recreativos.

Durante la explotación de los sistemas hídricos, puede darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos. Se presenta como necesidad entonces, que el modelo de simulación incluya índices de evaluación del fallo del sistema. Importantes índices que evalúan el fallo operacional en un sistema de recursos hídricos son: la frecuencia de fallo para satisfacer las condiciones establecidas por cada usuario, la duración del fallo y la severidad del mismo. Estos índices permiten medir la garantía de las políticas de operación a largo plazo durante la etapa de planificación del sistema y el riesgo en la etapa de explotación. En el caso presentado se implementaron en el modelo de simulación continua distintos índices de evaluación del fallo del sistema los cuales estaban orientados a representar las tres características básicas: ocurrencia o riesgo de fallo, duración del fallo o resiliencia y severidad del fallo o vulnerabilidad cuya definición se agrega a continuación:

#### **a) Ocurrencia de fallo**

La ocurrencia de fallo es la probabilidad de que en cualquier período el estado del sistema o de un propósito particular sea de fallo y su valor se define como la razón entre el número de períodos de fallo y el número total de períodos expresado en porcentaje.

#### **b) Resiliencia**

La resiliencia es una medida de la rapidez del retorno al estado satisfactorio o probabilidad de recuperación una vez que ocurrió un estado de fallo y su valor se define como el complemento de la probabilidad condicionada de que un evento tomado al azar esté en estado de fallo y mantenga esta condición de fallo en el período siguiente.

### **c) Vulnerabilidad**

La severidad del Fallo o Vulnerabilidad, se define como el tamaño o magnitud de los estados de fallo y su valor, en este trabajo, se define como la máxima magnitud de fallo ocurrida durante el total de períodos estudiados.

En la figura 5.9 se encuentra el detalle de la formulación matemática de cada uno de estos índices de evaluación de fallo que dan una idea de las relaciones entre ellos y los propósitos del sistema para los cuales han sido específicamente diseñados.

### **2.6 Sistema de Apoyo a la Gestión de Recursos Hídricos basado en reglas.**

El planeamiento y gestión del uso conjunto óptimo de sistemas de recursos hidráulicos a gran escala, requiere de esfuerzos de modelación y optimización que superan las técnicas de optimización matemática comentadas debido a la alta dimensionalidad y complejidad (No Linearidad) de las ecuaciones de interacción entre variables. En casos complejos como el que se propone estudiar, la aplicación de procedimientos de optimización analítica posee un alto riesgo en la etapa de definición de las funciones objetivos, las cuales deben encapsular todos los objetivos en una sola expresión matemática. Este problema se ha visto superado con la aparición del desarrollo de técnicas en el campo de la ingeniería de sistemas y de la inteligencia artificial (redes neuronales artificiales) capaces de crear modelos complejos de sistemas hídricos y encontrar la solución a problemas no estructurados (Loucks y R.da Costa, 1991; Seeger, 1987).

Se entiende por problemas no estructurados aquellos en el cual intervienen decisiones que pertenecen a aquel grupo que involucran aspectos subjetivos, buen juicio, etc. Por lo general, la mayoría de las decisiones a nivel de control son altamente estructuradas. En cambio las de nivel estratégico son relativamente poco estructuradas. (Casas y Navón, 1997). La idea de un sistema de computación disponible que entregue la solución está siendo sustituida por una estructura denominada Sistema de Apoyo a la

toma de Decisión también conocida como Decisión Support Systems (DSS) (Soncini-Sessa et al, 1991), en el cual la persona encargada de tomar la decisión maneja un set de herramientas tales como modelos hidrológicos, bases de datos, modelos de manejo de sistemas, procesadores gráficos y numéricos, etc., de tal forma que pueda aprovecharlos para encontrar él mismo su propia solución. La literatura en la materia está creciendo considerablemente (Sprague y Carlson, 1982; Parker y Al-Utabi, 1986; Guariso y Werthner, 1989) y algunas aplicaciones en manejos de embalses se han publicado recientemente (South Florida Water Management District, 1987; Loucks, 1990; Simonovic y Savic, 1989). Aunque se habla de los Sistemas de Apoyo a la toma de Decisión (DSS) desde los años '80, la definición de un DSS varía substancialmente de un autor a otro. En este trabajo se ha adoptado la definición basada en la arquitectura conceptual DSS propuesta por Guariso y Werthner (1989), quienes identifican cinco componentes fundamentales en un DSS (Figura 2.4).

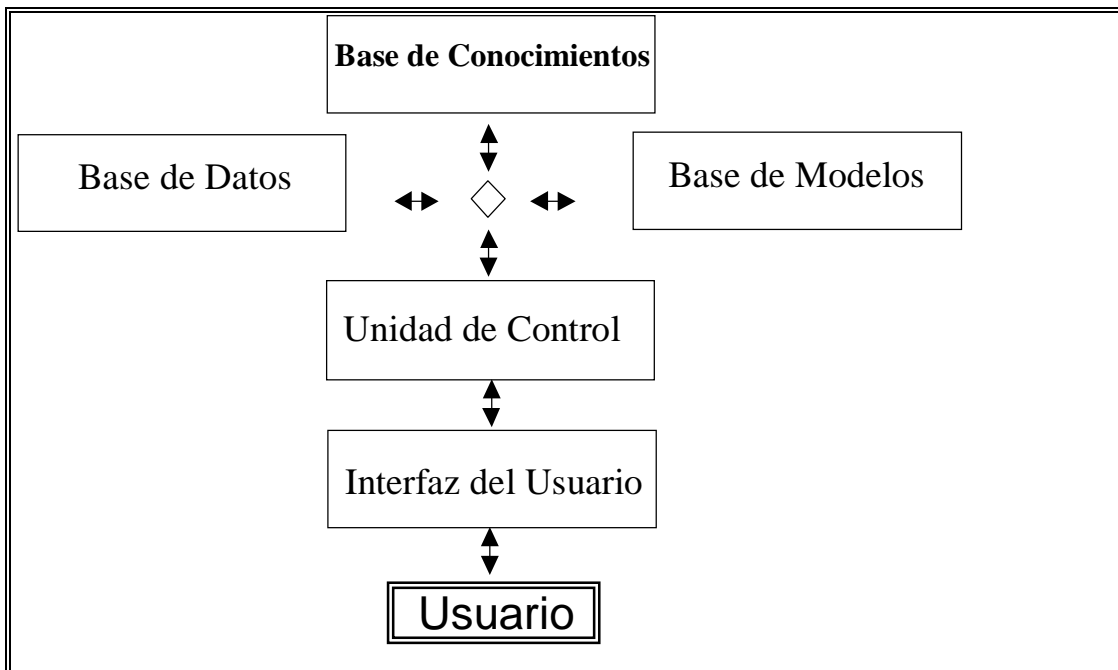


Figura 2.4: Arquitectura de DSS según Guariso y Werthner (1989)

Los distintos escenarios hidrológicos posibles en una cuenca influyen en las decisiones de operación que deben tomarse en sistemas hídricos existentes contribuyendo a aumentar la complejidad de la gestión. En general es común definir, para efectos de la gestión del agua, un período hidrológico para la cuenca en estudio. Según el glosario de términos hidrológicos internacional de la UNESCO, el período hidrológico está definido como aquel período continuo de doce meses seleccionados de manera que los cambios globales en el almacenamiento sean mínimos, por lo que la cantidad sobrante de un año al siguiente se reduce al mínimo.

Los tres escenarios hidrológicos más representativos del proceso de escurrimiento pueden clasificarse en *período hidrológico normal* que es aquel período cuyo volumen total de escurrimiento anual es igual al valor promedio registrado en la serie histórica de la cuenca; *período hidrológico de déficit hídrico*, que es aquel período cuyo volumen total de escurrimiento es menor a un cierto umbral calculado a partir de la serie histórica de la cuenca y el *período hidrológico de riqueza hídrica* que se define como aquel período cuyo volumen total de escurrimiento es mayor a otro umbral en la serie histórica de la cuenca.

Un problema clásico en la gestión de los recursos hídricos, es la necesidad de incluir criterios de gestión que tengan en cuenta un grado conveniente de anticipación en las acciones tanto durante la etapa de planificación como en la de explotación del sistema, hecho que adquiere mayor relevancia en presencia de eventos extremos. Es importante entonces, contar con reglas operativas que contemplen tanto las restricciones a los suministros en el caso de una sequía hidrológica como las restricciones en las descargas de los embalses para poder afrontar eventos de crecidas. Sin embargo, fijar reglas que se adapten a todos los escenarios de oferta y de demanda de agua posibles implica establecer para cada uno de estos casos reglas específicas que indiquen por ejemplo cuándo comenzar a aplicar tal o cual medida de mitigación; el grado adecuado

de las restricciones de uso del agua y el grado de prioridad de afectación de los usuarios, entre otros factores, lo cual obliga a discretizar el problema antes de modelarlo.

En períodos hidrológicos normales la regla de gestión de sistemas hídricos la regla de operación más utilizada (normal) consistente en suministrar todo el volumen de agua demandado al sistema mientras se disponga de recurso y entregar el recurso disponible cuando es inferior a la demanda. Sin embargo, esta regla no contempla la no linealidad de las pérdidas asociadas a los déficits en algunos sectores de usuarios. La introducción de restricciones es uno de los elementos matemáticos más utilizados para solucionar este inconveniente. Sin embargo, en sistemas hídricos complejos, con más de un embalse, debe establecerse además de qué manera se va a distribuir el recurso entre los elementos de almacenamiento. Esto abre un nuevo abanico de posibilidades de operación aumentando considerablemente la dimensionalidad del problema de gestión del sistema en su conjunto. Algunos esfuerzos se han realizado en la determinación, en base a la experiencia de distintos investigadores y operadores de sistemas de múltiples embalses, de grupos de consignas (o maniobras) operativas aconsejables para cada tipo de sistema (embalses en cadena o en serie) y cada tipo de propósito (control de crecidas, generación de energía, riego, agua potable, recreación, almacenamiento de energía) y estación o período (llenado o vaciado). En este sentido Lund J. y Guzmán J., (1999), sintetizan en dos Tablas (Tabla II.1 y Tabla II.2) las reglas conceptuales básicas para una conveniente operación de estos sistemas (orden de llenado y vaciado de cada embalse, ubicación de espacios para control de crecidas, maximización del almacenamiento de energía en el caso del uso energético, y otras). Todas estas ideas pueden derivar en una ecuación matemática específica para cada propósito factible de optimizar buscando maximizar o minimizar alguna función objetivo determinada. Sin embargo, este esquema sólo entrega un marco operacional donde movernos, el cual estará regido en la realidad por situaciones especiales y excepciones, lo cual evidentemente supone que para resolver el problema de gestión de un sistema hídrico en su conjunto no sólo deba realizarse un refinamiento del conjunto de reglas a utilizar sino que en algunos casos, las

reglas específicas para un período o un propósito particular se contrapongan con el objetivo global del sistema en su conjunto.

**Tabla II.1: Reglas generales para manejo de embalses en serie  
(adaptado de Lund y Guzman)**

<b>Propósito</b>	<b>Estación/Período</b>	
	<b>Llenado</b>	<b>Vaciado</b>
Uso Doméstico e industrial	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Control de crecidas	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Almacenamiento de energía	Llenar primero los embalses aguas arriba	Vaciar primero los embalses aguas abajo
Producción de hidroenergía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación		Compensar la explotación marginal de la recreación



**Tabla II.2: Reglas generales para manejo de embalses en paralelo.**  
**(nota: VE es el Valor Esperado)**

<b>Propósito</b>	<b>Estación/Período</b>	
	<b>Llenado</b>	<b>Vaciado</b>
Uso Doméstico e industrial	Compensar la probabilidad de derrames estacionales entre los embalses.	Compensar la probabilidad de vaciado entre los embalses
Control de crecidas	Dejar mas espacio de almacenamiento en los embalses sometidos a crecidas	No es aplicable en este caso
Almacenamiento de Energía	Compensar el VE de la energía de los derrames estacionales entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el VE de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Calidad del Agua	Compensar el VE de la calidad del agua estacional marginal entre los embalses	Para el último paso de tiempo, compensar el VE de la energía de los derrames de la estación de llenado entre los embalses
Producción de hidroenergía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía	Maximizar el almacenamiento en embalses con mayor capacidad de producción de energía
Recreación	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses	Compensar la explotación marginal de la recreación de almacenamientos adicionales entre los embalses

Ahora bien, las reglas de operación adecuadas para períodos hidrológicos normales, en general no serán las adecuadas para períodos hidrológicos extremos donde puede esperarse, por ejemplo, una crecida o una situación de sequía hidrológica prolongada. En estos casos, las reglas de operación deben modificarse no sólo durante este período sino con un cierto grado de anticipación, lo que obliga a realizar un análisis de gestión para horizontes de largo y mediano plazo antes de definir conjuntos de reglas de manejo y planificación.

### **2.6.1 Diseño de reglas de operación deterministas en sistemas hídricos complejos.**

No existe una metodología única de diseño de las reglas de operación determinísticas, y por lo general el diseño se basa en métodos de simulación y/o de optimización.

Las reglas deterministas pueden establecer de forma clara cuando comenzar las restricciones, por ejemplo, en el momento en que algún indicador alcance algún valor preestablecido, el grado de las mismas (en función del mismo indicador o de otros), y los usos afectados por las restricciones. (Sanchez, 1999).

En sistemas de recursos hídricos sencillos, el diseño de tales reglas deterministas puede ser relativamente factible. En cambio, en sistemas complejos, en los que existen múltiples embalses, elementos de regulación y múltiples usos, deducir y expresar reglas explícitas no es trivial.

Los criterios utilizados para diseñar reglas generales de operación de sistemas hídricos complejos son numerosos. Para describirlos primero se debe clasificar el tipo de sistema del que se trata y los objetivos perseguidos con el control de su operación. Existen reglas elementales tales como aquellas que tratan de mantener el mismo porcentaje de espacio vacío en los embalses del sistema, y que pueden ser utilizadas en sistemas con embalses en paralelo. También, se ha propuesto una

estratificación de los embalses y la priorización del uso de las zonas de almacenamiento así definidas (Loucks y Sigvaldason, 1982).

Una breve reseña de la evolución histórica de los conceptos asociados al diseño de reglas determinísticas de operación de embalses puede comenzarse con los procedimientos de diseño de reglas de operación, Ripple (1883) sugirió un procedimiento gráfico de regla de operación para embalses, el cual dio origen al bien conocido método de Curva o Diagrama de Masas. Rabbit y Donald (1939) modificaron el procedimiento introduciendo los conceptos de demanda estacional en vez de constante (método de la Curva de Masas Residual). Thomas y Burden (1963) sugirieron otra metodología para obtener capacidades de embalses bajo demandas estacionales (algoritmo de Pico Siguiete). Fiering (1967) introdujo la idea de series sintéticas como un medio de reemplazar los registros históricos e introducir la noción de garantía durante el procedimiento de diseño de embalses. Dorfman (1962) introdujo los conceptos de programación lineal para optimizar la operación de un sistema de embalses para provisión de agua. Desde 1980 a la fecha el trabajo por encontrar mejores métodos de diseño de reglas se ha extendido considerablemente (Loucks et al, 1981, Hashimoto et al, 1982, Bayazit y Ünal 1990) entre otros introducen los conceptos de reglas de operación determinísticas normal, conservadora y arriesgada en sus métodos de diseño, F. Estrada, 1991 analiza la variación de los índices de evaluación del fallo tales como la garantía, resiliencia y vulnerabilidad al cambio de un parámetro  $\beta$  utilizado como exponenete en una regla determinista y cuya modificación permite obtener reglas normales ( $\beta=1$ ) conservadoras ( $\beta>1$ ) o arriesgadas ( $\beta<1$ ).

$$\text{Objetivo: } l_{\beta}(R) = \begin{cases} 0 & \text{si } R \geq D \\ \left(\frac{D-R}{D}\right)^{\beta} & \text{si } R < D \end{cases} \quad \left. \vphantom{l_{\beta}(R)} \right\} \text{donde } D = \text{demanda de agua y } R = \text{descarga}$$

El enfoque propuesto es abordar el problema combinando reglas determinísticas sencillas las cuales generan un subespacio de operación dentro del cual se diseñan reglas dinámicas parametrizadas (Nalbantis, Koutsoyiannis, 1992) y optimizar el valor de los parámetros de dichas reglas con el fin de lograr los objetivos y la satisfacción de las restricciones planteadas en una función objetivo definida por el usuario para un caso de toma de decisiones a largo plazo bajo condiciones de certeza en los escurrimientos futuros.

### 2.6.2 Parametrización de reglas

La parametrización de reglas sirve para resolver simultáneamente el tratamiento de varios problemas de control complejos e interrelacionados, tales como: el control de las descargas de embalses en serie o en paralelo, el control de la derivación de agua para usos consuntivos, la evacuación de agua imposible de controlar fuera del sistema y el control del agua almacenada en los acuíferos. Si el sistema estructural posee elementos capaces de controlar el flujo y distribución de agua dentro del sistema hídrico, entonces sus reglas operativas pueden parametrizarse.

En general se observa que para todas las situaciones (estaciones de llenado o vaciado) y todos los elementos de control, las reglas de operación pueden reducirse a una conveniente forma lineal con uno o dos parámetros **a** y **b**. Como antecedente puede mencionarse las reglas parametrizadas utilizadas para control de crecidas y para administrar el agua doméstica e industrial en el área metropolitana de Atenas a través de

un sistema compuesto por dos embalses, un lago natural y dos acueductos. (Nalbantis Koutsoyiannis, 1992).

La parametrización de reglas permite usar la simulación y estimar los parámetros por medio de procedimientos de búsqueda de un valor mínimo o máximo llamado valor óptimo (Loucks, 1981).

Para poder acercarse a una operación más realista, es necesario incorporar restricciones físicas en las reglas lineales de cada elemento de control, tales como mantener almacenamientos de embalses positivos, respetar la capacidad máxima de un embalse, respetar el almacenamiento mínimo (embalse muerto), además de poder subdividir las reglas según estén diseñadas para la estación de llenado (cuando la oferta supera la demanda) o de vaciado (cuando la demanda supera a la oferta).

Por lo general un solo parámetro basta para determinar completamente una regla y la no linealidad suele incluirse en las restricciones. Lo ideal es realizar una prueba de sensibilidad de parámetros a partir de los resultados obtenidos con la función objetivo. La experiencia de Nalbantis y Koutsoyiannis, (1992) indica que en el caso de embalses en serie, un solo parámetro por embalse es suficiente.

En los casos en que las variaciones plurianuales de almacenamiento son más importantes que las estacionales, no se justifica la existencia de dos conjuntos de parámetros. En estos casos es suficiente ajustar un único conjunto de parámetros invariante en el tiempo.

### **2.6.3 Optimización de reglas de operación en sistemas hídricos complejos**

Los métodos de optimización de reglas de operación de sistemas hídricos complejos, están subordinados al tipo de problema de toma de decisión que debe afrontar el gestor para seleccionar las distintas alternativas de gestión que le presenta el sistema. Existen tres tipos principales de problemas de toma de decisión, los cuales se

diferencian según si la decisión se realiza bajo condiciones de certeza, condiciones de riesgo o condiciones de incertidumbre.

En el caso de las decisiones bajo condiciones de certeza, el gestor debe decidir entre distintas alternativas, cuyos beneficios asociados se conocen. Puede ser que el beneficio asociado o un resultado tal como un índice de evaluación de fallo del sistema de cada alternativa, esté compuesto por varios atributos (beneficios, penalizaciones, ocurrencia de fallo, resiliencia, vulnerabilidad) asociados a cada uno de los propósitos del sistema. Cuando dichos propósitos y/o atributos son incompatibles, se puede resolver el problema dando un peso o ponderación a cada atributo y definiendo un valor de utilidad tal como:

$$U = [p]^T \cdot [e]$$

donde  $[p]$  = vector de pesos y  $[e]$  = vector de atributos.

La idea consiste en utilizar técnicas de optimización que permitan hallar el mejor valor de utilidad (U) para los pesos asignados.

En el caso de decisiones bajo condiciones de riesgo, no se conoce el curso futuro de los acontecimientos. Solamente se sabe que una determinada decisión puede llevar con cierta probabilidad a diversos resultados. O sea, se conoce la probabilidad de ocurrencia de los resultados asociados a las alternativas, dado que dicha alternativa es el curso elegido de acción. La etapa de decisión, la alternativa y el resultado, se combinan para formar árboles de decisiones y se deben calcular los valores esperados de cada alternativa. La optimización entonces se concentra en elegir el valor esperado más alto entre las distintas alternativas. Las personas tienen una aversión al riesgo que no es lineal. La pendiente de la curva de aversión al riesgo disminuye rápidamente para valores positivos de la ganancia o utilidad. Se pueden seguir entonces dos caminos 1) usar valores absolutos de utilidad y maximizar el valor esperado o 2) usar valores

normalizados de utilidad y maximizar la utilidad esperada. Ambos criterios pueden dar resultados diferentes.

Por último, existen situaciones donde las decisiones deben tomarse bajo condiciones de incertidumbre. En este caso, se desconoce la probabilidad de ocurrencia de los resultados y se puede considerar que los resultados son los mismos para todas las alternativas. Es conveniente entonces, representar el problema en forma matricial donde cada elemento de la matriz corresponde a un valor asociado con la ocurrencia de un resultado dado que se elige una alternativa. Existen distintos criterios para elegir alternativas en estas condiciones, entre los cuales se puede mencionar el criterio de maximización del mínimo valor (MaxMin); el criterio de maximización del máximo valor (MaxMax); el criterio de compromiso (Hurwicz); el criterio de arrepentimiento y el criterio de Laplace que supone todos los resultados igualmente probables.

Este proceso de toma de decisiones es por naturaleza complicado. El identificar las opciones disponibles u oportunidades para la toma de decisión no es, en general, una tarea trivial. Asimismo, seleccionar el o los criterios que reflejen adecuadamente el propósito inherente al problema de decisión considerado puede ser un trabajo formidable. Basta pensar en cualquiera de las decisiones que debemos afrontar diariamente para darse cuenta lo difícil que puede ser el explicitar nuestros objetivos y los conflictos que pueden existir entre ellos. Ahora bien, una vez conocidas las opciones de decisión disponibles, y establecidos los criterios de evaluación, el problema consiste en derivar un procedimiento que permita escoger la o las opciones más convenientes de acuerdo a estos criterios. En otras palabras determinar la mejor opción. Este proceso se denomina *optimización*.

Dada la estructura altamente no lineal de los sistemas hídricos complejos, la programación no lineal es la herramienta más adecuada para encontrar la alternativa óptima. No existe un algoritmo universal que sea siempre el más conveniente para resolver la optimización de cualquier problema de programación no lineal. Algunos de

los más utilizados son los algoritmos iterativos de ascenso; Fibonacci; Newton; Polinomiales; Gradiente; Direcciones Conjugadas; Gradiente Parcial Conjugado; de métrica variable y de coordenadas entre otros (B. Philippi,1988) (J. Márquez Diez,1987). Estos algoritmos se pueden clasificar en términos generales en aquellos métodos que impliquen solamente el uso de valores de función (Búsqueda directa); los que implican el uso de las primeras derivadas parciales únicamente (Gradiente) y aquellos que requieren además las segundas derivadas parciales (Newton-Raphson). Todos estos métodos tienen ventajas y desventajas y no es fácil decidir cuál es mejor en una situación particular. En el caso multidimensional, los métodos de solución consisten generalmente en una secuencia de pasos, cada uno dedicado a buscar a lo largo de un línea (K.V. Mitdl,1984).

#### **2.6.4 Valoración e introducción de restricciones operativas.**

La no linealidad en la estructura matemática del modelo de un sistema hídrico complejo, está presente en todas aquellas funciones no lineales que representan la relación entre las variables del sistema, tales como el proceso de formación de transformación de precipitación (sólida y líquida) en escorrentía; las curvas cota-volumen-area de los embalses; las ecuaciones que representan la interacción entre río y acuífero, o entre embalses y acuíferos, la generación de energía; o la no linealidad presente en la relación entre el agua entregada en exceso a las áreas cultivadas y el aumento de áreas anegadas. Sin embargo, un alto grado de no linealidad también está presente en las restricciones de operación impuestas por la propia física de los elementos de control del sistema hídrico; las restricciones impuestas por el entorno y las reglas derivadas de las imposiciones sociales y ambientales vigentes que afectan el funcionamiento del sistema.

Aún en sistemas complejos como los que se proponen analizar, existen algunas reglas operativas determinísticas sencillas de implementar, en situaciones bien definidas. Es aconsejable incluir en el modelo de simulación estas reglas que serán



invariantes durante la simulación y son utilizadas para crear el marco o región satisfactoria de operación dentro del cual la parametrización de las reglas de control permite generar distintas opciones de operación posibles.

No existen criterios generales para determinar y dar valor a este conjunto de reglas o restricciones necesarias para acotar el espacio de búsqueda de los planes alternativos, ya que el mismo dependerá siempre de las características propias del sistema analizado y de los objetivos planteados para la gestión del mismo.

En suma, el problema quedará restringido por igualdades y desigualdades que formarán las restricciones del problema de optimización a resolver. Existirán entonces en el modelo matemático desarrollado dos sistemas de restricciones, un sistema de restricciones operativas que es el marco necesario para establecer un subespacio de alternativas posibles (franja de opciones disponibles) y un sistema de restricciones a los parámetros de las reglas de operación de los elementos del sistema controlables que fijarán las restricciones de búsqueda de los parámetros óptimos de operación.

La convergencia a un óptimo global en problemas complejos como el descrito no es obvia y debe analizarse si existen para los distintos algoritmos de búsqueda de óptimos las condiciones necesarias y suficientes para asegurar la convergencia global. Sin embargo, puede darse el caso también, que en ciertos casos, a pesar de no estar seguros de que se ha logrado la convergencia global, la solución encontrada, aún tratándose de un mínimo local, pueda conformar a los objetivos de la gestión, en cuyo caso la solución no exigirá mayores esfuerzos.

### **III. GESTIÓN DE UN SISTEMA HÍDRICO MULTIPROPÓSITO**

#### **3.1 Introducción**

La gestión de sistemas hídricos multipropósito se aborda usando el concepto de análisis de sistemas. Los complejos sistemas hídricos están formados por múltiples partes o subsistemas. Todo sistema a su vez es parte de un sistema mayor, en este caso, el sistema hídrico multipropósito está inmerso en una cuenca hidrográfica la cual es su sistema mayor. Todo análisis de sistemas debe tomar en cuenta cual es la posición del subsistema dentro del sistema que lo incluye, cuáles son las partes que lo forman y las interacciones entre las mismas.

Estas relaciones entre subsistemas con un sistema más amplio que los incluye, frecuentemente son de naturaleza jerárquica o de niveles múltiples. Resulta importante determinar la estructura y jerarquía de un sistema y los niveles dentro de la jerarquía que corresponden a cada parte integrante del mismo, ya que las variables asociadas a cada subsistema y las funciones que realiza que fijan sus características de operación, que trata de analizar o determinar el analista, dependen de su nivel jerárquico dentro del sistema general.

La operación conjunta de un sistema depende de la coordinación entre los subsistemas. La coordinación entre subsistemas se basa en la información que recibe la unidad de control. La forma de control y la naturaleza de la información que debe manejarse para poder controlar y coordinar entre sí los diversos subsistemas de una estructura jerárquica dependen de los objetivos, de las funciones de control y de las restricciones del sistema. Una forma de ejemplificar la forma de control es a través de pirámides de jerarquía de las funciones de control (Figura 3.1).

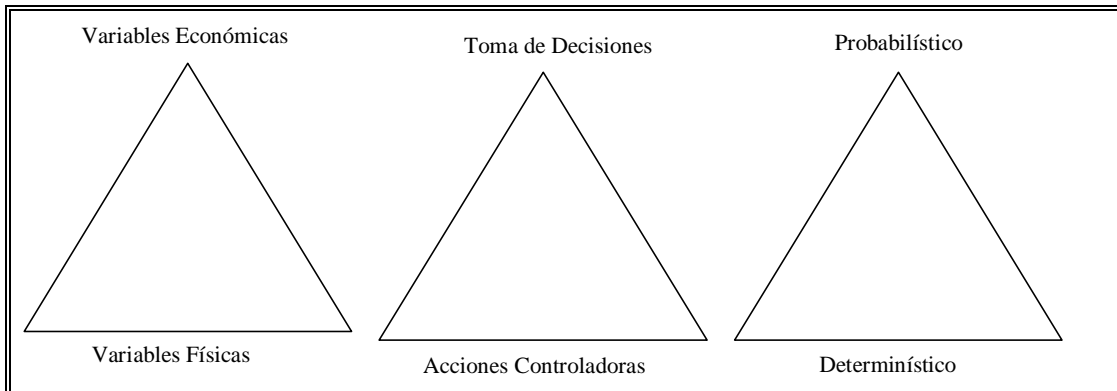


Figura 3.1: Pirámides de jerarquía para un sistema de control

Puede observarse que, a medida que se avanza hacia la cúspide, el énfasis en las variables físicas disminuye, y aumenta la importancia de las variables económicas en el proceso de toma de decisiones o funciones de control. Un ejemplo concreto de ello se da en las centrales de generación hidroeléctricas cuyo control mediante gobernadores y reguladores se basa, exclusivamente en variables físicas, mientras que al nivel de producción, el despacho económico se realiza en función de variables físicas y económicas. Otra característica del control de sistemas es la frecuencia decreciente de las acciones controladoras y la creciente complejidad del proceso de toma de decisiones al ascender a través de la jerarquía de control. Debe notarse también que, dentro del primer nivel, los problemas de control son determinísticos, mientras que se vuelven crecientemente probabilísticos al ascender a través de la jerarquía del sistema de control. Por lo tanto el tipo de problema de gestión a resolver dependerá del nivel jerárquico al que se plantee el estudio del sistema y de sus subsistemas. En general los problemas a resolver se encuentran en un punto intermedio entre la base y la cima de la pirámide, es decir son problemas en que intervienen tanto variables físicas como económicas y la toma de decisiones incluye procesos de control de naturaleza tanto determinística como estocástica.

Las formas de jerarquizar los sistemas puede ser muy variada, siendo las subdivisiones más comunes las de nivel, las de tiempo y las de modo.

Una **subdivisión de nivel** clásica se da en los sistemas de riego (canales principales, secundarios, terciarios, y acequias de aplicación del agua dentro de la parcela). Es decir, en el caso de sistemas de riego se puede tener distintos niveles de complejidad de la representación del sistema y subsistemas que lo forman, y lo mismo puede hacerse con el grado de detalle con que se requiera estudiar cada subsistema, (embalses, acuíferos, elementos de derivación, sistemas de bombeo, sistemas de drenaje y centrales de generación).

La **subdivisión de tiempo** surge del amplio rango del tiempo de respuesta inherentes a los sistemas, motivada por los cambios en los escenarios a los que se enfrenta. Pueden realizarse paralelamente con la subdivisión de nivel. En el caso de sistemas hídricos se puede hablar de distintos niveles de tiempo:

*Planeamiento*: consiste en determinar las necesidades del sistema durante los próximos años y tomar las medidas estratégicas necesarias para satisfacerlas. Su escala de tiempo es del orden de años.

*Nivel Táctico*: consiste en determinar la respuesta a corto plazo de las acciones consideradas en el plan estratégico. Su escala de tiempo es del orden de meses, semanas o hasta días.

*Nivel de control*: consiste en determinar la acción inmediata de un elemento de control (compuerta de descarga en un embalse, válvula, partidor de caudales, sistema de bombeo, entre otras). Su escala de tiempo es del orden de horas, minutos, segundos. También corresponden a las maniobras de operación de emergencia necesarias para responder a circunstancias inesperadas como crecidas, terremotos, incendios, sequías, etc.

La **subdivisión de modo** está relacionada con la capacidad de los sistemas para trabajar bajo una gran variedad de condiciones, tales como *normales, emergencia, preventivas, arriesgadas y de restauración*. En general el modo normal trata de satisfacer la demanda de agua de los distintos propósitos según el agua disponible en cada momento. En comparación, el modo preventivo o conservador sacrifica parte de la economía para mantener una reserva del recurso agua dentro del sistema para soportar posibles emergencias futuras; en el de emergencia, dicho sacrificio en economía es mayor y se hace para satisfacer el número máximo de clientes. En el modo arriesgado, el sistema da mayor prioridad a la economía sin tener en cuenta el mantenimiento de reservas de aguas para afrontar situaciones de escasez futuras. Cuando el sistema ha tenido una falla grave que ha debido emplear el modo de emergencia, es necesario reparar la falla lo más pronto posible e inmediatamente después, llevar el sistema otra vez al modo normal de operación.

Fijadas las jerarquías de nivel, de tiempo y de modos a ser representadas en el modelo matemático de gestión, una combinación de técnicas de simulación y optimización es la forma más adecuada para la derivación de procedimientos de operación (conjunto de reglas) de un sistema de recursos hídricos con múltiples embalses y múltiples propósitos. La metodología de elaboración de modelos de gestión de sistemas hídricos multipropósito que aquí se presenta es de fácil utilización para sistemas complejos y no necesita de la formulación de una regla de operación explícita, permitiendo al decisor contemplar tanto al sistema en su totalidad como a cada uno de sus subsistemas.

### **3.2 Antecedentes del Método**

Para el desarrollo de la metodología de gestión de sistemas hídricos multipropósito que se expone en el punto siguiente se han tenido en cuenta los conceptos enunciados sobre análisis de sistemas por (Gerez, V. y Grijalva, M. 1995); las

experiencias existentes en el desarrollo de sistemas computacionales dedicados a la gestión de sistemas hídricos complejos algunos de los cuales han sido mencionados en un punto anterior y los trabajos de investigación que sobre temas relacionados a las distintas etapas de gestión de sistemas hídricos han sido realizados previamente (Dolling,1995) (Dölling,1997) (Dölling y Varas,2000).

Con respecto a la metodología para el diseño, validación y test de redes neuronales artificiales, se tomó como antecedentes los incluidos en la descripción del método de elaboración que se presenta en el punto 3.5, el cual resume conceptos metodológicos propios (Dölling, 1999) y derivados de los trabajos de otros investigadores.

Para el desarrollo del sistema computacional elaborado para facilitar la aplicación del método a casos reales, se han tenido en cuenta como antecedentes los conceptos y ejemplos de métodos de elaboración de código para el desarrollo de entornos computacionales y diseño de interfaces en Visual Basic, programación orientada a objetos y programación de controles aportados por las obras de Reselman et al, (1999), Burgos, (1998), Martins Carrizo, (1999) y ejemplos sobre el diseño de interfaces en VBA de Excel incluidos en Wells et al, (1997), entre otros.

### **3.3 Esquema Conceptual del Método**

El esquema conceptual del método se presenta en forma de tabla secuencial (Tabla III.1). En la primer fila se pueden identificar los pasos de la metodología desde la definición del problema hasta la última instancia de toma de decisiones. En la segunda fila se indican los métodos generales utilizados para desarrollar cada uno de estos pasos de los cuales se ha dado una visión general en el punto 3.3.

**Tabla III.1 : Metodología de Análisis de Sistemas**

<b>Pasos</b>	Definición del Problema	Medición del sistema	Análisis de Datos	Modelado de Sistemas	Síntesis de Sistemas	Toma de decisiones
<b>Método</b>	Descripción del Sistema	Jerarquización teoría del valor	Procesamiento de Información	Construcción de Modelos	Simulación y Optimización	Teoría del valor y teoría de decisiones

El esquema metodológico planteado en la Tabla III.1 es general y puede utilizarse para lograr la resolución de cualquiera de los problemas de toma de decisión enunciados. Los problemas a resolver y por ende las técnicas específicas a aplicar variarán de acuerdo a la definición de problema que se haga durante el primer paso del método. Es por ello que las aplicaciones incluidas en la base de herramientas del sistema de apoyo a la gestión elaborado, que se describen en el punto 4.2, permiten apoyar al gestor en la resolución de cualquiera de los problemas a los que pueda enfrentarse el sistema hídrico en el futuro, siguiendo los procedimientos de elaboración pertinentes para cada paso del método e incorporando o implementando las técnicas

específicas que se requieran al caso particular de toma de decisiones que se esté analizando.

### **3.4 Descripción del Método.**

El método de gestión de sistemas hídricos multipropósitos desarrollado, consta de 6 pasos principales: definición del problema, medición del sistema, análisis de información, modelado de sistemas, síntesis del sistema y toma de decisión. La metodología básica requerida para realizarlos consiste en la descripción del sistema, la jerarquización, el procesamiento de información, la construcción de modelos, la simulación y optimización y la aplicación de la teoría del valor y de decisiones.

Todos los pasos de la metodología pueden ser realizados con la ayuda de un entorno de control que sirve como sistema de apoyo a la gestión cuyo código ha sido desarrollado en lenguaje Visual Basic y que denominado SARH-2000, el cual permite al gestor del sistema interactuar con todas las aplicaciones que han sido incluidas para construir un modelo específico del sistema y encontrar el mejor procedimiento de operación. La descripción de esta herramienta y de la interfaz con el usuario se realiza en el capítulo 4.

Los conceptos básicos de los distintos pasos y métodos asociados a la metodología de análisis de sistemas implementada para posibilitar el apoyo a la gestión de sistemas hídricos multipropósitos, se describe a continuación:

- El primer paso consiste en *definir el sistema hídrico y el problema* a resolver. Una parte importante en este paso es la determinación de las fronteras del sistema. Una frontera separa los elementos cuya estructura se desea conocer de aquellos que no se tomarán en cuenta en el estudio, define cuáles variables serán analizadas y cuáles tomadas como datos, lo cual acota las dimensiones del problema. Una vez



determinadas las fronteras debe describirse adecuadamente las partes o subsistemas que se incluirán y conocer la interacción entre ellas, es decir su estructura de relaciones de espacio, tiempo, jerarquía, propiedades lógicas o de toma de decisiones. La información necesaria para definir adecuadamente el sistema y sus relaciones dependerá del grado de detalle y del objetivo con que se quiere llevar a cabo el análisis.

- En el segundo paso se realiza la *medición del sistema* que consiste en establecer los objetivos del análisis, los cuales pueden ser de diversa índole según el sistema y la fase del estudio o de la vida del sistema: económicos (ejemplo: maximización de rendimientos y minimización de costos de operación o producción), distributivos del ingreso (promoción del bienestar de un grupo a expensas de otro a través de la selección de prioridades relativas entre los distintos propósitos), minimización de indicadores de fallo (ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para distintos propósitos y horizontes de explotación), de control ( maximización de la eficiencia en la entrega de volúmenes de agua a los usuarios). En esta etapa de medición, se deben identificar las variables y establecer un inventario de ellas y los criterios de evaluación, o medidas de efectividad de las alternativas de gestión. El establecimiento de dichos criterios y las medidas de efectividad permiten evaluar en qué grado, diferentes soluciones alternativas (procedimientos de operación del sistema) satisfacen los objetivos para los cuales han sido desarrolladas. La solución final del problema depende en forma importante de las medidas de efectividad que se hayan seleccionado.

- El tercer paso realiza el análisis de datos o procesamiento de la información reunida durante la medición del sistema. Su objeto es descubrir, con ayuda de técnicas de reconocimiento de patrones y evaluación estadística de parámetros las relaciones entre las variables involucradas en el problema a resolver.

- El cuarto paso consiste en realizar el *modelado del sistema* cuando en el paso anterior se han llegado a determinar relaciones importantes entre variables. El

objetivo de este paso es establecer relaciones, o modelos, que expliquen las interacciones entre las diversas variables del sistema. (modelo de embalses en serie o en paralelo, modelo de acuíferos, sistemas de derivación y bombeo, modelos de interacción entre embalses y acuíferos, río y acuíferos, modelos de simulación de oferta y demandas de agua, etc.)

- El quinto paso se refiere a la *síntesis de sistemas* es decir a la utilización de los modelos desarrollados en la fase anterior para realizar la generación de alternativas de gestión del sistema, esto es realizar la simulación del comportamiento de soluciones alternativas (obtención de medidas de efectividad). El esfuerzo de generación de alternativas debe concentrarse en aquellas que muestren las mejores medidas de efectividad, tratando sin embargo de explorar el mayor número de alternativas justificables. La exploración de alternativas debe hacerse observando la variación que sufren las medidas de efectividad al cambiar ciertas características del sistema a fin de seguir manejando aquellas que afecten en forma más positiva las medidas de efectividad. Para llevar a cabo dicha exploración se recurre a técnicas de simulación y optimización. Para determinar el grado con que los sistemas cumplen sus objetivos se establecen las medidas de efectividad. Si éstas se pueden reducir a la misma escala y sumarse, es factible establecer una sola función objetivo (medida de efectividad global del sistema). Al existir esta función única, se pueden emplear algunas de las técnicas de optimización no lineal para llegar a la mejor solución. Sin embargo es computacionalmente ineficiente utilizar un modelo de simulación detallado del sistema hídrico desarrollado para realizar, cada vez que se requiera, el paso de generación y evaluación de alternativas. Por otro lado, sería muy complejo tratar de representar en una sola función objetivo las relaciones entre los elementos del sistema al grado de detalle que necesita el estudio de un sistema complejo a fin de evaluar las alternativas de gestión utilizando únicamente optimización. El método que se ha utilizado permite combinar las ventajas de ambos métodos, esto es, el grado de detalle y la eficiencia en la búsqueda de la mejor solución. Para ello se

incluye un paso dedicado a lograr la conexión entre ambas técnicas, encapsulando (ver punto 3.6) el modelo de simulación en una red neuronal artificial que es una combinación lineal de funciones no lineales, la cual puede ser incluida como parte de la función objetivo del modelo de optimización, usado para buscar la mejor alternativa de gestión.

- El sexto y último paso es la **Toma de decisiones**, la cual se debe realizar en el caso en que no sea posible reducir a la misma escala y sumar todas las medidas de efectividad para obtener, empleando la técnica de optimización la solución más adecuada. En estos casos, hay que seleccionar las mejores alternativas, evaluando todas las medidas de efectividad de cada una de ellas, para lo cual se requiere aplicar a éstas la teoría del valor o métodos de análisis multicriterio a fin de decidir entre las posibles opciones. Una explicación más profunda sobre las técnicas a utilizar en esta etapa se presenta en el punto 3.7.

### **3.5 Método de elaboración de redes neuronales artificiales**

Una atención especial se da a la metodología elaborada para realizar el diseño, validación y test de los modelos de redes neuronales artificiales, ANNs, del inglés Artificial Neural Networks.

No existe a la fecha, una metodología única para lograr el diseño y validación de ANNs. Del análisis bibliográfico realizado y la consulta a especialistas se ha logrado reunir el conocimiento necesario para definir una metodología de trabajo para encontrar el diseño y la validación del modelo de predicción seleccionado, para un nivel determinado de confianza referido a la capacidad de generalización. Las fases para elaborar un modelo ANNs con dichas características, se presentan en la (Figura 3.2). Como se puede observar el proceso de elaboración presenta distintas instancias de decisión y prueba que requieren la intervención de un analista y una etapa de validación final que puede conducir a la decisión de volver atrás iterativamente para resolver

problemas identificados en etapas anteriores. Las etapas principales de elaboración son las siguientes:

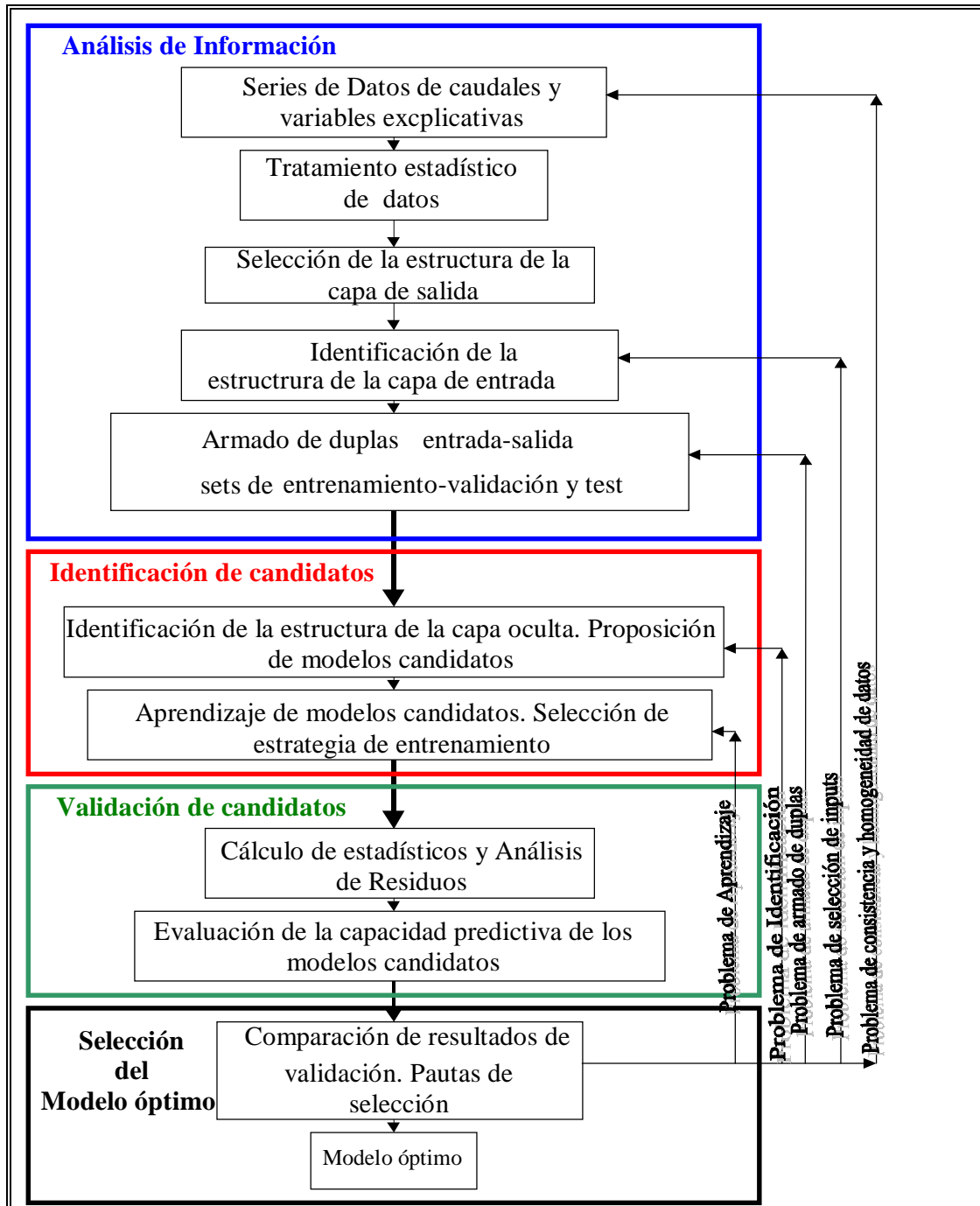


Figura 3.2: Fases de elaboración de un ANNS para predicción hidrológica

## 1 Análisis de la información

Esta fase incluye la recopilación y tratamiento de la información disponible, la selección de unidades de salida, la selección de unidades de entrada y el armado de los conjuntos de duplas de entrenamiento, validación y test.

*a) Recopilación y tratamiento de la información disponible:* En primer lugar debe realizarse la completa recopilación y tratamiento inicial de la información, esto es el análisis de consistencia y homogeneidad de las series de datos existentes (Linsley et al 1988).

*b) Selección de las unidades de salida:* Se puede elegir en este paso dos enfoques según se trate de pronosticar una variable de salida (una unidad de salida) o pronosticar un patrón de variables de salida (varias unidades de salida). La característica a analizar en el segundo enfoque es que el modelo debe ser capaz de interpretar varios fenómenos en forma simultánea.

*c) Selección de las unidades de entrada:* Se debe realizar un análisis de sensibilidad de las variables propuestas como explicativas del fenómeno para determinar la influencia relativa de cada una de ellas sobre la salida. Este paso tiene por objeto definir el número inicial de neuronas en la capa de entrada. Un aspecto adicional es la utilización del método de análisis multivariado por componentes principales (Yevjevich, 1972) a fin de reducir el número de variables explicativas en caso necesario. Es conveniente independizar esta etapa del resto de la elaboración del modelo, dejando para la etapa de validación un análisis más detallado del impacto de las entradas sobre la calidad de los residuos del modelo analizado, lo cual puede derivar en una reconsideración de la selección de entradas hecha en esta etapa.

Esta fase busca definir la arquitectura mínima de los modelos que permita acotar, de una manera lógica, el espacio de hipótesis para disminuir los tiempos de entrenamiento lo que impactará directamente en el tiempo de ejecución de la investigación y en la precisión del modelo final obtenido. (Pinto, 1998), (Dean et al, 1995), (Zealand et al, 1999).

d) *Armado de conjuntos de duplas de entrenamiento, validación y test.* Una vez seleccionadas las variables de entrada se arman las duplas (patrones entrada-salida) constituidas por los datos de las variables explicativas correspondientes a cada ciclo hidrológico más un indicador de clase del ciclo hidrológico. En total se tendrán tantas duplas como ciclos hidrológicos disponibles (modelo de predicción de volúmenes de escurrimiento) o casos de alternativas de gestión simuladas (encapsulamiento del modelo de simulación). A veces, para las redes de predicción es conveniente la clasificación del ciclo hidrológico en tres grandes clases *normal*, *seco* y *húmedo* de acuerdo al volumen de escurrimiento total observado. En casos de tener pocas duplas de entrenamiento se aconseja utilizar la estrategia cross-validation que para el método backpropagation propone Mitchel, (1997). La selección de las duplas que formarán cada uno de los conjuntos de entrenamiento, validación y test debe ser tal que aseguren la capacidad predictiva de los escenarios abarcados por los datos observados.

El dato de clase correspondiente al tipo de año a ser pronosticado debe, a su vez, ser calculado por medio de una red neuronal paralela, entrenada y validada para tal fin con las mismas entradas explicativas del fenómeno, pero sin incluir la entrada número de clase. La inclusión de este tipo de indicadores como entrada permite lograr mejores resultados en la precisión de los pronósticos de redes (Zealand et al, 1999), (Dölling, 1999).

## **2 Identificación de los modelos candidatos:**

Esta etapa aborda la selección del número de neuronas en la capa oculta, el aprendizaje de los modelos candidatos, la validación y evaluación de la capacidad predictiva y la selección del modelo óptimo.

a) *Selección del número de neuronas en la capa oculta:* Para realizar la selección del número de unidades ocultas se pueden utilizar distintos métodos. Para las redes feedforward, es posible utilizar el algoritmo Cascade-Correlation desarrollado por Scott, Falhman y Lebiere (1990). Una descripción del algoritmo se puede encontrar en

Zell et al –SNNS- (1995). Básicamente este algoritmo combina la idea de ir incrementando la complejidad de la arquitectura (número de neuronas ocultas) y el aprendizaje en el mismo proceso de entrenamiento, analizando el mejoramiento producido en la suma de los errores cuadráticos de los valores de salida (Tabla III.2). Este proceso dinámico de expansión de la red continúa hasta que el problema se considera suficientemente aprendido. Este meta-algoritmo tiene la ventaja respecto al algoritmo de backpropagation común que es un orden de magnitud más rápido (Karunanithi et al, 1994). En el caso de la red Elman se puede utilizar el algoritmo Recurrent-Cascade-Correlation (RCC). A las arquitecturas identificadas como ganadoras se les puede además practicar un proceso de podado de conexiones innecesarias por medio del algoritmo Magnitude Based con el objeto de lograr topologías más escuetas, con menor número de pesos (Abrahart et al, 1998). La idea es, reducir lo más posible la expresividad de la red (mejora la capacidad de generalización) pero a la vez aumentar la eficiencia en el procedimiento de búsqueda, para encontrar aquella arquitectura que sin producir un sesgo inductivo demasiado fuerte permita que la búsqueda se realice en tiempos razonables (Pinto, 1998). Una vez identificadas las neuronas necesarias para cada una de las tres capas, quedan constituidos los modelos candidatos para la etapa de selección del modelo óptimo.

b) *Aprendizaje de los modelos candidatos.* Las ANNs pueden ser usadas para aprender, por medio de un algoritmo de aprendizaje, que modifica algunos de los parámetros (pesos de los enlaces y desvíos) que describen los componentes de la estructura de la red. El conjunto de pesos modificables define un espacio de parámetros cuya dimensión está definida por el número de pesos a ajustar. Un modelo de red con un conjunto de pesos ajustables define un **espacio de hipótesis** que corresponde a una familia de funciones (Dean et al 1995). Una vez definido el espacio de hipótesis, el encontrar la mejor hipótesis dentro del espacio implica definir una **estrategia de control**, que permita aplicar reglas para encontrar una solución. En general esta estrategia se basa en establecer una función de error cuyo mínimo se busca, tal como en un problema de



optimización no lineal. Dicha función es la fórmula de la suma de errores cuadráticos entre los valores respuesta de la red y la respuesta buscada y el método de búsqueda se debe seleccionar de tal forma de asegurar encontrar una solución óptima que satisfaga las expectativas de pronóstico. Se sugiere aplicar en este trabajo los métodos de aprendizaje: Backpropagation momentum (basado en el método del descenso de gradiente) para las redes feedforward; el método Recurrent Cascade Correlation para el entrenamiento de las redes Elman; el algoritmo de aprendizaje Radial Basis Learning para las redes del tipo radial Basis Function. (Zell et al –SNNS-, 1995). Tanto la función de inicialización de pesos y el modo de actualización de los mismos durante el entrenamiento, dependerá del tipo de método de aprendizaje elegido (Zell et al –SNNS- 1995). Para evitar el fenómeno de sobreentrenamiento (overfitting), típico en redes feedforward entrenadas con el algoritmo backpropagation momentum se sugiere la estrategia de entrenamiento propuesta por Mitchell (Mitchell 1997 pp.127) destinada a casos con escasos ejemplos de entrenamiento, y cuyos buenos resultados se han constatado (Dölling, 1999) y (Dölling, 2000).

*Validación y evaluación de la capacidad predictiva.* El procedimiento de validación se basa en un conjunto de análisis a realizar sobre los residuos (valores calculados como la diferencia entre los valores de escurrimiento observados y los calculados por la red) generados por cada modelo para los distintos conjuntos (entrenamiento, validación y test). También se usa como indicador de comportamiento el número de ciclos necesario para lograr un entrenamiento que asegure una buena generalización. Los estadísticos que se acostumbra a usar son: SSE, S4E, MAE, COE, RMSE, ARV,  $R^2$  (Tabla III.2). Ellos se usan para comprobar en los modelos: el grado de ajuste a los datos de entrenamiento, la capacidad de generalización fuera del conjunto de entrenamiento y problemas de sobreentrenamiento, la sensibilidad a las condiciones iniciales, el efecto del error de muestreo inducido por usar una especificada combinación de conjunto de entrenamiento y validación, el ajuste del modelo a valores máximos o medios (Abrahart&See 1998). Se propone además un método original para evaluar la consistencia de las duplas de

entrada–salida, el cual consiste en someter a la red a sucesivos entrenamientos con una configuración especial de duplas que permite identificar aquellas duplas que presenten problemas de convergencia las que deben ser analizadas en detalle para detectar posibles inconsistencias con duplas provenientes de ciclos hidrológicos similares. En caso de encontrar un comportamiento atípico de la dupla respecto las demás, se debe analizar la sensibilidad de la red con la exclusión de dicha dupla del conjunto (Dölling, 1999).

**Tabla III.2 : Estadísticos utilizados para la comparación de modelos**

Concepto	Nombre	Fórmula
Suma de errores cuadráticos medios	SSE	$\sum_i (obs - calc)^2$
Error de orden 4	S4E	$\sum_i (obs - calc)^4$
Error Absoluto medio	MAE	$\frac{\sum_i  obs - calc }{N}$
Raiz cuadrada de SSE	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_i (obs - calc)^2}{N}}$
Coefficiente de Eficiencia	COE	$E = 1 - \left( \frac{\text{Varianza residuos}}{\text{varianza datos originales}} \right)$
Varianza relativa promedio de los errores	ARV	$\frac{\sum_i (obs - calc)^2}{\sum_i (obs - prom.obs)^2}$
Eficiencia de ajuste del modelo	R <sup>2</sup>	$\frac{\sum_i (calc - prom.obs)^2}{\sum_i (obs - prom.obs)^2}$

c) *Selección del modelo óptimo:* Las topologías de red validadas anteriormente para cada uno de los cinco tipos estudiados se comparan a efectos de seleccionar el modelo de mejor comportamiento a los fines del pronóstico requerido.

Para ello se procede a realizar una serie de análisis comparativos del poder de predicción y tendencias hacia la sobre predicción o sub predicción de valores extremos mediante el análisis visual de gráficos de series calculadas y observadas, un análisis de dispersión gráfica de valores calculados versus valores observados; el análisis de independencia y normalidad de residuos; un análisis de auto correlación y correlación cruzada de residuos, análisis de indicadores como el % de predicciones correctas, % de predicciones bajas, % predicciones altas referido a caudales observados. Cada uno de estos índices y gráficos corresponden a indicadores de la respuesta de distintas características asociadas a los modelos, a partir de los cuales se pueden obtener, sobre la base de pautas predefinidas de correcto comportamiento, elementos de juicio para decidir cual de los modelos validados en c) ha capturado mejor la información predecible en los datos utilizados para su entrenamiento. Si el comportamiento de los residuos se asemeja a una serie de ruido blanco (no se rechaza la hipótesis de normalidad, autocorrelación y de promedio nulo), existirá una adecuación entre el modelo identificado y los datos. Si se detecta algún coeficiente de autocorrelación de la serie de residuos que supere un determinado nivel de confianza, ello puede indicar problemas en la identificación de las variables de entrada o una arquitectura defectuosa de la red que no logra capturar toda la información predecible.

### **3.6 Utilización conjunta de métodos de simulación heurística y métodos de optimización.**

Los enfoques utilizados para apoyar a la selección de alternativas que satisfacen mejor los objetivos de gestión de complejos sistemas hídricos, pueden clasificarse en dos grupos que son complementarios entre sí. Ellos son: los modelos de simulación y los modelos de optimización.

A través de la simulación se puede representar detalladamente todos y cada uno de los componentes del sistema, analizar el impacto de distintos planes de gestión propuestos y descubrir la mejor regla de operación entre las alternativas posibles. Sin embargo, generalmente hay demasiadas alternativas a ser simuladas y comparadas lo cual limita la capacidad de esta técnica en cuanto a su uso como mecanismo de búsqueda, por los tiempos de simulación requeridos. Por ello, es frecuente recurrir a modelos de optimización para buscar la alternativa más adecuada. Sin embargo, esta búsqueda requiere de la construcción de una función objetivo que para sistemas complejos no es obvia y que en general resulta ser demasiado rígida para representarlo convenientemente, limitando el ámbito de aplicación de esta técnica a problemas simples.

Hoy en día, los avances en la ciencia de la computación brindan la posibilidad de elaborar modelos de simulación más complejos, combinados con modelos de optimización. En esta investigación, se presenta un método que permite construir un sistema computacional que combina y potencia las bondades de ambas técnicas, la de simulación y la de optimización, en la búsqueda de la alternativa de gestión más adecuada. Para lograr esto, se ha aprovechado la capacidad de los modelos de redes neuronales artificiales que permiten entrenarse para encapsular, en una combinación de funciones no lineales, un detallado y complejo modelo de simulación del sistema constituido por ecuaciones, restricciones y reglas lineales y no lineales, e incorporar luego dicho modelo de red neuronal, como parte de la función objetivo de un modelo de

optimización no lineal que puede ser usado para encontrar la alternativa óptima dentro de las restricciones y objetivos de optimización de la gestión. Esta metodología de búsqueda de políticas óptimas de gestión, posee las bondades de ambas técnicas complementarias, entregando un sistema computacional libre de las limitaciones mencionadas.

El denominado encapsulamiento de un modelo de simulación complejo en una red neuronal artificial, se basa en la capacidad de entrenamiento de las redes neuronales multicapa de tal manera que los pesos de los enlaces representen información que será utilizada por la red para producir las mismas respuestas (salidas) que el modelo de simulación, sometida a la misma información de entrada. El proceso de entrenamiento utilizado para el encapsulamiento es el mismo descrito en la metodología de elaboración de ANNs presentada en el punto 3.5, un ejemplo de encapsulamiento de un complejo modelo de simulación en una red neuronal se presenta en el punto 5.5.4.

El principal problema a abordar en el encapsulamiento es el aprendizaje de la red neuronal. El sistema para la representación del conocimiento empleado por las redes neuronales es bastante opaco, ya que las redes deben aprender sus propias representaciones puesto que programarlas a mano es imposible ( Rich & Knight, 1996). El método backpropagation, es uno de los métodos más utilizados para dirigir un aprendizaje de una red neuronal del tipo feedforward. La existencia de unidades ocultas permiten que la red pueda desarrollar complejos detectores de características o de representaciones internas. Esta capacidad ha sido aplicada para resolver complejos problemas tales como el reconocimiento de caracteres alfanuméricos. Se ha utilizado con éxito a las redes neuronales para abordar problemas como el del reconocimiento de caracteres escritos a mano, en donde la red neuronal no sólo aprende a clasificar las entradas para las que está entrenada, sino que generaliza y es capaz de explicar las entradas que todavía no ha visto. El encapsulamiento entonces, se basa en aprovechar esta capacidad de las redes neuronales de realizar tareas de clasificación como el ejemplo de reconocimiento de caracteres. La idea subyacente tras el encapsulamiento de

complejos modelos numéricos de simulación, radica en ajustar los pesos de una red neuronal presentándole un cierto número de pares (entrada/salida) generados con el modelo de simulación a encapsular, siguiendo el proceso de entrenamiento backpropagation descrito detalladamente en el punto 2.3.

El correcto encapsulamiento debe garantizar la capacidad de generalización de la red una vez que se le han presentado durante el entrenamiento todos los ejemplos (entrada/salida) generados con el modelo de simulación. La red probablemente encontrará un conjunto de pesos que haga corresponder las entradas con las salidas, sin embargo, si la cantidad de ejemplos entregados a la red no es suficiente no podrá lograr dicha capacidad de generalización. En un caso extremo, es posible que una red con suficientes enlaces y un proceso suficientemente largo de entrenamiento sea capaz de almacenar conjuntos de entrenamiento completos, donde el algoritmo backpropagation permita aprender a asignar una unidad oculta a cada patrón de entrada distinto del conjunto de entrenamiento, memorizando los pares de entrada /salida en lugar de establecer los pesos que describen de forma general la correspondencia para todos los casos. Este fenómeno se conoce con el nombre de sobreentrenamiento (overfitting ver punto 3.5) y por supuesto es una potencia de las redes que no es deseable. En el punto 5.5.3 se discuten los aspectos a tener en cuenta para diagnosticar y evitar este fenómeno.

En los capítulos siguientes se describe la metodología y las etapas de la elaboración de dicho sistema computacional, presentándose también un análisis de la síntesis del sistema bajo condiciones de certeza para un sistema hídrico real.

### **3.7 Diseño de Funciones Objetivo Ponderadas**

Un sistema de apoyo a la gestión debe dar al usuario todas las capacidades necesarias para permitir plantear en forma sencilla la búsqueda de la alternativa de gestión óptima para cualquier situación que pueda presentarse durante la etapa de explotación del sistema. La herramienta de apoyo a la gestión de estos sistemas debe incluir facilidades para que el usuario pueda, no solo implementar ágilmente los cambios

estructurales en el modelo de simulación, sino también personalizar la búsqueda de alternativas óptimas de gestión acorde a la realidad actual del sistema en cuanto a la prioridad de usos y sus objetivos particulares. Esta necesidad surge dada la naturaleza dinámica de la estructura propia del sistema de recursos hídricos, de sus demandas, de sus objetivos particulares y de los cambios en la importancia relativa entre los distintos propósitos del aprovechamiento del agua.

En este sentido, el sistema SARH-2000 desarrollado, tiene las capacidades de personalizar la búsqueda de alternativas óptimas ajustándose a la realidad actual de relación entre propósitos y adecuar los objetivos de cada propósito a través de la ponderación que el usuario decida dar a los índices de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para cada uso del agua.

Esta capacidad de adaptación a la dinámica del sistema y de los usos del agua se logra independizando la ecuación de ponderación de propósitos y de índices de evaluación de fallo, del modelo de simulación propiamente tal. Estos valores de ponderación o pesos se introducen en la etapa de elaboración de la función objetivo.

La ponderación de propósitos y de índices de evaluación de fallo para cada propósito, es una función de los objetivos perseguidos por la gestión a nivel de sistema integral en el primer caso y a nivel de cada propósito particular en el segundo. No existe ninguna regla definida para la selección de tales pesos. La dimensionalidad del problema de caracterización de una situación específica a la que se enfrentará el gestor del sistema es del orden de  $N \times M$  donde  $N$  es el número de propósitos del sistema y  $M$  el número de índices de evaluación de fallo incluidos. En el caso del sistema SARH-2000 desarrollado, se incluyen 5 propósitos y 3 índices por lo que la dimensionalidad es de 15, que es la cantidad de pesos que definen cada situación de búsqueda de la alternativa óptima. El alto grado de complejidad del problema exige que los encargados de la operación del sistema integral multipropósito y el responsable de cada propósito en particular deban reunirse para definir estos  $N \times M$  pesos, que formarán parte de los

objetivos perseguidos con la gestión, para el horizonte de tiempo a analizar. Una vez definidos estos pesos, la función objetivo ponderada queda completamente especificada y puede utilizarse para buscar la regla de operación óptima dentro del espacio de búsqueda generado por las restricciones de los parámetros de las reglas operativas de los elementos del sistema que se decidan controlar.

En particular el método utilizado en la formulación de la función objetivo ponderada, permite aplicar los fundamentos matemáticos de las técnicas de programación multicriterio (Multicriteria Decision Analysis). El problema de selección entre infinitas soluciones alcanzables obliga a definir un criterio o criterios de ordenación para poder expresar las preferencias del decisor con relación a cada solución alcanzada. Tradicionalmente dicha ordenación se realizaba mediante la consideración de un único criterio, con lo que se plantea un problema de búsqueda, pero no de elección. Sin embargo, esta estructura no se ajusta a lo que ocurre en los procesos reales de toma de decisiones, ya que salvo casos particulares, los problemas reales se plantean bajo múltiples criterios, que en la mayoría de las ocasiones presentan un claro conflicto entre ellos. En respuesta a este enfoque surge la programación multicriterio. Son numerosos los autores que han abordado el estudio de la programación multicriterio (Hwang Nasud, 1979); (Zeleny, 1982); (Chankong y Haimes, 1983) (Romero y Rehman, 1989).

Los métodos de decisión multicriterio pueden dividirse, entre otros, en dos grandes enfoques: la programación por metas y la programación multiobjetivo. Sus fundamentos son:

*a) Programación por metas:* Fue introducida por Charnes y Cooper (1961). Se basa en la asignación subjetiva de los niveles de aspiración de cada atributo (*valor social que el decisor asigna a una realidad*), siendo su objetivo la minimización de la desviación existente entre el nivel de logro real y su nivel de aspiración. Según la actitud



que el decisor adopte frente a sus aspiraciones y a las desviaciones correspondientes, se puede hablar de:

*a.1) Programación por metas lexicográficas:* si el decisor es capaz de jerarquizar sus aspiraciones estableciendo prioridades sucesivas. En este enfoque se considera que una prioridad es absolutamente preferida a la jerarquizada en órdenes posteriores.

*a.2) Programación por metas ponderadas:* cuando el decisor pondera la importancia de las desviaciones de los niveles de aspiración y busca minimizar la suma de dichas desviaciones ponderadas.

*b) Programación multiobjetivo:* Este tipo de técnicas, plantean la optimización simultánea de varios objetivos. Al no ser factible el definir un óptimo cuando existen objetivos en conflicto, la programación multiobjetivo trata de generar soluciones eficientes.

En la actualidad ambos enfoques, programación por metas y programación multiobjetivo se encuentran prácticamente unidas, considerándose un único enfoque, la programación multicriterio.

Dentro de este enfoque se encuentra la programación multicriterio interactiva (Romero y Rehman, 1989). En ella el analista interactúa con el decisor e introduce en el modelo las respuestas obtenidas. De esta forma, se genera otra solución que nuevamente es planteada al decisor para que la evalúe.. Este ciclo se repite hasta que el decisor considere que la solución alcanzada es satisfactoria o hasta que no se puedan generar nuevas soluciones de acuerdo a sus preferencias.

Solo se ha querido hacer en este punto una breve referencia a la programación multicriterio como uno de los enfoques mas utilizados de entre una gran cantidad de métodos de toma de decisión posibles. En realidad, cada sistema hídrico

tiene, o debería poseer, su propio esquema de decisiones particular. Es, por lo tanto, responsabilidad de los encargados de tomar decisiones implementar junto al analista aquel método de toma de decisiones que se considere más conveniente en esta etapa de elección de los pesos relativos de las prioridades de los distintos propósitos y de las ponderaciones de los índices de comportamiento de cada propósito.

### **3.8 Implementación del proceso de búsqueda de soluciones**

En todo problema enfocado a la búsqueda de soluciones , el espacio de búsqueda está formado por el espacio de estados factibles y las reglas de transición entre estados lo que permite definir a un problema como el cambio de una situación a otra a través de una o más operaciones válidas y definir el proceso de resolución o búsqueda como una combinación de técnicas que permiten buscar un estado final deseado, siendo la solución ya sea un estado del espacio o la trayectoria de solución misma.

El Análisis de sistemas presenta dos enfoques tradicionales de búsqueda de alternativas de operación óptima de un sistema: La simulación y la optimización. Ambas técnicas se diferencian tanto en la forma de definir matemáticamente el espacio de estados como el proceso de búsqueda.

En Simulación, el espacio de estados es generado a partir de funciones que relacionan las variables, parámetros que definen físicamente los fenómenos y los componentes del sistema y las reglas de operación, lo cual se constituye en un complejo modelo de procesos. La generación de distintos escenarios de oferta y demanda de agua permite simular los valores de las medidas de efectividad global del sistema (MEGS) para una regla de operación dada ó, dado un escenario de ofertas y demandas de agua generar estados para distintas reglas de operación alternativas válidas. Este enfoque permite a través de técnicas de búsqueda aleatoria o sistemática encontrar la mejor alternativa de operación entre las simuladas.

El enfoque de optimización, define el espacio de estados a través de una función objetivo continua y diferenciable cuyo valor se desea minimizar o maximizar, la cual representa completamente al problema a resolver. El proceso de búsqueda necesita que dicha función objetivo sea diferenciable para poder aplicar algoritmos de búsqueda matemática como el del gradiente, estando la búsqueda sujeta a ciertas restricciones impuestas a las variables de decisión del problema.

Uno de los aportes de esta investigación es demostrar que se pueden integrar ambos enfoques en un nuevo enfoque que brinda la posibilidad de desarrollar un modelo que posea las ventajas de ambos métodos en forma simultánea, tal como se indica en el punto 3.6.

El encapsulamiento del modelo de simulación en un modelo de red neuronal, permite incorporar en la función objetivo un modelo continuo y diferenciable del espacio de estados generado por el modelo de simulación.

La figura 3.3 muestra un diagrama de bloques que representa la estructura del proceso de búsqueda de soluciones implementado bajo este nuevo enfoque que combina las técnicas de simulación y optimización.

El proceso de búsqueda se inicia con la elaboración de una base de información de las variables que se necesitan tener en cuenta en el problema a resolver, en particular las variables hidroclimáticas de la cuenca, dicha información es utilizada para elaborar los modelos de pronóstico de escurrimiento superficial utilizando la técnica de redes neuronales artificiales. Si se genera sintéticamente las variables climáticas explicativas del escurrimiento, se podrán generar a través de este modelo, series sintéticas de escurrimiento para un horizonte de tiempo dado.

Otros datos necesarios para la elaboración del modelo de simulación son las características de los atributos y la definición de los enlaces entre objetos y variables, interacción entre variables y medidas de efectividad que se deseen incluir en el

problema. Esta información unida al conjunto de reglas de operación determinísticas que fijan ciertas condiciones y restricciones al espacio de estados factibles y a un conjunto de reglas de operación parametrizadas de aquellos elementos que el analista ha seleccionado como elementos de control dentro del sistema (embalses, compuertas derivadoras, sistemas de bombeo, etc.) permiten diseñar el modelo de simulación continua.

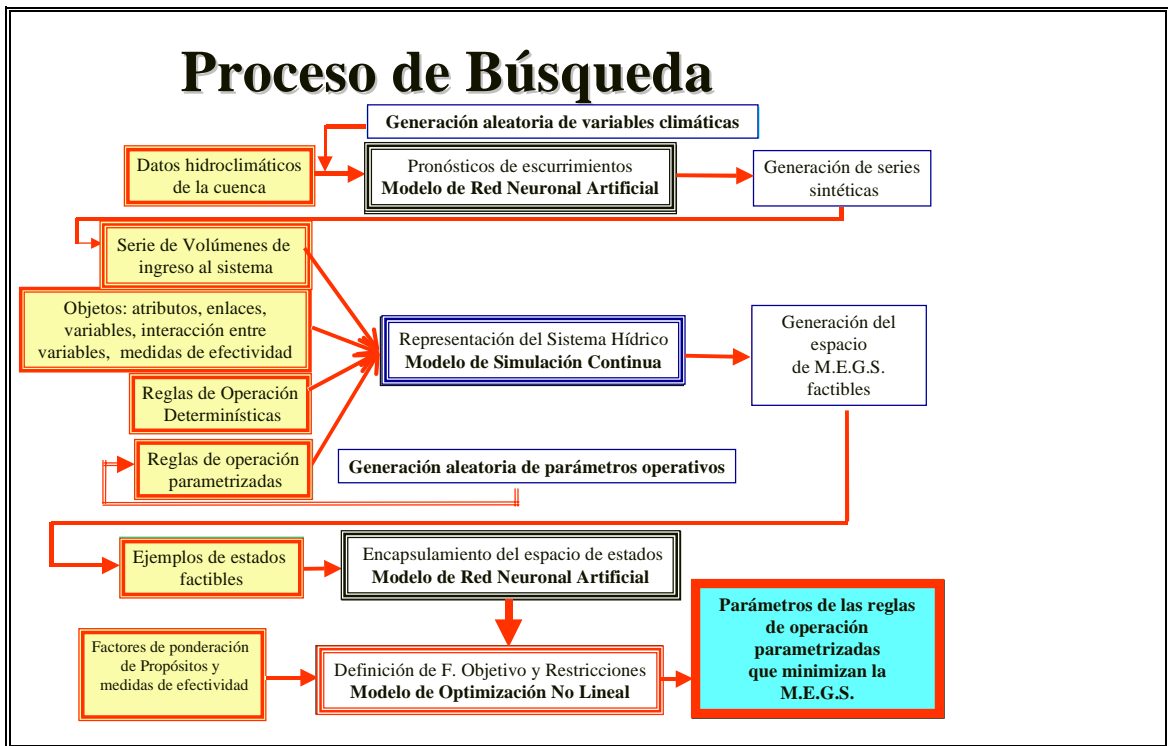


Figura 3.3: Implementación del proceso de búsqueda de soluciones

Una vez elaborado y validado el modelo de simulación es posible seguir dos tipos de análisis de alternativas de operación: Análisis de alternativas de operación basado en certeza, un Análisis de alternativas de operación basado en riesgo.

Los dos tipos de análisis pueden ser encarados utilizando el esquema presentado en la figura 3.3, pero difieren en el modo de utilizar las capacidades de los distintos módulos, según se detalla continuación.

El **Análisis de Alternativas de Operación basado en Certeza** es muy útil realizarlo para evaluar cuán buena es una alternativa de operación del sistema respecto de otras, sometidas todas a la misma secuencia de acontecimientos futuros. Dicha secuencia de acontecimientos, adoptada como conocida, puede estar determinada por ejemplo por la serie de volúmenes de aportación mensual histórica que ingresaron al sistema para un período definido como el horizonte de estudio. Este tipo de análisis, si bien no aparece como el más indicado para tomar decisiones bajo situaciones de riesgo, es muy útil y computacionalmente eficiente al momento de comparar varias reglas de operación alternativas y orientar al decisor sobre cual o cuáles de todas las reglas se comportaría mejor frente al escenario futuro elegido como cierto, permitiéndole establecer pautas de operación a nivel de planificación, en base al cálculo, para la secuencia de acontecimientos futuros analizada, de la frecuencia de fallo, probabilidad de recuperación a estados de fallo o resiliencia y severidad de fallos o vulnerabilidad para cada uno de los propósitos que debe satisfacer el sistema. Por supuesto mientras más larga sea la serie de acontecimientos futuros a los que se somete a las políticas alternativas, las medidas de efectividad obtenidas para compararlas tenderán a sus valores esperados, garantizando la calidad del análisis. Si la serie histórica de acontecimientos es suficientemente larga, es siempre preferible su utilización en lugar de la generación de series sintéticas equiprobables a la histórica. Al contrario, si la serie histórica no es lo suficientemente extensa, es preferible la utilización de una serie sintética con una longitud que garantice la calidad del análisis.

Para llevar a cabo un análisis de alternativas basado en certeza, dentro del esquema presentado en la figura 3.3 se debe definir en primer lugar, mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros, el espacio de búsqueda, esto es, los límites superior e inferior de los parámetros incluidos en las reglas de operación de los elementos de control seleccionados. Una vez definidos los límites del espacio de búsqueda es posible generar, para una serie de aportaciones dada (puede ser la serie histórica o cualquier serie generada con el modelo de pronóstico), valores aleatorios de los parámetros a fin de

construir un espacio de alternativas de operación suficientemente denso para permitir el entrenamiento de una red neuronal artificial que capture y generalice el conocimiento incluido en el modelo de simulación del sistema. Dado que no es posible conocer a priori la estructura del modelo de red neuronal, el número de ejemplos de entrenamiento (estados simulados) debe ser lo suficientemente grande para asegurar la buena capacidad de generalización de la red neuronal.

Finalmente la construcción del modelo de optimización se logra en base al armado de una función objetivo que depende del problema de optimización a resolver, por ejemplo la minimización de la medida de efectividad global del sistema (MEGS) constituida por una combinación lineal ponderada de índices de evaluación de fallo calculados para cada uno de los propósitos del sistema hídrico.

La forma de ponderación de índices y de propósitos que forman parte de la construcción de dicha función objetivo se puede realizar en base a una toma de decisión basada en análisis multicriterio, proceso que se comenta en el punto 3.7.

**El Análisis de Alternativas de Operación basado en riesgo**, es muy útil en aquellos problemas de toma de decisión en que no se conoce el curso futuro de los acontecimientos (por ejemplo incertidumbre inherente a los volúmenes de escurrimiento futuro que ingresan al sistema) pero si se sabe que una determinada decisión puede llevar con cierta probabilidad a diversos resultados. Es decir que, se supone conocida la probabilidad de que ocurra cada uno de los resultados asociados a cada alternativa de operación del sistema, dado que dicha alternativa sea el curso de acción elegido.

En este caso tres elementos fundamentales (etapa de decisión, alternativa y resultados) se pueden combinar para formar árboles de decisiones y resolver el problema de toma de decisiones (figura 3.4).

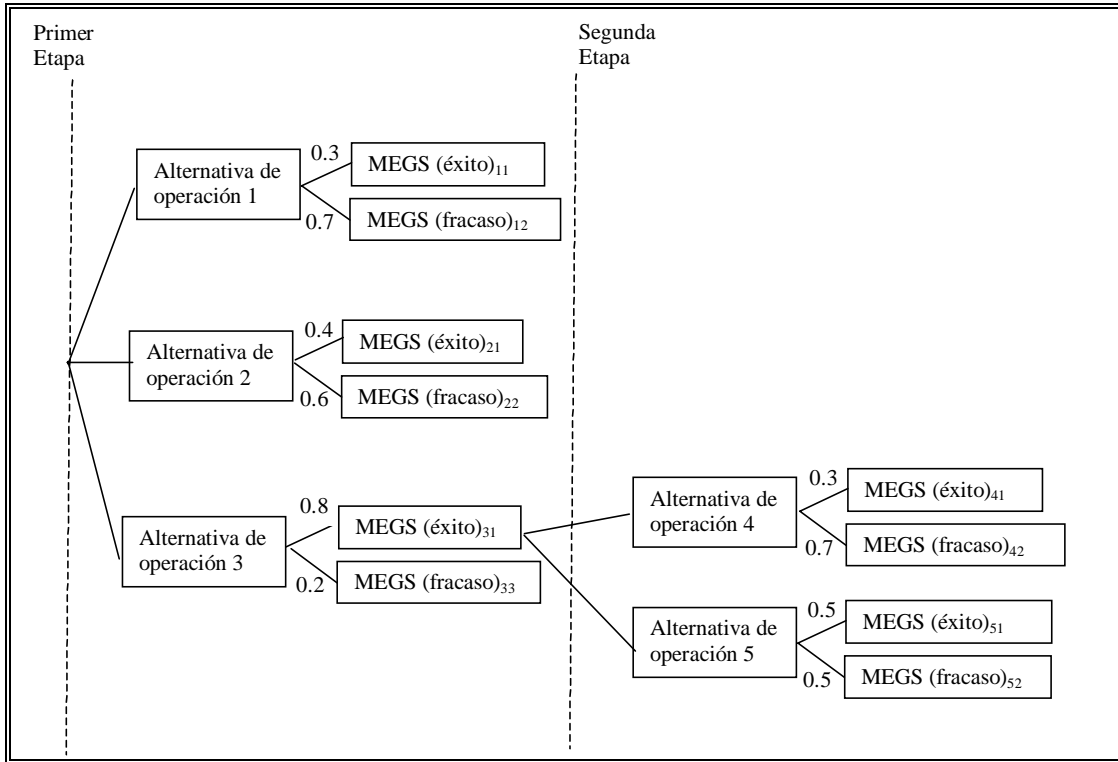


Figura 3.4. Árbol de decisiones en un análisis basado en riesgo

Uno de los métodos más utilizados para tomar decisiones, a partir de un análisis de alternativas basado en riesgo, es tratar de maximizar un valor que define la utilidad esperada de cada alternativa. Esto implica que deben calcularse valores esperados asociados a cada alternativa y elegirse en cada etapa de decisión, aquella alternativa con mayor valor esperado. Sin embargo, al momento de decidir cual de todas las alternativas elegir, cada persona tiene una aversión al riesgo que no es igual a otra, dado que depende de características psicológicas que obligan a construir un modelo no lineal de curvas de utilidad que varía de un individuo a otro, introduciendo un grado de relatividad al análisis de toma de decisiones. En la práctica, el criterio de utilidad máxima esperada puede entregar los mismos resultados aunque se utilicen las curvas de utilidad de diferentes individuos, quedando como principal problema a resolver en este tipo de análisis la determinación de las probabilidades de ocurrencia de los resultados asociados a cada alternativa.

Uno de los valores asociados a una alternativa de operación de un sistema hídrico, lo constituye la probabilidad de fallo del sistema, o de un propósito del sistema en particular, para un instante de evaluación particular (puede ser por ejemplo un mes determinado del año). En este caso deberíamos determinar para una alternativa de operación dada y fijado un nivel de fallo admisible (nivel de riesgo admisible), cuál es la probabilidad de que el sistema (o los propósitos) superen los niveles de fallo admisible (definido como estado de fracaso) y cual es la probabilidad de que no supere tales niveles de fallo admisible (estado de éxito). En este, así planteado, se tendría solo dos resultados posibles para cada alternativa de operación (éxito/fracaso) y se podrían definir como valores de resultado asociados a cada estado de éxito o fracaso a los valores promedios del índice MEGS obtenidos para múltiples gestiones consideradas exitosas, y el valor promedio de MEGS obtenidos para múltiples simulaciones consideradas fracaso respectivamente. Para la determinación de la probabilidad de éxito/fracaso del sistema en cada mes del período de simulación, se puede recurrir a la generación múltiple de series de aportaciones mensuales. El número de múltiples series deberá coincidir con el número de gestiones múltiples del sistema. Este número de simulaciones múltiples debe ser grande para obtener valores de probabilidad fiables, para lo cual se recomienda usar valores extremadamente grandes (1000 simulaciones o mas). Otro parámetro importante a definir es el período de estudio, es decir cual debe ser la longitud de la serie sintética generada para el cálculo de las probabilidades de (éxito/fracaso). Una vez definidos estos dos parámetros (número de simulaciones múltiples y longitud de las series de aportaciones a generar) se deben definir cuales serán los índices de evaluación de fallo, es decir cuales serán los indicadores de los resultados de las alternativas que se están evaluando y la manera de determinar la calidad de éxito o fracaso de la operación. Los índices frecuentemente utilizados para esto son los mismos que se utilizan en el análisis basado en certeza, esto es, el índice de frecuencia de fallo, vulnerabilidad y resiliencia, a partir de los cuales se puede definir un único indicador global de fallo del sistema tal



como el MEGS, el cual puede ser utilizado para calcular el valor de utilidad de las alternativas .

Se puede entonces, fijando ciertos niveles de riesgo admisibles para dicho indicador global MEGS y/o para cada indicador de fallo de cada propósito del sistema, evaluar las probabilidades de que la alternativa elegida en cada etapa de decisión, sea un éxito o un fracaso.

Este análisis también puede utilizarse para orientar al gestor en la gestión del riesgo de ciertas situaciones definidas como críticas en el sistema.

Para llevar a cabo un análisis de alternativas basado en riesgo, dentro del esquema presentado en la figura 3.3 se debe definir en primer lugar, el instante del análisis (por ejemplo el mes en que se está evaluando el riesgo asociado a la adopción de la regla de operación), las condiciones iniciales del sistema para el momento de inicio de las simulaciones, el nivel de riesgo admisible asociado a cada indicador de fallo del sistema (fijar las condiciones que definen el éxito/fracaso de una alternativa), la longitud de las series de acontecimientos futuros (por ejemplo series sintéticas de aportaciones mensuales) a generar, los parámetros de la regla determinista cuyo riesgo se está evaluando (se analiza el MEGS de una regla de operación del sistema por vez) y el número de series sintéticas a generar para el cálculo de las probabilidades asociadas a los indicadores de fallo del sistema y que coincide con el número de simulaciones a realizar.

Esto permite, dada una cierta regla de operación definida completamente por el valor de los parámetros de operación fijadas para cada elemento de control elegidos por el analista dentro del sistema, obtener las probabilidades de éxito o fracaso de esta alternativa de operación para una etapa de decisión. Para calcular las probabilidades de (éxito/fracaso) y los valores de los resultados asociados a todas las alternativas de operación que se deseen analizar, se debe comenzar nuevamente desde el principio y

hacer el mismo análisis para distintos parámetros de las reglas de operación parametrizadas dentro del sistema.

Ahora bien, se ha descrito hasta este momento como efectuar el cálculo de las probabilidades de éxito/fracaso asociadas a adoptar distintas acciones para la etapa de decisión analizada (por ejemplo un mes particular) para un período de estudio definido (ejemplo meses durante los cuales se desea estudiar la influencia de las alternativas de operación). Este mismo procedimiento debe repetirse entonces, para todas las etapas de decisión que se requieran analizar (ejemplo todos los meses de estudio) y para cada una de las alternativas de operación y ambos estados (éxito y fracaso) calculados en la etapa anterior (ejemplo mes anterior), antes de evaluar la siguiente etapa de decisión (ejemplo el siguiente mes del período). Para esta nueva etapa de decisión se tomará como datos iniciales los resultados de la alternativa que se haya elegido adoptar en la etapa anterior (nodo del árbol), para poder calcular los nuevos valores de probabilidades asociadas a los resultados de las nuevas alternativas. De esta manera se puede ir construyendo el árbol de decisiones, siendo cada trayectoria dentro del árbol una solución dentro del espacio de búsqueda. Queda así completamente elaborado un árbol de decisión de tipo red bayesiano. El proceso de búsqueda deberá ser capaz de elegir aquel plan de operaciones (trayectoria dentro del árbol) que minimice o maximice un cierto valor de utilidad (por ejemplo minimizar el valor esperado de MEGS) para todo el período de estudio. Esta situación hace que el estudio de alternativas sea exponencial en el número de alternativas estudiadas, dado que a partir del estado inicial, cada alternativa genera dos nuevos nodos del árbol, y de cada uno de estos nodos se “colgará” un nuevo árbol de decisiones y así sucesivamente. Uno de los problemas más difíciles de resolver en este caso de búsqueda es decidir cuántas alternativas o “ramas” son necesarias analizar para cada uno de estos nodos del árbol para poder hallar el plan de decisiones óptimo para el período de estudio analizado, es decir cuántas simulaciones se necesita realizar para saber si el árbol de decisiones es bueno o no a los objetivos que se persiguen con el estudio. Este problema está íntimamente relacionado con el “sesgo inductivo”, esto es el

tamaño del espacio de hipótesis (tamaño del árbol de decisiones) que se ha decidido generar para realizar el análisis. Definir el sesgo inductivo implica buscar un equilibrio entre expresividad y eficiencia, si el sesgo es demasiado fuerte el plan de operación que se busca puede quedar fuera del espacio de hipótesis, mientras que si es demasiado débil (árbol con muchas alternativas a analizar) los tiempos de simulación sobrepasarían los tiempos máximos admisibles para la toma de decisiones.

Dado que este esquema de estudio permite tomar a cada plan alternativo de operación evaluado (trayectoria dentro del árbol de decisiones construido) como una solución del espacio de búsqueda, es posible, si se construye un árbol que asegure un sesgo inductivo suficiente para generar planes alternativos (trayectorias en el árbol) adecuadas, entrenar una red neuronal que encapsule convenientemente dichos planes alternativos de tal manera de poder incluir dicha red en un modelo de optimización que nos permita encontrar aquella solución (trayectoria dentro del árbol de decisiones) que maximice o minimice una función objetivo que represente por ejemplo el grado de utilidad (valor esperado del MEGS) que se desea obtener con la gestión del sistema.

La ventaja comparativa entre el análisis basado en riesgo y el análisis basado en certeza presentados, es que el primero tiene la virtud de seleccionar aquel plan de operación que minimiza el valor esperado de la medida de efectividad global del sistema MEGS teniendo en cuenta las probabilidades asociadas a las alternativas de operación analizadas y que el plan de operación va ajustando los parámetros de operación de las reglas parametrizadas durante el período de gestión analizado, de tal manera de obtener la mayor probabilidad de obtener el mínimo valor esperado del MEGS del sistema. La desventaja es que la cantidad de simulaciones necesarias es exponencial respecto al número de alternativas y de resultados posibles incluidos en el estudio, haciendo el análisis computacionalmente ineficiente comparado con un análisis basado en certeza, el cual utiliza una regla fija para todo el período de análisis y compara las distintas alternativas de gestión a partir de una única serie de aportaciones. Para dar un ejemplo de

la magnitud de las simulaciones necesarias, podemos decir que para un árbol de decisiones formado para comparar dos alternativas de operación, fijando el análisis solo para dos estados (éxito/fracaso) y para 12 etapas de decisión (12 meses de gestión) los nodos del árbol de decisión posibles son  $2^{24} = 4096$ , lo que nos da un total de 2048 valores de probabilidad a calcular, y si consideramos que para obtener cada valor de probabilidad en cada rama del árbol necesitamos realizar 1000 simulaciones (dado que cambian en cada caso las condiciones iniciales de la simulación), deberíamos hacer 2.048.000 simulaciones distintas, lo que significa un esfuerzo computacional irracionalmente grande para solo comparar entre dos alternativas de gestión a partir de un esquema de toma de decisiones basado en riesgo utilizando árboles de decisión, lo que escapa a las capacidades actuales de los sistemas computacionales estándar.

## **IV. Elementos del Sistema de apoyo a la gestión**

### **4.1 Introducción**

El ambiente del Sistema de Apoyo a la Gestión de sistemas de Recursos Hídricos SARH-2000 posee la estructura básica que se muestra en la (Figura 4.1) la cual está orientada únicamente a apoyar al usuario a acceder en forma ágil y ordenada a cada una de las herramientas de modelación que necesita para llevar a cabo los distintos pasos del método de gestión desarrollado. El estado de desarrollo actual de la aplicación materializa el paso de información de un sistema computacional a otro (representado con flechas en el esquema) a través de la generación de archivos de textos que pueden ser importados por cualquiera de los otros sistemas para su manejo con herramientas propias. Todos los sistemas excepto el simulador de redes neuronales utilizan para el manejo de datos, el formato de celdas común a cualquier planilla electrónica, en cambio para ingresar información al simulador de redes neuronales debe darse un formato especial a la estructura del archivo de datos, la cual puede hacerse a partir de las herramientas comunes a cualquier procesador de textos (selección, copia, corte, pegado, reemplazo, etc) en particular la utilización de programas como Word permite la construcción de macros que logran automatizar el proceso de dar formato a los archivos de información.

La interfaz usuario desarrollada en entorno Windows con Visual Basic (Figura 4.3) brinda al analista un ágil acceso a cada una de las herramientas necesarias permitiéndole:

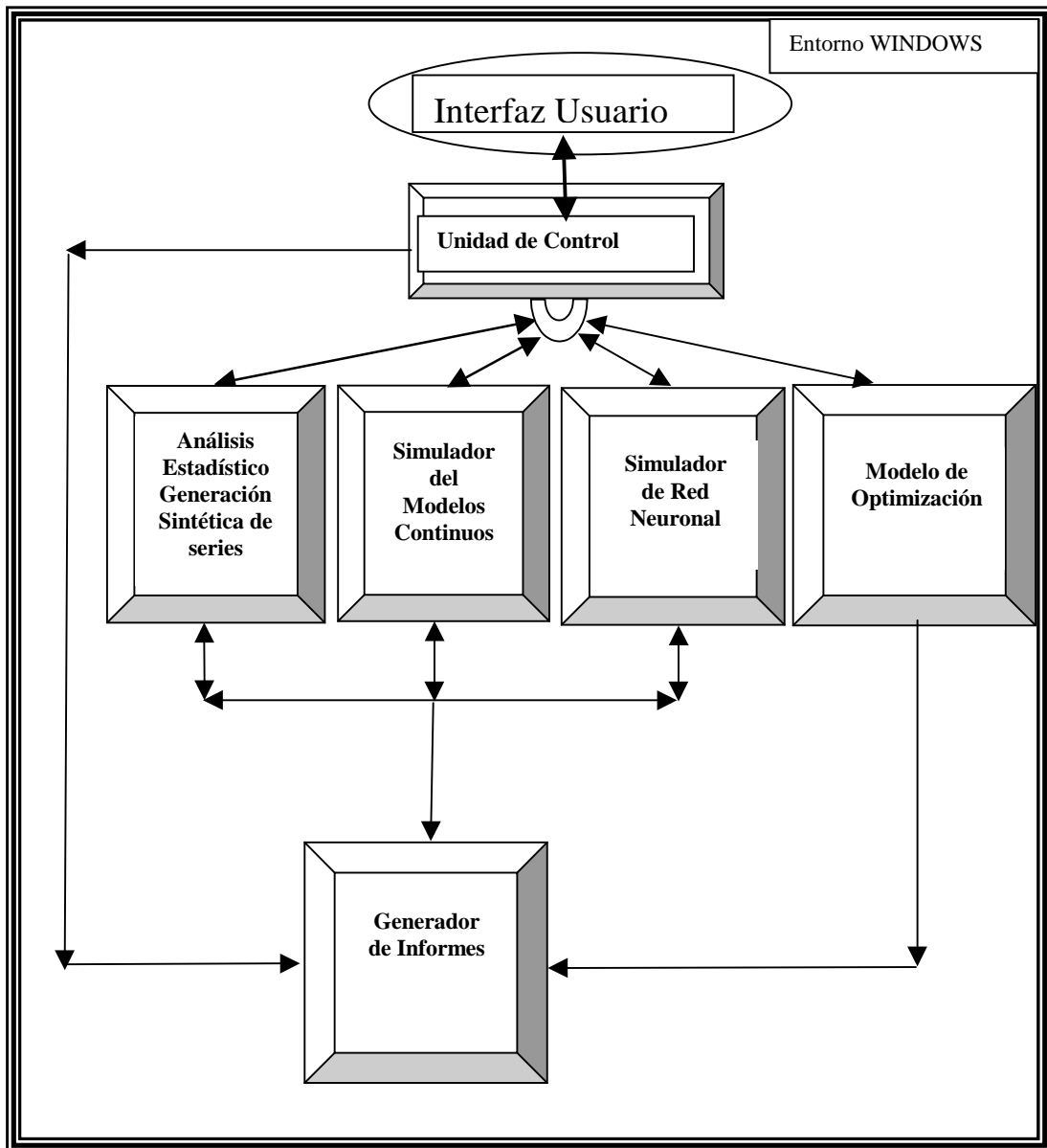


Figura 4.1: Arquitectura del ambiente SARH-2000

- 1) Acceder al Sistema de análisis estadístico SPSS, el cual presenta un ambiente de trabajo similar a una planilla Excel con un completo menú con opciones que permiten: realizar las tareas de tratamiento estadístico de la información; ajustar y validar modelos estocásticos de variables de oferta y de demanda; realizar múltiples generaciones sintéticas de series de datos; realizar la validación de los modelos de redes neuronales ajustados y la detección de problemas estructurales a través de análisis de autocorrelación de los residuos; analizar estadísticamente los resultados de las simulaciones, entre otras tareas.
- 2) Acceder al entorno de simulación continua EXTEND desarrollado por la firma Image That, Inc., el cual es un ambiente de simulación mediante iconos diseñado como herramienta para modelar en forma rápida cualquier sistema o proceso. Con este simulador, se puede crear un diagrama de bloques de un proceso complejo donde cada bloque está encargado de describir una parte de él. Un modelo EXTEND es un documento que contiene componentes, llamados bloques, usualmente con conexiones entre ellos. Cada bloque contiene información tal como datos de ingreso, reglas y consignas operativas, parámetros del modelo, ecuaciones que representan las relaciones entre variables, etc. Después de crear un modelo, éste se puede modificar agregando bloques, moviendo conexiones y cambiando los bloques de datos. Los modelos desarrollados pueden ser corridos en modo continuo, de eventos discretos, lineales, no lineales y sistemas de modo combinado. Posee características muy ventajosas que lo convierten en una herramienta muy potente y fácil de usar. Entre ellas se incluyen el poseer una extensa librería de bloques ya construidos que permite crear modelos rápidamente; realizar una modelación jerárquica, es decir, la capacidad de combinar la función de varios bloques que conforman un subproceso en un bloque jerárquico lo que ayuda a construir sistemas complejos y a entenderlos mejor; ingresar datos directamente a los bloques interactivamente utilizando controles, o leyéndolos de archivos externos mientras corre la simulación; permitir hacer un análisis de

sensibilidad de parámetros para lograr la optimización del Sistema; poseer un lenguaje estructurado de programación propio, (el ModL lenguaje semejante al C) necesario para crear bloques propios o modificar la estructura de los existentes, poseer más de 300 funciones definidas para integración, estadística, teoría de colas, animación, matrices, sonidos, arreglos, transformadas de Fourier y otras, además posibilitar la definición de funciones propias si así se requiere.

- 3) Acceder al simulador de redes neuronales artificiales SNNS desarrollado por IPVR (*Intitute for Paralel and Distributed High Performance Systems*) de la Universidad de Stuttgart que consiste en un ambiente de simulación flexible y eficiente implementado en *ANSI-C* que corre en ambiente *UNIX* y puede ser utilizado para investigaciones en la aplicación diseño, validación y test de redes neuronales artificiales. El simulador permite construir complejas redes en 2D y 3D; seleccionar entre más de 20 tipos de funciones de activación y de salida de cada neurona distintas (*Sigmoide, Gauss, tangente hiperbólica, etc*). Diseñar distintas topologías de redes (*Feedforward, Radial Basis Function, ART, ARTMAP, SOM, Autoassociative, Jordan Elman* y otras). También posee numerosos algoritmos de entrenamiento para los distintos tipos de redes (*Standard Backpropagation, Backpropagation momentum, Kohonen learning, Monte-Carlo, Simulated Annealing, Métodos del gradiente conjugado, entre otros*). Otra capacidad que incluye es la de realizar podado de pesos y nodos usando algoritmos específicos como *Magnitud Based Pruning, Optimal Brain Damage, Optimal Brain Surgeon, Skeletonization, Non contributing Units*, además de ofrecer capacidades gráficas que permiten observar la evolución de las curvas de entrenamiento (Suma de Errores cuadráticos de los valores de salida vs ciclos de entrenamiento). Además permite ser programado para realizar entrenamientos en forma automática, generar un modulo objeto en lenguaje C de la red ajustada y grabar en archivos de texto los resultados del ajuste de redes permitiendo su análisis con otro software o la inclusión de la red como módulo dentro de otra aplicación.



- 4) Acceder al programa Excel que permite asistir al analista en distintas tareas dentro de la metodología tales como: análisis de resultados, generación de informes, gráfico de variables, armado de duplas de entrenamiento validación y test para redes neuronales, desarrollo de modelos de optimización no lineal aprovechando las capacidades que ofrece el módulo “Solver”, creación de módulos de análisis y macros aprovechando la programación de Excel con Visual Basic, entre otras.
- 5) Acceder al procesador de textos Word que permite ser usado para dar formato a archivos de datos y como generador de informes, ya que es capaz de importar con distintas herramientas, los archivos de datos y gráficos generados por los otros cuatro módulos del sistema. Se ha seleccionado este programa por la generalidad de su uso en todos los ámbitos y su capacidad de personalizar informes. Sin embargo cada uno de los 4 módulos que forman el sistema de apoyo a la gestión (SPSS, Extend, SNNS, Excel) posee herramientas que permiten al usuario generar reportes personalizables que le sean de interés sobre las tareas realizadas específicamente dentro del ambiente propio a cada uno de ellos y exportarlo para su posterior inclusión en informes desarrollados en Word.

#### **4.2 Interfaz usuario del SARH-2000**

La interfaz usuario desarrollada para el sistema de apoyo a la gestión de recursos hídricos del río San Juan (SARH-2000) incorpora tres niveles principales y numerosos submenús algunos propios de las distintas aplicaciones incluidas en la base de herramientas y otros desarrollados específicamente para dicho sistema. La interfaz desarrollada está orientada a satisfacer las necesidades de dos tipos de usuarios distintos de este sistema computacional, que se denominan *usuario analista del sistema* y *usuario gestor del sistema*.

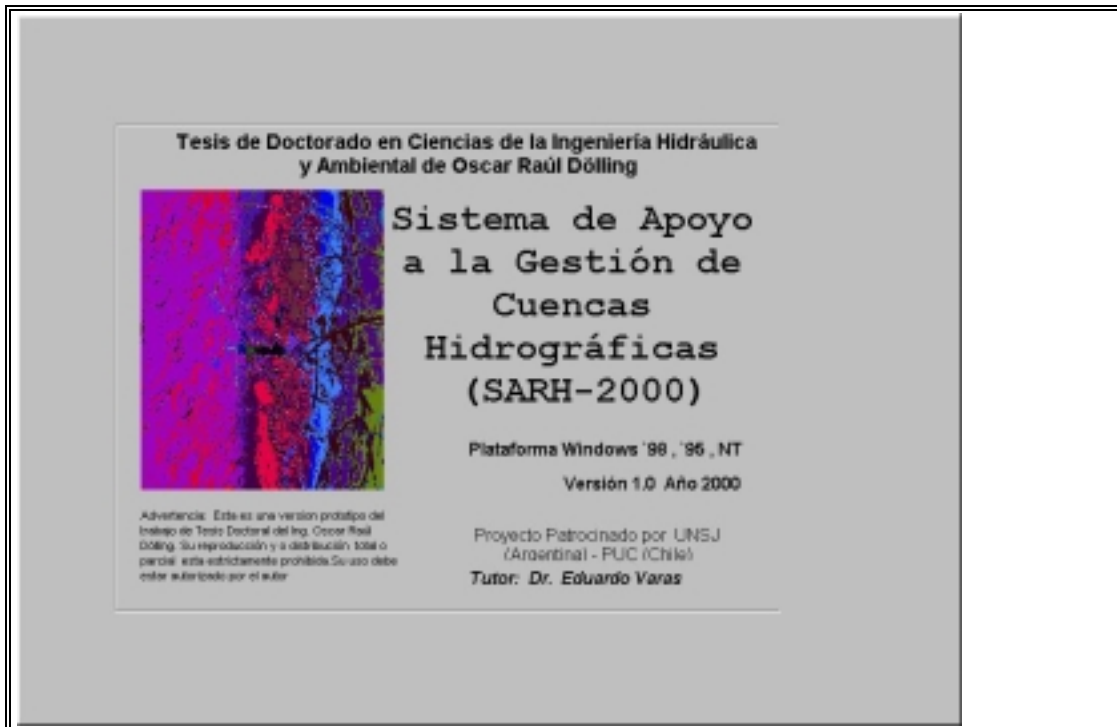


Figura 4.2: Interfaz Usuario sistema SARH-2000- pantalla inicial.

El primer tipo de usuario se refiere al especialista en sistemas que está encargado de desarrollar los 5 primeros pasos del método de gestión explicado, guiado por los requerimientos del segundo usuario (gestor del sistema), para cumplir con los objetivos planteados por el gestor para la última etapa del método que es la de toma de decisiones.

Se pueden distinguir tres niveles jerárquicos dentro de la interfaz, los cuales se pueden diferenciar por sus funciones y por el tipo de usuario a quien van dirigidas. Se las define como Interfaz de Nivel I, Nivel II y Nivel III.

#### 4.2.1 Interfaz de Nivel I

El primer nivel de interfaz permite al usuario (analista) acceder a distintas aplicaciones incorporadas a la base de herramientas para ayudarle a realizar los pasos de tratamiento de la información, desarrollo de modelos de simulación, desarrollo de redes neuronales artificiales y desarrollo de modelos de optimización no lineal y al usuario (gestor) correr los modelos de simulación, optimización, generar informes y tomar decisiones. Esta interfaz ha sido desarrollada en lenguaje Visual Basic, lo que ha permitido aprovechando las bondades del Entorno de desarrollo Integrado (IDE) crear una aplicación de 32 bits que puede ser ejecutada en ambiente *Windows 95, 98* y *Windows NT*, lo cual permite aprovechar al máximo la capacidad de los microprocesadores Pentium. La aplicación se ejecuta en la memoria, impidiendo de esta forma que un error provocado por otros programas interfiera en ella, logra un mejor manejo de las opciones multitarea, permitiendo al usuario organizarse para seguir ordenadamente los pasos del método enunciado agilizando el acceso a las distintas aplicaciones. El lenguaje Visual Basic es también utilizado en otras aplicaciones, como por ejemplo *Excel, Word, Acces, Project*, a fin de automatizar tareas rutinarias, permitiendo crear interfaces y macros (en VBA Visual Basic para Aplicaciones) en todas estas aplicaciones. Los conceptos básicos utilizados en el desarrollo de la interfaz se encuadran en los tres elementos principales del entorno gráfico de Windows: las ventanas, los eventos y los mensajes. En un entorno gráfico los programas siempre responden a eventos. Por ejemplo si se pulsa una tecla determinada ocurre *algo* o cuando pulsa dos veces con el mouse sobre un objeto pasa *algo diferente*, estos son *eventos* a los que debe estar preparada la aplicación desarrollada en Visual Basic. En una aplicación controlada por eventos, el código no sigue una ruta predeterminada; ejecuta distintas secciones de código como respuesta a eventos. Los eventos pueden desencadenarse por acciones del usuario, por mensajes del sistema o de otras aplicaciones, o incluso por la propia aplicación de Visual Basic. La secuencia de esos

eventos determina la secuencia en que se ejecuta el código, por lo que la ruta a través del código de la aplicación es distinta cada vez que se ejecuta el programa. Se ha aprovechado para el desarrollo de esta interfaz, la aproximación interactiva que posee Visual Basic, que va interpretando el código a medida que se escribe, interceptando y resaltando los errores de sintaxis en el momento, además Visual Basic va compilando parcialmente el código mientras se escribe lo que disminuye al mínimo la etapa de corrección de errores y compilación (M.B. Martins Carrizo, 1999) (B.Reselman et al, 1999). La (Figura 4.3) muestra como se han utilizado las habilidades del empaquetador de objetos de Visual Basic para Aplicaciones (VBA) para crear botones que permiten ejecutar distintas aplicaciones en forma simultánea en la base de herramientas creada para facilitar al usuario el acceso a cada aplicación incluida en el sistema SARH-2000.



Figura 4.3: Interfaz Usuario sistema SARH-2000- Base de Herramientas.

## 4.2.2 Interfaz de Nivel II

El segundo nivel está constituido por las interfaces propias de cada aplicación incluidas en la base de herramientas que permite al usuario el desarrollo, modificación y validación de los distintos modelos que se necesitan desarrollar para cumplir con los pasos de la metodología de gestión elaborada.

Las Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 ilustran los distintos ambientes de trabajo que el usuario (analista) del sistema puede utilizar para elaborar sus propios modelos de gestión del sistema hídrico que sea de su interés estudiar y aplicar el método de gestión descrito.

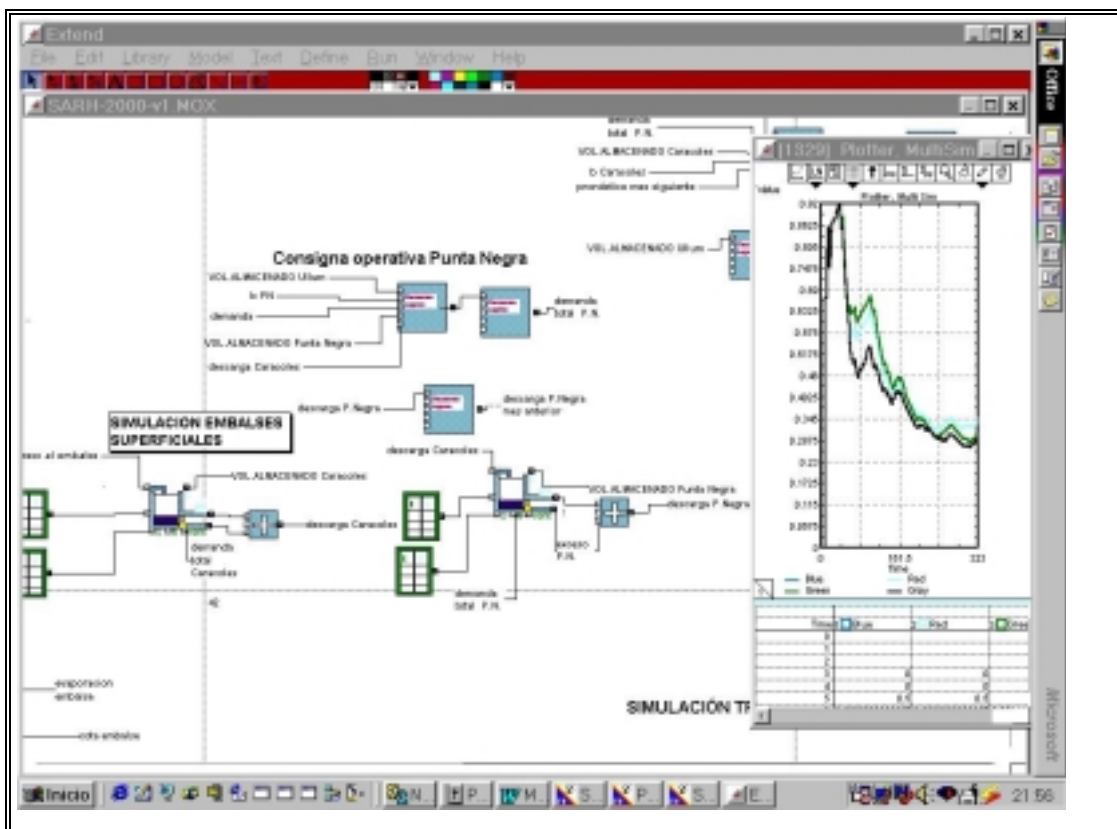


Figura 4.4: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de simulación Extend.

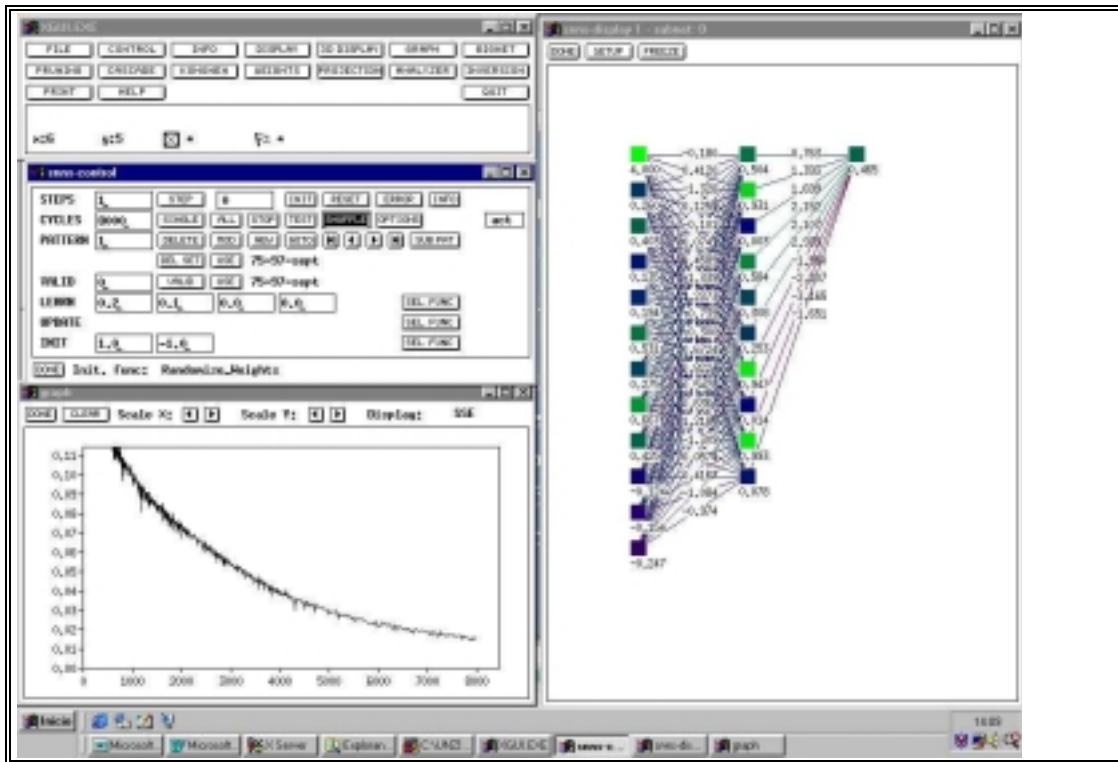


Figura 4.5: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de simulación de redes neuronales

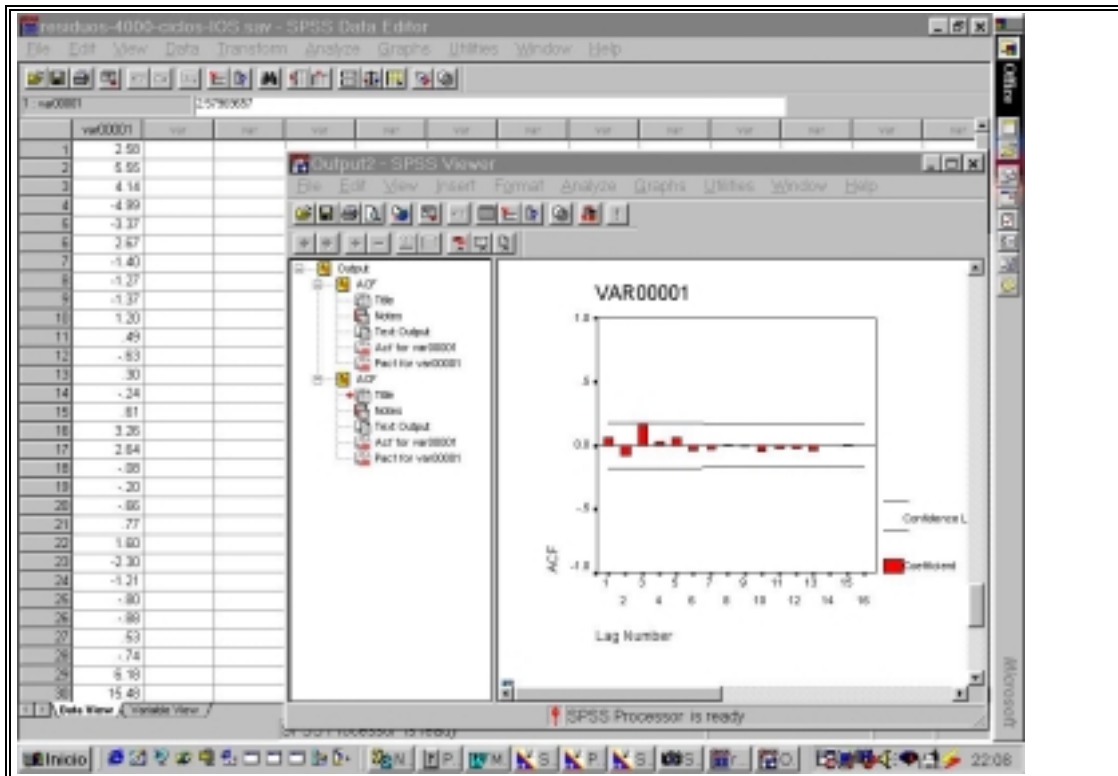


Figura 4.6: Sistema SARH-2000- Sub.Entorno de análisis estadístico SPSS

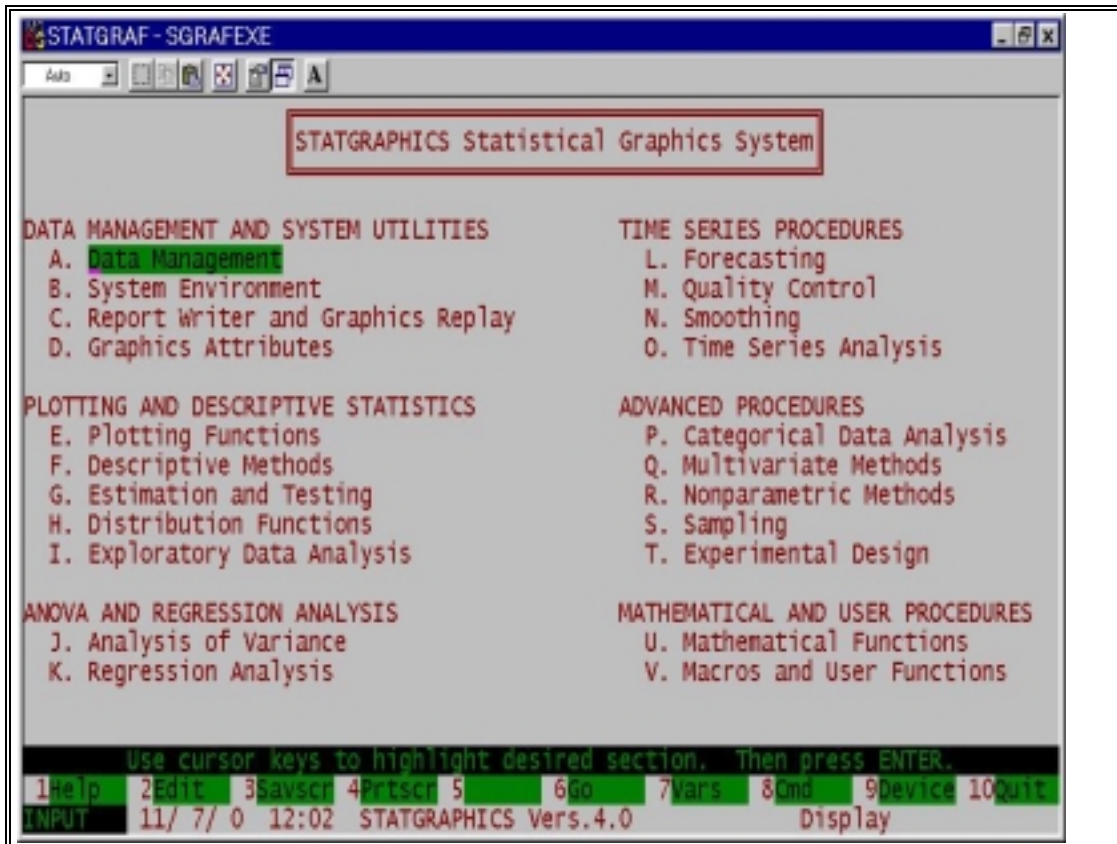


Figura 4.7: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de análisis estadístico Statgraphics DOS



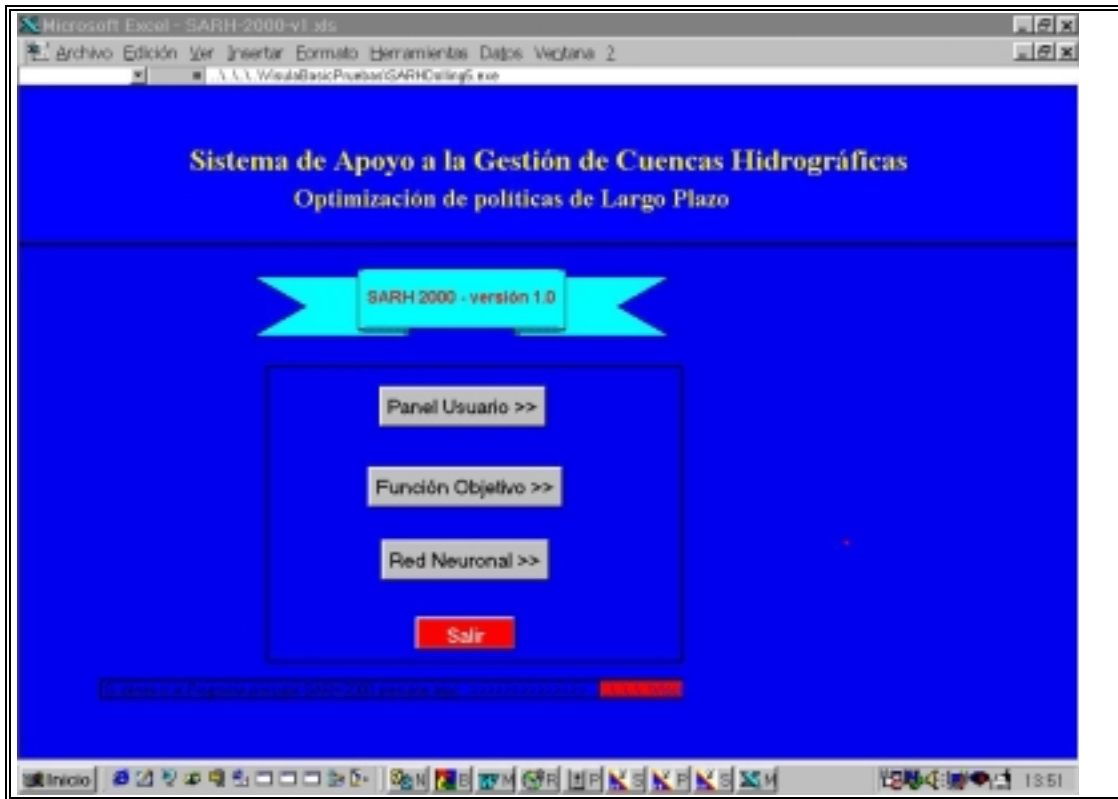


Figura 4.8: Sistema SARH-2000- Sub-entorno Optimización en VBA-Excel.

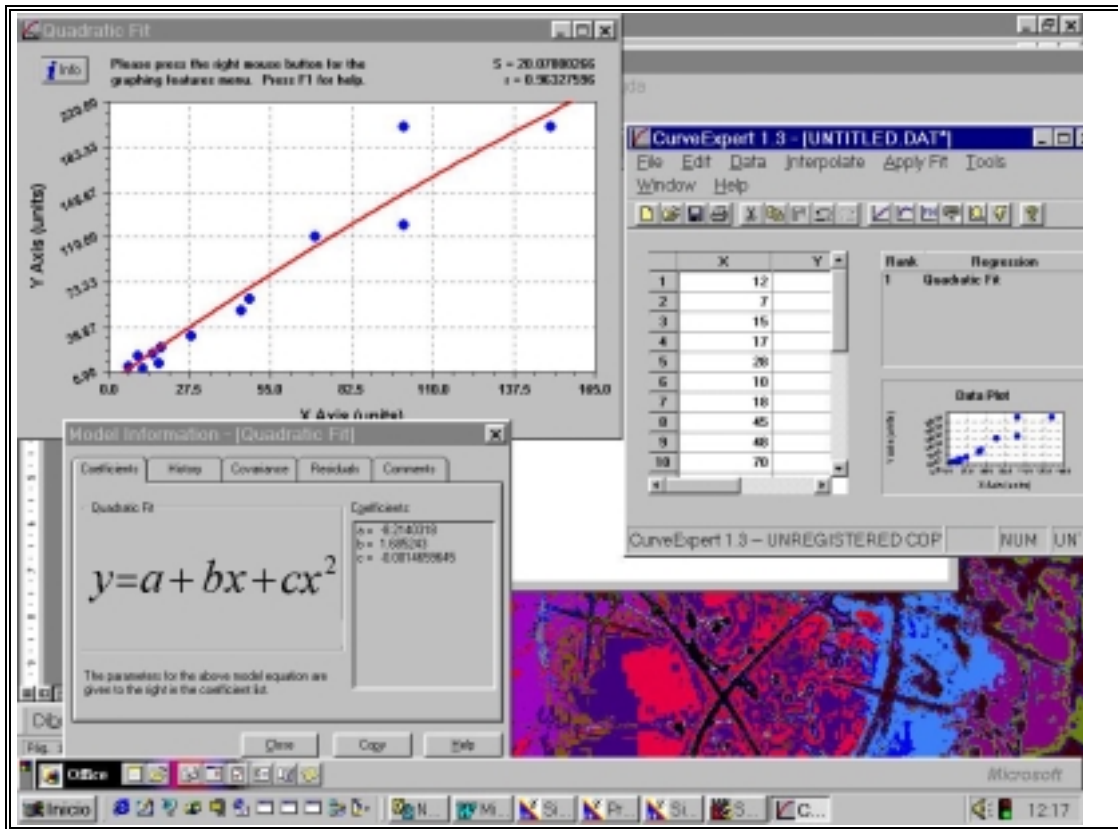


Figura 4.9: Sistema SARH-2000- Sub-entorno de ajuste de curvas Curve-Expert 1.3

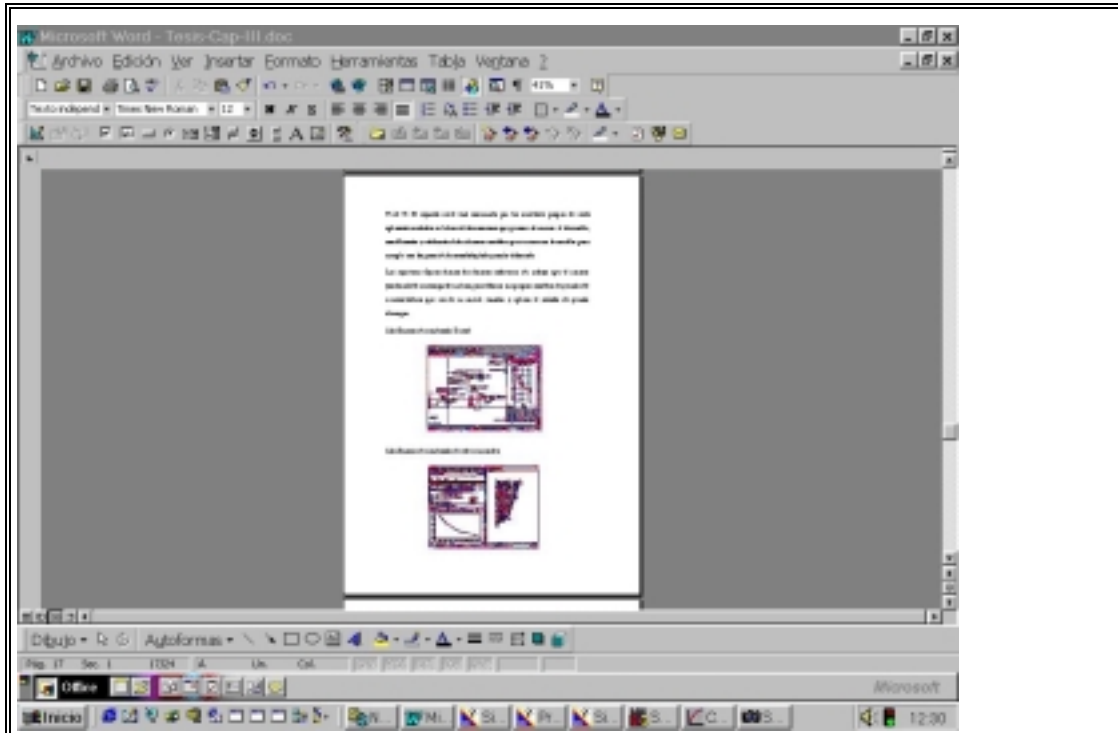


Figura 4.10: Sistema SARH-2000- Sub-entorno generador de reportes (Word).

### 4.2.3 Interfaz de Nivel III:

Este tercer nivel está orientado al usuario gestor del sistema y debe ser creado por el usuario analista del sistema con la idea de entregar al gestor las pantallas que juzgue necesarias para realizar las etapas de síntesis del sistema y toma de decisiones. Esto se puede lograr creando una interfaz en el notebook del ambiente EXTEND que permita al usuario (gestor) realizar la generación de alternativas de gestión y visualizar los resultados de las simulaciones, un ejemplo se muestra en las pantallas creadas para la aplicación del Sistema del río San Juan SARH-2000

(Figura 4.11)

Otras pantallas de este Nivel que pueden ser muy útiles tanto al analista en la fase de elaboración y validación de los modelos de simulación como para el gestor en

la fase de evaluación de las políticas de gestión implementadas son aquellas que permiten visualizar la evolución temporal de las distintas variables de estado y de control que sean de interés tales como volúmenes descargados por los embalses, volúmenes de ingreso a los acuíferos, volúmenes de extracción por bombeos, volúmenes acumulados en los embalses, energía generada y consumida por el sistema, índices de evaluación de fallo de los distintos propósitos , etc.

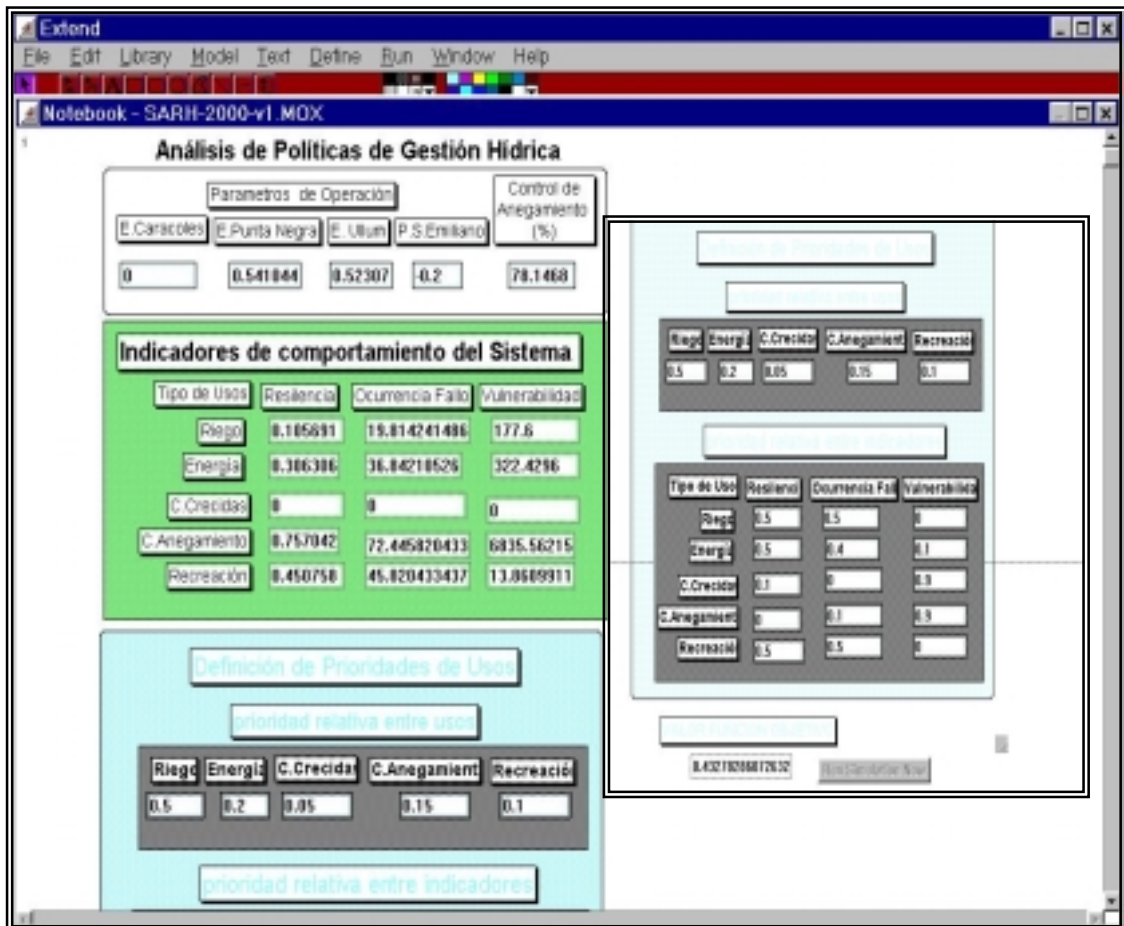
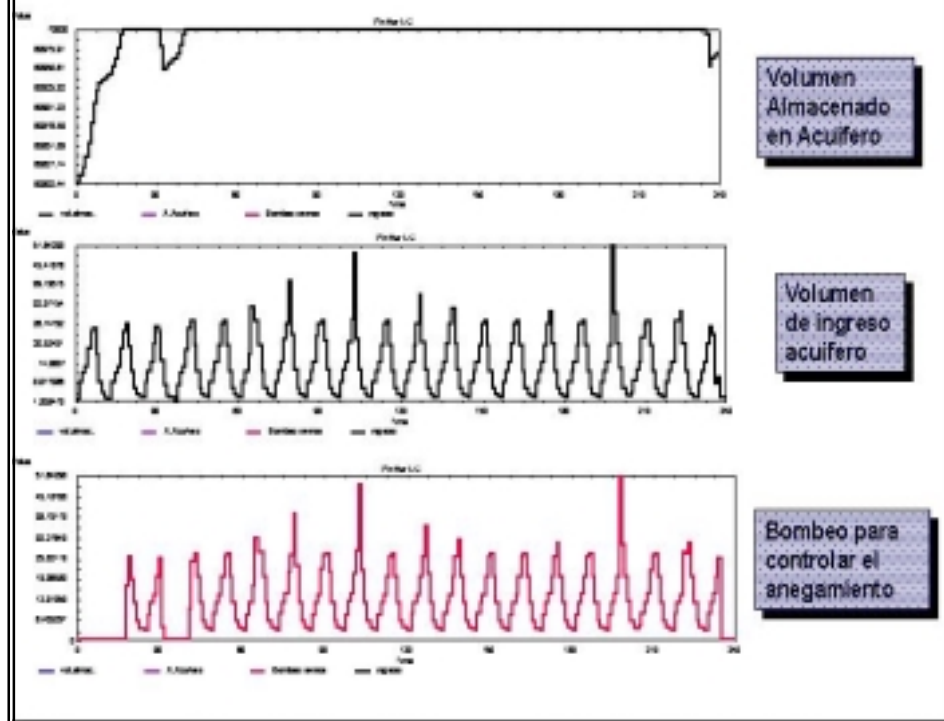


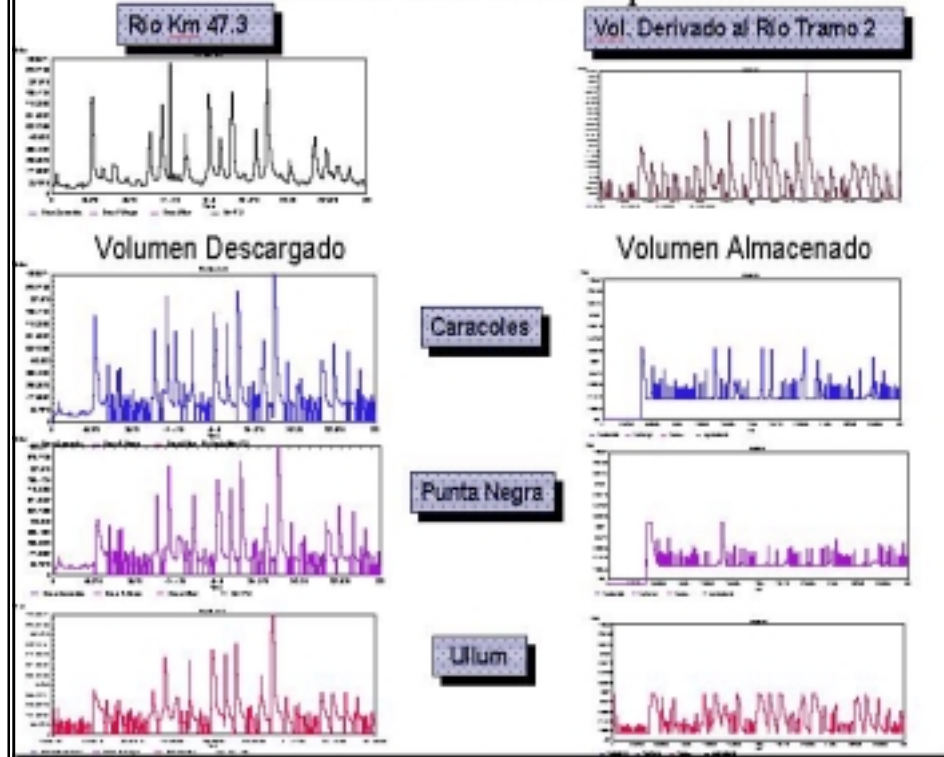
Figura 4.11: Sistema SARH-2000- Interfaz Aplicación Extend.

Las (Figura 4.12) muestra un ejemplo de las pantallas que pueden personalizarse en el entorno Extend para lograr este fin.

## Control del Acuífero



## Control de embalses superficiales



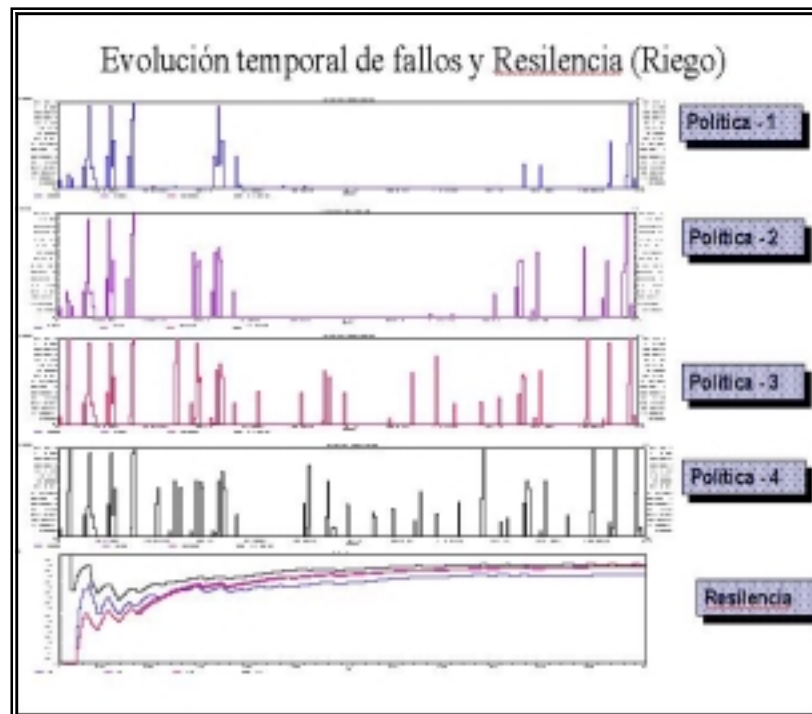
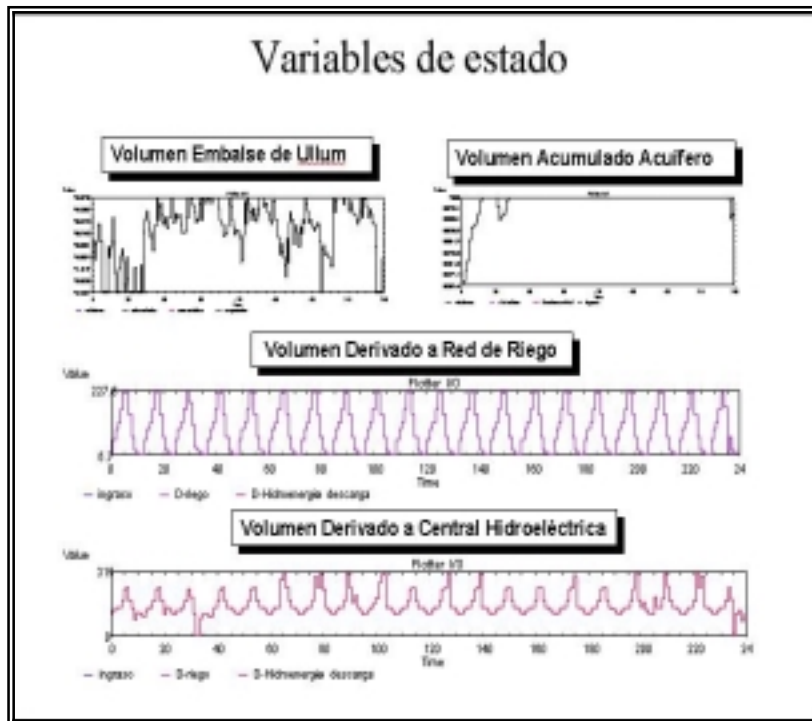


Figura 4.12: Sistema SARH-2000- Pantallas de Visualización de variables Extend.

La complejidad del modelo de simulación hace muy ineficiente la búsqueda de valores óptimos o razonablemente cercanos a la mejor política de gestión. La combinación de ambas técnicas (simulación y optimización) se implementó en un entorno ya conocido por el gestor, que es Excel. Se desarrolló entonces para este tercer nivel del SARH-2000 v1.0, una interfaz en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) que administra el funcionamiento de una hoja de cálculo en Excel (Figura 4.13).

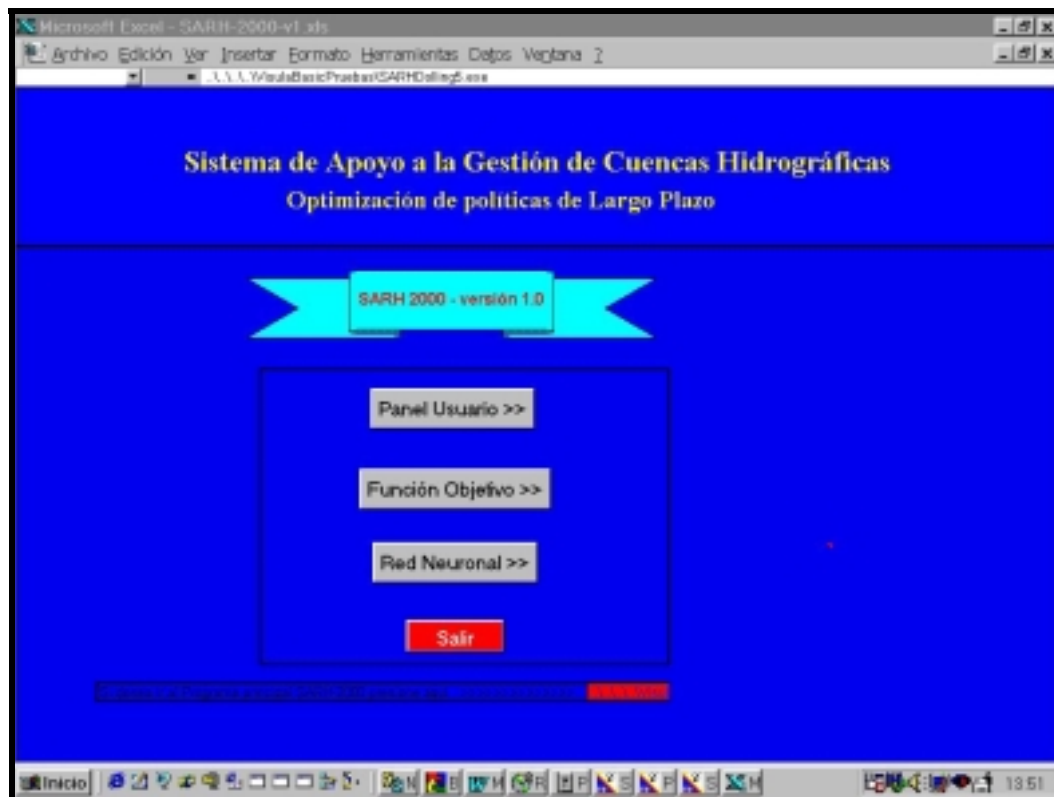


Figura 4.13: Sistema SARH-2000- Interfaz modelo optimización Excel.

Las pantallas generadas con VBA presentan un nivel en que no resulta visible el aspecto normal del entorno de Excel, de tal forma de no sugerir al usuario que su aplicación se está desarrollando en un entorno de planilla de cálculo, sin embargo en la pantalla *Función Objetivo* se ha dejado la barra de herramientas de Excel que



contiene la herramienta de optimización SOLVER y el nomenclador de celdas alfanumérico. Se incorporaron a las planillas objetos de control tales como botones (Command Button). Los controles suelen tener uno o varios eventos a los que se puede asignar subrutinas VBA. Por ejemplo, el control Command Button tiene (entre otros) un evento Click que ocurre cuando el usuario pulsa el botón con el mouse, en el caso de esta aplicación esta capacidad permite al usuario navegar por las distintas hojas de cálculo incluidas en la aplicación y volver a la pantalla de la base de herramientas con el botón **Salir**. Con el editor de Visual Basic se incorporó el código necesario para el control de eventos de los controles incluidos en la planilla de cálculo.

La interfaz en Excel se incluye dentro de las aplicaciones ofrecidas en la Base de Herramientas de SARH-2000 bajo el nombre de Panel del Usuario y está programada para facilitar al gestor:

- 1) La introducción de los valores de prioridad de usos (peso relativo entre los distintos usuarios del agua) y de ponderaciones de la importancia relativa entre los indicadores de evaluación de fallo (ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad) para cada propósito utilizando la planilla superior de la pantalla *Panel de Usuario* (Figura 4.14).

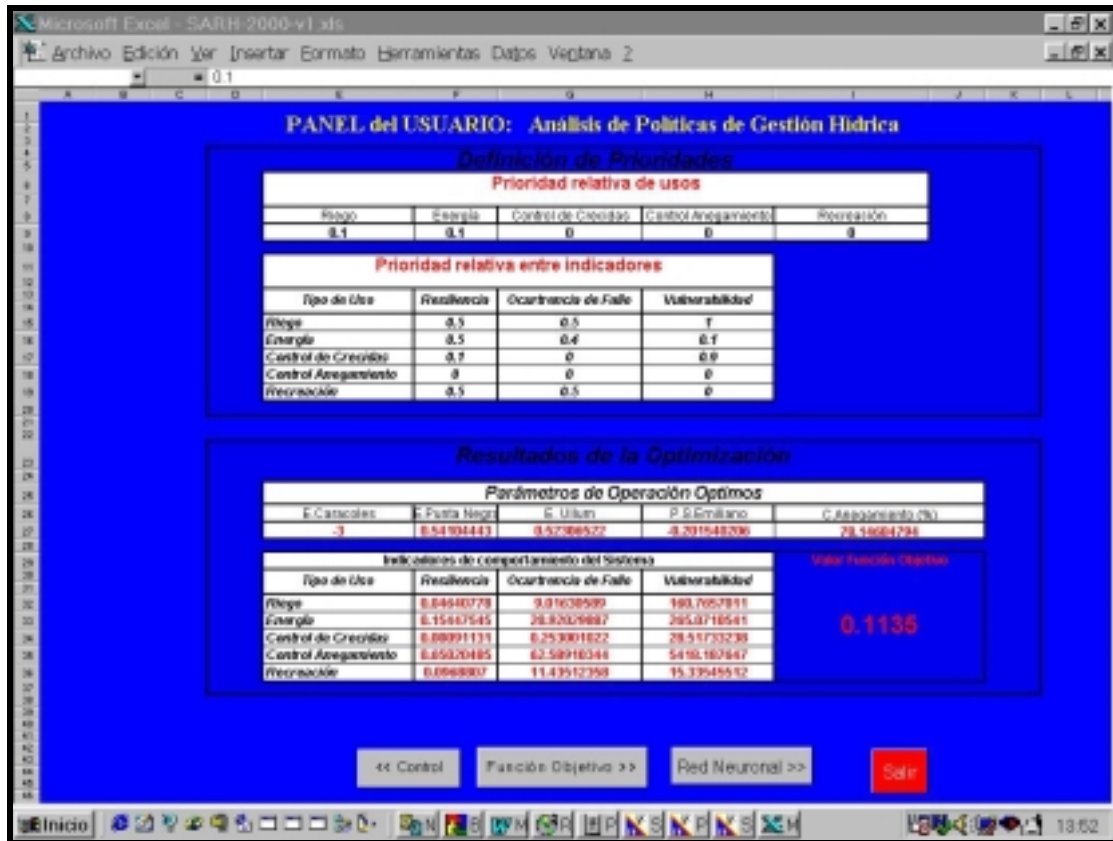


Figura 4.14: Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel- Panel de Usuario

De esta manera el gestor puede personalizar la síntesis del sistema que desea realizar asignando un total de 20 valores (5 propósitos y 3 índices de evaluación de fallo por propósito en el SARH-2000) que determinarán el aporte relativo que cada índice de evaluación de fallo de cada propósito realiza sobre la Medida de Efectividad Global del Sistema M.E.G.S. (valor de la función objetivo personalizada por el gestor) el que se puede ver en el recuadro inferior del Panel del Usuario en la celda extrema derecha, con tamaño más grande, bajo el título **Valor Función Objetivo**. En esta tabla inferior de la pantalla Panel del Usuario, el gestor puede visualizar el valor que adoptan los parámetros de operación de cada elemento de control seleccionado del sistema y los valores de ocurrencia de fallo, resiliencia, y vulnerabilidad para cada propósito del

sistema, para los 5 parámetros de las reglas de operación y el conjunto de 20 pesos asignados en la tabla superior.

2) La búsqueda de los 5 parámetros óptimos de operación que minimicen el valor de la función objetivo del sistema. Dicha función debe ser personalizada por el gestor en la pantalla *Función Objetivo* (Figura 4.15) editando la celda *Valor Objetivo de Operación* que entrega el valor de dicha función antes de correr el modelo de optimización.

La búsqueda del valor óptimo de la función objetivo se enmarcará dentro de límites (valores máximos y mínimos) claramente definidos por el usuario a través de un conjunto de restricciones a los parámetros introducidos usando los cuadros de diálogo de la herramienta de Excel, SOLVER. En el cuadro inferior en la columna **entrada**, se indica el conjunto óptimo de parámetros de operación los cuales corresponden a aquellos valores que minimizan el valor de salida de la función objetivo definida por el usuario en función del método de búsqueda y las restricciones seleccionadas por el gestor.

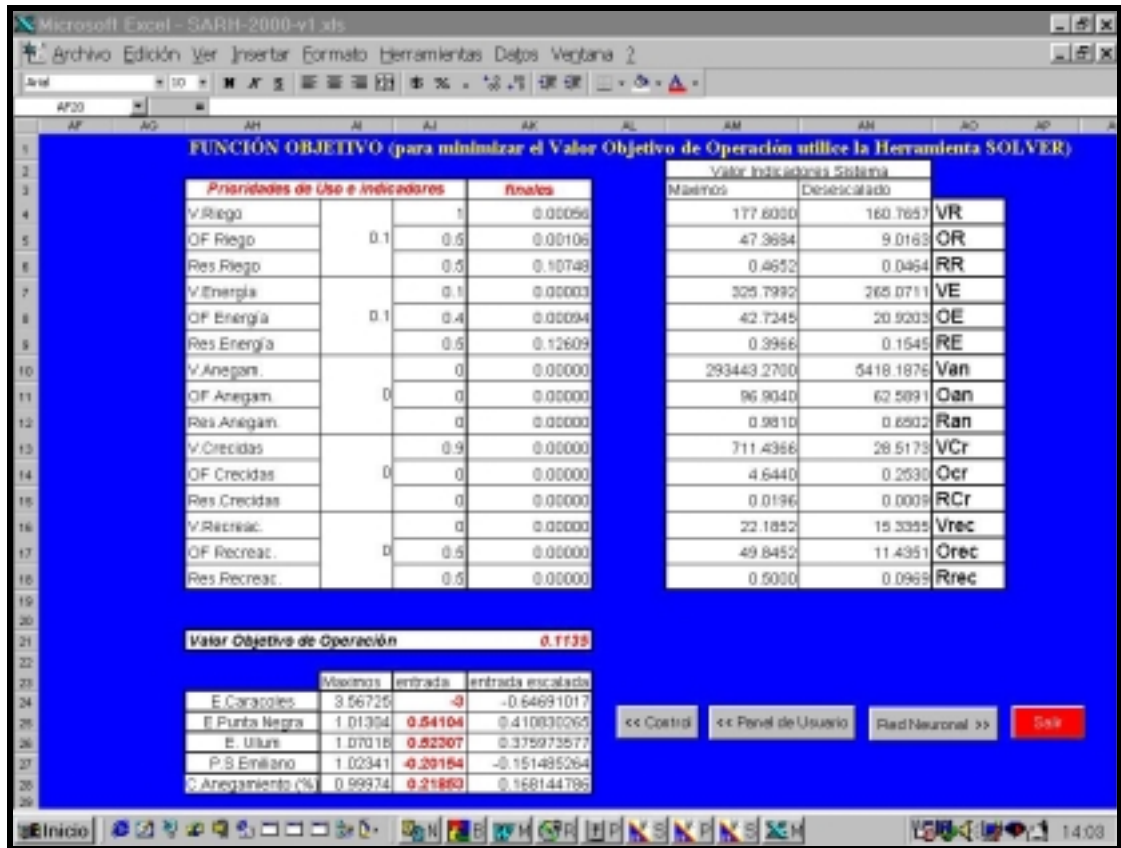


Figura 4.15: Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel- Función Objetivo

3) La visualización de los valores de activación y de salida de cada nodo de la red neuronal que encapsula el comportamiento del modelo de simulación desarrollado en Extend y que se presenta al usuario en la pantalla *Red Neuronal* (Figura 4.16).

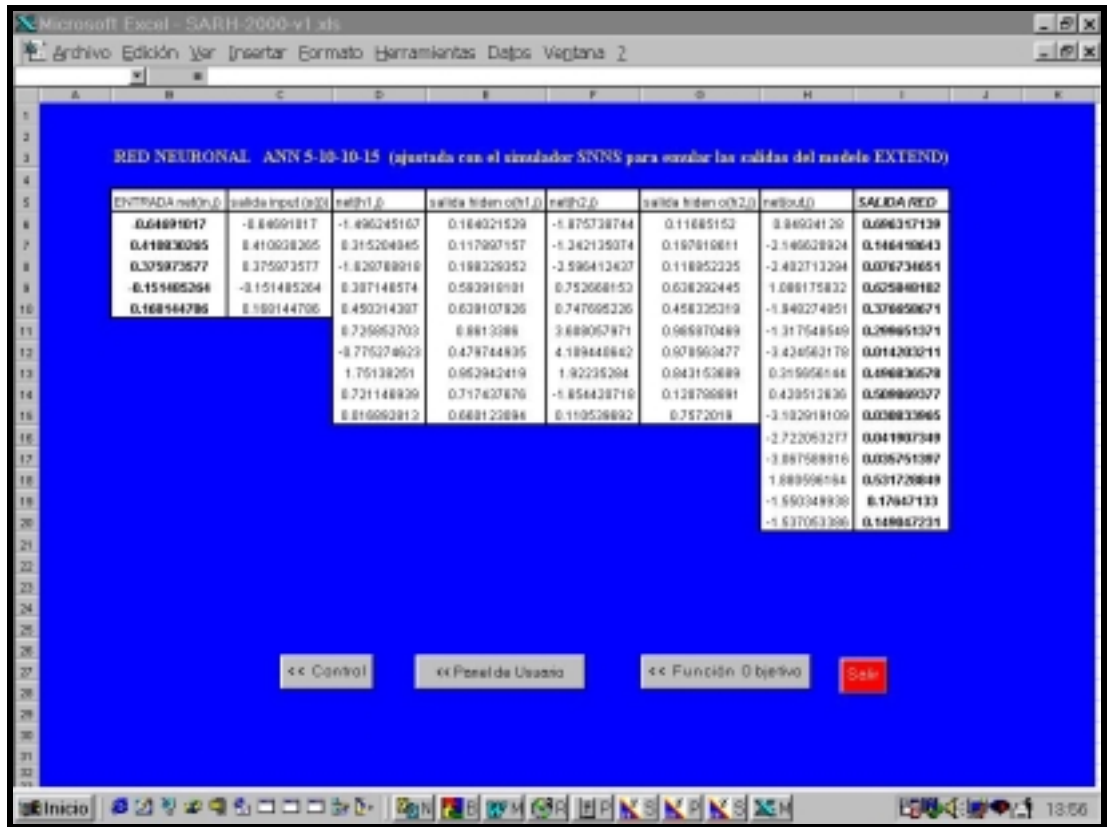


Figura 4.16: Sistema SARH-2000- Modelo Optimización Excel- Red Neuronal

También la hoja de cálculo asociada a esta pantalla permite al usuario analista del sistema programar automáticamente otra red neuronal entrenada para representar otro modelo de simulación distinto, pero desarrollada con la misma topología (función sigmoide con términos sesgados) y arquitectura (5-10-10-15) que la programada en SARH-2000 v1.0. La planilla de SARH-2000 ya ha sido programada para extraer automáticamente del código en lenguaje C entregado por el programa snns2c.exe del simulador SNNS, la información de pesos de enlaces y bias necesaria para construir el modelo de red neuronal con los elementos de cálculo de Excel. Este paso, permite fácilmente incluir el modelo de red neuronal como parte de la estructura matemática de la función objetivo ubicada en el mismo libro Excel dando lugar a la

combinación de las técnicas de simulación y de optimización en una misma estructura matemática (función objetivo) que se transforma en un modelo de optimización no lineal que representa a nuestro complejo sistema hídrico.

Los pasos para utilizar otro tipo de arquitectura de red neuronal, distinto al programado, son los siguientes:

- Entrenar la nueva red neuronal con el simulador SNNS
- Obtener el código fuente en lenguaje C con el programa snns2c.exe
- Copiar el código fuente C de la red neuronal entregado por SNNS en una planilla Excel.
- Programar la planilla Excel para extraer los datos de pesos y bias del código de la nueva red.
- Construir el modelo de red neuronal en la Pantalla **Red Neuronal** de Excel.
- Vincular las celdas de salida de la red neuronal en Excel con los términos de la función objetivo programada en la pantalla Función Objetivo.

### **4.3 Búsqueda de los parámetros óptimos.**

El gestor puede navegar por el Nivel III de la Interfaz descrita en 4.2.3, usando los botones para pasar de una pantalla a otra. Esto le permite descubrir con rapidez los mejores parámetros operativos para los fines de la gestión que el mismo puede definir fijando los valores de los 20 pesos mencionados en 4.2.3 y especificando la estructura matemática de la función objetivo, que por defecto está construida como la combinación lineal ponderada de los índices de evaluación de fallo de cada uno de los propósitos del sistema. Utilizando Solver puede encontrar dichos parámetros óptimos y

regresar a la base de herramientas para introducir los valores de los parámetros en el modelo del sistema elaborado en Extend a través de la interfaz del notebook a los fines de encontrar el valor exacto de evaluación de la política de gestión seleccionada. Ahora bien, si luego de hacer esto el gestor no está conforme con la aproximación realizada por el modelo de optimización de Excel, puede refinar la búsqueda de parámetros buscando dentro de un entorno reducido cercano a dichos valores de parámetros utilizando directamente el modelo de simulación desarrollado en Extend, con lo cual obtendrá mayor precisión en la determinación del valor de la función objetivo, dado que no se está utilizando la aproximación lograda con la red neuronal como modelo de representación del sistema sino el propio modelo de simulación con todos sus detalles.

Este procedimiento puede hacerlo iterativo, lo que permite al gestor refinar la búsqueda del procedimiento de operación óptimo global sin necesidad de perder la capacidad de detalle en la representación del sistema que le brinda el modelo de simulación.

## V. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GESTIÓN AL SISTEMA HÍDRICO DEL RÍO SAN JUAN-ARGENTINA.

### 5.1 Introducción

En este capítulo se presenta una aplicación práctica de la metodología descrita en el capítulo III al caso real del sistema hídrico del río San Juan en Argentina. Se realiza una detallada exposición de la ejecución de todos los pasos de la metodología desde la definición del problema, pasando por la elaboración de los modelos utilizando las capacidades del sistema de apoyo a la gestión SARH-2000 hasta el uso de las interfaces desarrolladas, descritas en el capítulo IV, finalizando con una síntesis del sistema y su vinculación con el proceso de toma de decisiones.

### 5.2 Planteamiento del Problema

Se aplicó la metodología de gestión propuesta en el capítulo III orientada al análisis de alternativas de operación basado en **certeza**, al sistema de recursos hídricos del río San Juan. El alcance de la aplicación se limitó a demostrar, supuesto conocidos los acontecimientos futuros, la factibilidad de combinar los enfoques de simulación y optimización, utilizando como nexo entre ambos a la técnica de redes neuronales artificiales en un solo modelo de optimización y sus potencialidades en el diseño de reglas de operación parametrizadas de jerarquía de tiempo mensual, con el objetivo de que sirvan de guía al gestor en la etapa de toma de decisiones en la fase de explotación del sistema.

El ejercicio realizado para el río San Juan asume que el sistema será operado bajo condiciones estacionarias, es decir, que las reglas de operación derivadas se mantendrán incambiables de un ciclo anual a otro. Se espera que las reglas de operación



paramétricas, derivadas de la optimización de sus parámetros, orienten al gestor en la determinación de las reglas a aplicar para definir aquellos volúmenes de descarga mensual de cada embalse, volúmenes mensuales a derivar hacia la red de riego y al río y volúmenes mensuales a extraer del acuífero que garanticen, al final del horizonte de gestión analizado, obtener el valor esperado mínimo de una combinación ponderada de índices de probabilidad de fallo para los distintos usos del sistema (medida de efectividad global del sistema MEGS), cuyos ponderadores deben ser prefijados por el gestor como objetivos de la operación.

A continuación se describe formalmente el problema a resolver, se detalla exhaustivamente al sistema que se quiere representar, sus componentes, sus fronteras y las características y las relaciones entre dichos componentes que se tendrán en cuenta en la etapa de modelado del sistema.

### **5.2.1 Descripción Física del Sistema.**

El sistema hídrico estudiado está inserto en el sistema natural de la cuenca hidrográfica del río San Juan ubicada en la provincia del mismo nombre, que se encuentra al oeste de la República Argentina.

El Sistema hídrico multipropósito del río San Juan está conformado por numerosas obras de infraestructura hidráulica ubicadas principalmente en los Valles de Tulúm, Ullúm y Zonda, tendientes a lograr el desarrollo socioeconómico, promoviendo el uso de tierras aptas para el cultivo. Las principales obras hidráulicas existentes son la presa embalse Quebrada de Ullúm con una capacidad máxima de 440 Mm<sup>3</sup> que cuenta con una central hidroeléctrica a pie de presa con una potencia nominal instalada de 45,000 kVa.; 1,100 km. de canales de riego impermeabilizados; 220 pozos para extracción de agua subterránea oficiales; 630 km. de drenes colectores principales

(Figura 5.2) y actualmente en proceso de construcción las presas de embalse Caracoles y Punta Negra con una capacidad de almacenamiento entre ambas de 1,050 Mm<sup>3</sup> y con sendas centrales hidroeléctricas a pie de presa con una potencia nominal instalada total de 180,000 Kva que transformarán para el año 2004 al sistema actual según se indica en la (Figura 5.1).

Los volúmenes que descarga el embalse de Ullúm llegan al dique derivador Ignacio de la Roza, quien recibe dichas descargas de agua y permite controlar la cantidad de agua a derivar a la red de riego a través del canal matriz, hacia el valle de Tulúm, y además, decidir sobre la forma de descargar el agua no utilizada en riego al río. El agua derivada a riego se divide, a su vez, en tres canales principales, por medio de un partididor de caudales (partididor San Emiliano) que conduce el agua hacia el sector de usuarios de riego, que necesitan el agua, principalmente, durante el período de Octubre a Marzo.

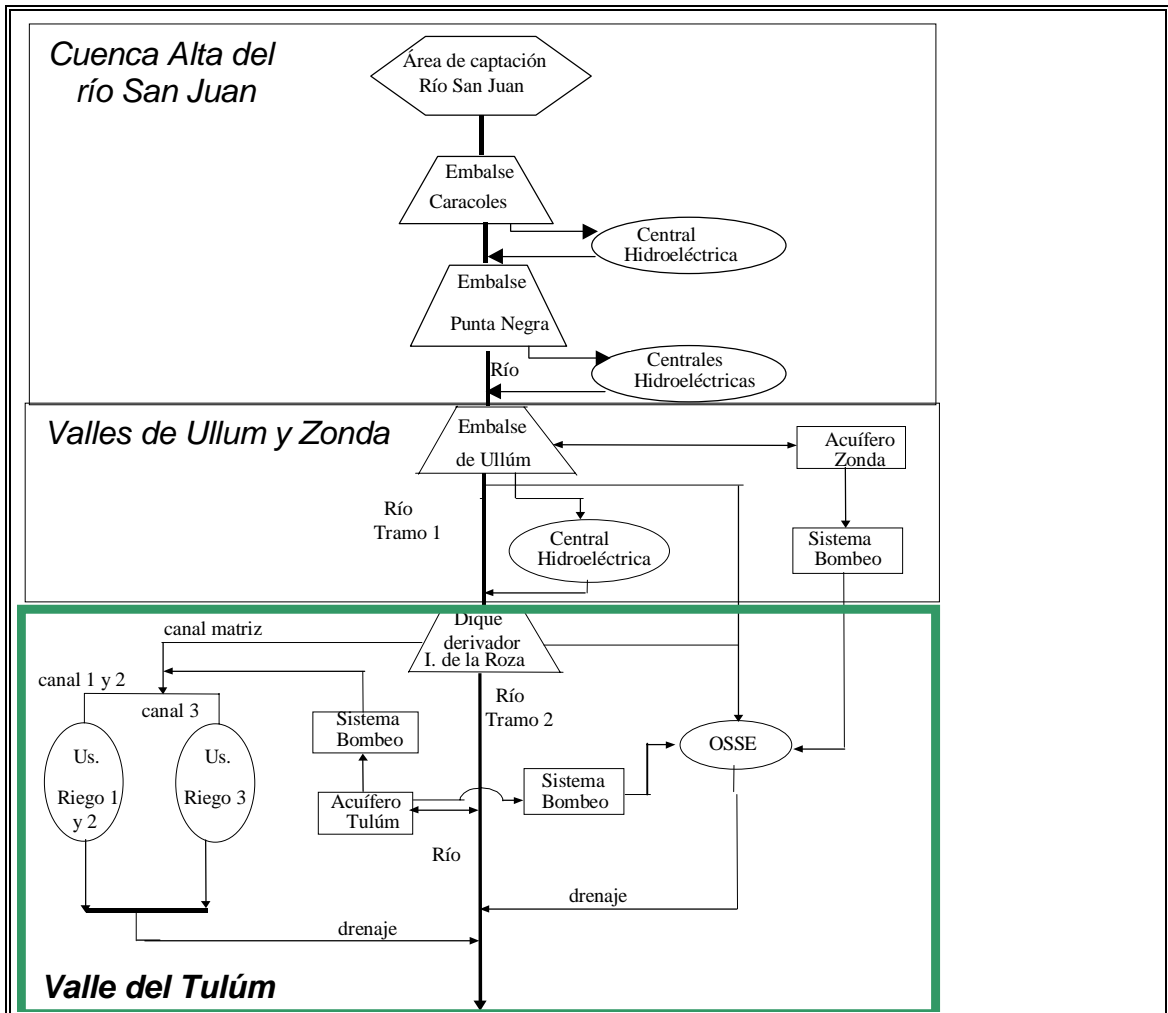


Figura 5.1: Diagrama del sistema físico futuro del río San Juan

La empresa de tratamiento y provisión de agua con fines industriales y domésticos, OSSE, toma agua del embalse de Ullúm y de una galería filtrante existente en el dique derivador Ignacio de la Roza. En épocas de déficit hídrico pueden también ponerse en funcionamiento los sistemas de bombeo que extraen agua del acuífero de Zonda y de Tulúm (Figura 5.2). La decisión de extracción de agua a través de los sistemas de bombeo está en función de los niveles de agua en el acuífero, las necesidades de agua potable y de riego y, por último, de la cota del embalse de Ullúm.

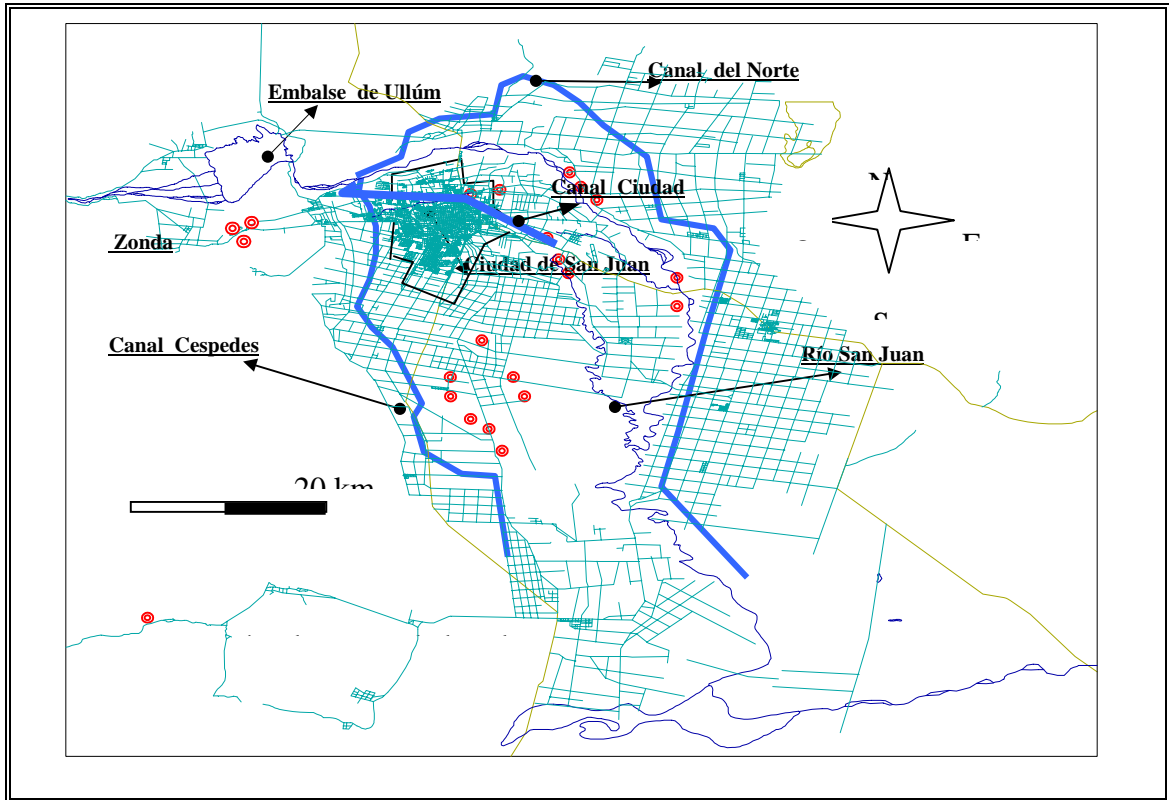


Figura 5.2: Red de Canales principales y secundarios Valles de Tulúm, Ullúm y Zonda. Provincia de San Juan - Argentina.

El acuífero de Tulúm interactúa con el río y puede ser potencialmente explotado por los sistemas de riego y por OSSE, a través de los sistemas de bombeo.

Por último, toda agua excedente del valle se conduce por un sistema de drenaje al río San Juan, lo cual cierra el flujo hidráulico del sistema físico descrito en la Figura 5.1.

### **5.2.2 Diagnóstico de la situación actual**

A pesar de todas las inversiones realizadas en infraestructura hidráulica en el sistema del río San Juan tendientes a aumentar la superficie cultivada en los valles de Tulúm, Ullúm y Zonda, no se ha logrado el desarrollo agrícola de la forma esperada. Sólo el 2.4% de la superficie provincial es apta para el cultivo esto significa 218,649 has. en las que es posible desarrollar alguna actividad agrícola. De éstas se encuentran empadronadas, es decir con derecho a riego, 160,000 has., de las cuales se cultivan en la actualidad solo 67,000 has.

Las investigaciones existentes (Victoria et al, 1972; Coria Jofré, 1982; Correa, 1988; Dölling, 1995) junto a información obtenida por los organismos encargados del manejo del sistema, permiten establecer con claridad la evolución negativa sufrida por el sector agrícola desde la puesta en funcionamiento de la presa compensadora para riego Quebrada de Ullúm y el panorama actual sobre el manejo del recurso hídrico en el Valle de Tulúm-Ullúm y Zonda, identificando como consecuencia, la necesidad de contar en San Juan con un sistema que sea capaz de evaluar con anticipación distintas soluciones alternativas de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, para poder llegar a adoptar decisiones sustentables.

La realidad sobre el manejo hídrico actual del Valle del Tulúm, tras la puesta en funcionamiento de esta presa se resume como sigue. El río San Juan de régimen nival, con caudales máximos en verano y mínimos en invierno, descarga sus aguas en el dique embalse de Ullúm, lo que permitiría regar la totalidad del valle de Tulúm, Ullúm y Zonda. La cuenca de agua subterránea del Valle del Tulúm tiene la capacidad para aportar en los ciclos secos el volumen necesario para el desarrollo de los cultivos mediante la utilización de un importante número de perforaciones efectuando un bombeo intensivo.

La recarga del acuífero de Tulúm se efectúa principalmente en la zona bajo riego y a través de la infiltración en el cauce del río San Juan en el tramo comprendido

entre el Dique Ignacio de la Roza y el Puente de Albardón. La zona de descarga se encuentra al borde del abanico aluvial y lo hacen a través de cauces naturales como el Arroyo los Tapones, Arroyo de Agua Negra y drenes artificiales como el Colector América.

En períodos de abundancia de agua superficial, la cuenca subterránea presenta problemas de anegamiento en bastas áreas, lo cual ha producido un total de 92,000 has. afectadas por el ascenso descontrolado de niveles freáticos que suelen llegar a menos de 2 m. de profundidad del nivel del terreno (registrándose una superficie máxima anegada en octubre de 1993 de 107,000 ha). Este proceso de humedecimiento y secado de los suelos, ha ocasionado la pérdida de más de un 20% de superficie cultivable, por efectos de la salinización de los suelos. El sistema de drenaje a pesar de poseer más de 600 km. de drenes colectores principales, no funciona como debería, pues no se realizan las tareas de conservación y mantenimiento en forma periódica, y los drenes y desagües no poseen la pendiente necesaria para funcionar correctamente.

Los problemas descritos se deben, en una pequeña proporción, a mal diseño de drenajes y falta de inversiones en la infraestructura de riego y drenaje, pero en gran medida a la falta de un sistema adecuado que apoye la gestión de operación del sistema superficial y subterráneo, permitiendo al operador del sistema adoptar reglas de operación que minimicen las probabilidades de ocurrencia de estas situaciones con un adecuado grado de anticipación.

Por otro lado, el sistema de aprovechamiento futuro del río San Juan poseerá un esquema aún más complicado, dado que contará con tres embalses en cadena con una producción energética importante para apoyar el desarrollo regional con importantes intereses en el sector minero de la provincia, creando un complejo esquema de gestión multipropósito.

Se considera necesario entonces, desarrollar un sistema computacional que sirva, a las personas encargadas del manejo del recurso hídrico del sistema del río San

Juan, para evaluar en forma rápida y precisa distintas alternativas de gestión del sistema, sometido a diferentes escenarios hidrológicos de oferta y de demanda de sus múltiples propósitos a corto, mediano y largo plazo.

Este diagnóstico es compartido tanto por las autoridades locales que tienen a cargo la gestión del sistema como por los distintos usuarios del agua y forma parte de la motivación del desarrollo de esta aplicación para ilustrar por medio de un caso real el método de gestión presentado en el capítulo III.

### **5.2.3. Esquema conceptual del aprovechamiento hídrico integral del Río San Juan**

Para este estudio el sistema esquematizado en la Figura 5.1, queda conformado por los siguientes componentes: la cuenca de aporte de escurrimientos superficiales; los tres embalses en serie Caracoles, Punta Negra y Ullúm con sus respectivas centrales a pie de presa; el tramo de río comprendido entre el embalse de Ullúm y el dique derivador Ignacio de la Roza; el dique derivador de riego José Ignacio de la Roza; el partidor de caudales San Emiliano; la zona bajo riego en el Valle de Tulúm; el tramo de río comprendido entre el dique J.I. de la Roza y el puente de Albardón y los pozos de bombeo oficiales distribuidos en los valles de Tulúm y Zonda.

En la modelación se estudió la relación entre los volúmenes de escurrimiento que ingresan al sistema y las variables climáticas en la alta cuenca y las relaciones físicas entre los distintos componentes del sistema (embalses, acuíferos, río, canales, sistemas de bombeo, etc.) entre sí y con el entorno (clima, tierra, usuarios, legislación de aguas, etc).

Se definieron las jerarquías de nivel, tiempo y modos del sistema, subsistema y componentes necesarios para representar al sistema en la etapa de

modelado matemático. La jerarquía de nivel está íntimamente relacionada al grado de detalle que se necesita o es factible hacer, dada la información disponible, para cada componente del sistema por lo que este aspecto quedará precisado en el punto 5.4. De acuerdo a los objetivos planteados y los datos disponibles, se fijó como jerarquía de tiempo la de **planeamiento**, es decir que el modelo está orientado a determinar medidas estratégicas de largo plazo en el que el horizonte de gestión es plurianual y la escala temporal utilizada es el mes. Se determinó la necesidad de incluir dentro del modelo varias jerarquías de modo, de tal forma que las reglas de operación de los distintos componentes del sistema (en particular de los tres embalses en cadena) pudieran trabajar bajo condiciones hidrológicas de llenado, de vaciado, de emergencia, preventivas y de restauración, lo cual lleva a construir distintos conjuntos de reglas que se activan diferencialmente según el estado que adoptan ciertas variables de control en el paso de tiempo anterior. Se establecieron reglas paramétricas dinámicas para la jerarquía de modo de *llenado*, esto es para el caso en que el volumen de agua disponible en el sistema supera al volumen total de demanda. Para el resto de las jerarquías de modo se establecieron reglas de operación fijas.

### **5.3 Etapa de Medición del Sistema**

La medición del sistema consiste en establecer los objetivos del análisis del sistema definido en la etapa anterior. El objetivo planteado para analizar el sistema hídrico del río San Juan fue el de encontrar un procedimiento de operación a largo plazo que otorgue al sistema ciertas garantías, fijadas como objetivos de gestión, sobre su capacidad de recuperación en situaciones de fallo y sobre la minimización de las magnitudes y duraciones de dichos fallos integrando dentro del objetivo todos los propósitos del aprovechamiento.



Para poder lograr englobar en una sola función objetivo los intereses de todos los propósitos, se recurrió a los índices de evaluación de fallo: ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad definidos anteriormente y al sistema de asignación de prioridades de propósitos e índices, conceptos ya analizados.

Para determinar tales índices es necesario definir previamente lo que se entiende por *fallo* o situación no satisfactoria para cada uno de los propósitos del aprovechamiento, que en el caso de estudio corresponden a riego, hidroenergía, control de crecidas, control de anegamiento y recreación. En el estudio se adoptaron las siguientes definiciones: Fallo de riego es la situación en que el volumen de agua destinado a riego por el sistema es inferior al demandado por dicho sector. Fallo de Control de Crecida es la situación en la cual el volumen de agua mensual descargada por el dique de Ullúm supera los 500 Mm<sup>3</sup>, volumen asociado a la generación de caudales límites a las que se pueden someter las obras de defensa existentes aguas abajo. Fallo de hidroenergía es la situación en la cual al menos una de las centrales de hidroenergía recibe un volumen de agua menor al volumen de demanda que para dicha central se ha establecido al comienzo de la simulación. Fallo por anegamiento es la situación en la cual la superficie de anegamiento pronosticada para la zona cultivada del valle de Tulúm en el mes de decisión supera las 1000 ha anegadas. Fallo de Recreación es la situación en la cual la cota del embalse de Ullúm es inferior a la cota mínima deseable para el uso recreativo en dicho embalse que es de 765 m.s.n.m. durante los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril.

El uso de agua potable e industrial no se considera en el análisis de fallos, ya que se ha asegurado una garantía de satisfacción del 100% introduciendo reglas fijas para todas las jerarquías de modo.

## **5.4 Etapa de análisis de datos**

La etapa de análisis de datos tiene por objeto reunir toda la información necesaria para caracterizar cuantitativamente las componentes del sistema, las variables y los parámetros que intervienen en el problema a resolver.

### **5.4.1. Caracterización de la cuenca de aporte de aguas superficiales**

El área de captación del Río San Juan se extiende en una región montañosa de aproximadamente 26,000 km<sup>2</sup> hasta el dique José Ignacio de la Roza. Termina de conformarse a fines del terciario y principios del Pleistoceno, en momentos en que la Cordillera de los Andes completa su ascenso y adquiere su morfología actual. Dicho proceso evolutivo condiciona la unión de sus afluentes principales, el abanico que forman los Ríos Castaño, Calingasta y de los Patos, en el valle longitudinal de Calingasta y da lugar a la formación del profundo valle antecedente por el que, desde Las Juntas, a 1300 m.s.n.m., comenzó a discurrir el Río San Juan, con energía suficiente para excavar su cauce, con rumbo oeste-este, disectando la naciente sierra del Tontal y su continuación al norte la sierra del Tigre, de las que captura afluentes de rumbo meridional (Arroyos Uruguay, Sasso y Río de la Ciénaga). La cuenca se extiende luego en la llanura oriental, recostada contra la Precordillera, forzándose su desagüe hacia el sur, ante el obstáculo que representa el macizo de la Sierra de Pie de Palo.

La cuenca se extiende en un tramo de 265 Km de la Cordillera de los Andes, desde el paralelo 30° 33' de latitud sur (Cordillera de Olivares) hasta el 32° Sur (faldeo norte del Cerro Aconcagua) y desde las cumbres de la Cordillera del Tigre y serranías del flanco occidental de la Precordillera hasta las altas cumbres que separan las vertientes del Atlántico y del Pacífico, de las que recibe el mayor aporte hídrico (F. Rodrigo, 1998), esto es entre los 69° y 71° de longitud oeste. (mapa ANEXO ).

La parte superior de la cuenca, alrededor del 50% del área total, está situada en la parte central de la cordillera de los Andes, donde las cotas van desde 3,500

m.s.n.m. a un máximo de 7,000 m.s.n.m. que es la cumbre del Aconcagua. Las curvas hipsográficas indican para la cuenca alta una cota promedio de 3,750 m.s.n.m.

La cuenca tiene un régimen de precipitación netamente nival. Las precipitaciones líquidas (pluviales) en la subcuenca inferior apenas alcanzan a los 100 mm/año. Aunque no se cuenta con estaciones sobre los 3,000 m.s.n.m., estudios realizados (Zakalik, 1990) permiten caracterizar el régimen pluvial de las distintas subcuencas que son: Río Castaño con 600 mm/año, Río Patillos con 400 mm/año y Río de los Teatinos con 300 mm/año. Un estudio del CFI, (1961) considera la subcuenca del río Castaño como de nieves, con lluvias ocasionales; a la del Río de los Patos Superior, como de glaciares y nieves bajas con poca permanencia, sin pasaje intermedio a hielo; y a la subcuenca del Río Blanco, con predominio de nieves permanentes y con influencia mayor en el régimen del río San Juan.

En general se acepta la teoría de Melli, (1948) que dice “en general, los primeros aumentos del caudal del Río San Juan provienen del Río de los Patos Superior; el mantenimiento del mismo es producido por el aporte continuo del Río Blanco, con predominio de nieves permanentes y con influencia mayor en el régimen del Río San Juan.” Sin embargo la escasa información y lo variado de sus fuentes, y la presencia de elementos naturales de retención de flujos como el bolsón de Calingasta no han permitido aún lograr ajustar un buen modelo de balance entre precipitaciones y escurrimientos en la cuenca.

El derrame anual promedio de la cuenca del Río San Juan a la altura del dique José Ignacio de la Roza es de 2078 Mm<sup>3</sup>.

#### **5.4.2 Elementos de almacenamiento y distribución de agua superficial.**

La cuenca contará con un sistema de tres embalses en serie, proyectados para entrar en funcionamiento a partir del año 2004, estando en estos momentos en construcción los embalses Caracoles y Punta Negra, y en operación desde 1980 el embalse de Ullúm.

El Embalse Caracoles está proyectado para una capacidad máxima de 565 Mm<sup>3</sup> y un volumen mínimo de operación (volumen muerto) fijado por el estudio de factibilidad en 265 Mm<sup>3</sup>. Se cuenta además con las ecuaciones representativas de la relación [Cota – Superficie] y [Cota – Volumen] del proyecto del embalse de Caracoles datos aportados por la Subsecretaría de Recursos Energéticos de San Juan y que se han incluido como ecuaciones de relación entre variables en el modelo. La operación de la Central hidroeléctrica está regida por ciertas normas de operación del embalse y de las turbinas hidráulicas (2 Francis) a instalar. Entre los límites y restricciones de operación más importantes, se menciona el nivel de máximo maximorum de operación del embalse fijado para la crecida milenaria (NAMO) en 1,110.80 m.s.n.m., el nivel de embalse máximo normal de 1,110 m.s.n.m. y el nivel de embalse mínimo normal de 1,085 m.s.n.m. En cuanto a las turbinas hidráulicas requieren ciertas condiciones de operación óptimas fijadas por un salto neto nominal de 150 m. Por otro lado, debe verificarse que el caudal turbinado cumpla con ciertos requisitos para obtener el máximo rendimiento de la turbina, como ser, el caudal absorbido bajo el salto nominal debe ser de 45 m<sup>3</sup>/s. Tales condiciones de operación permiten obtener una potencia nominal con rendimiento de 0.9 bajo salto nominal igual a 61,700 Kva por turbina.

El Embalse de Punta Negra está proyectado para una capacidad máxima de 500 Mm<sup>3</sup> y un volumen mínimo de operación (volumen muerto) fijado en 200 Mm<sup>3</sup>. Se cuenta con las ecuaciones representativas de la relación [Cota – Superficie] y [Cota – Volumen] del proyecto obtenidos de la Subsecretaría de Recursos Energéticos de San Juan e incluidas como ecuaciones de relación entre variables en el modelo. La operación de la Central hidroeléctrica está regida por ciertas normas de operación del embalse y de la turbina hidráulica que ésta posee. Entre los límites y restricciones de operación más

importantes están, el nivel de máximo maximorum de operación del embalse fijado para la crecida milenaria (NAME) en 950,30 m.s.n.m., el nivel de embalse máximo normal (NAMO) de 950 m.s.n.m. y el nivel de embalse mínimo normal (NAMI) de 920 m.s.n.m. En cuanto a las turbinas hidráulicas (2 Francis) requieren ciertas condiciones de operación óptimas fijadas por un salto neto máximo excepcional de 89 m, un salto neto máximo normal de 86.87 m, un salto neto nominal de 80 m, un salto neto mínimo de 51.67 m. Por otro lado, debe verificarse que el caudal turbinado cumpla con ciertos requisitos para obtener el máximo rendimiento de la turbina, como ser, el caudal absorbido bajo el salto nominal debe ser de  $42.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , el caudal mínimo aprovechable es de  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tales condiciones de operación permiten obtener una potencia nominal con rendimiento de 0.9 bajo salto nominal igual a 31,100 Kva por turbina.

El Embalse de Ullúm posee una capacidad máxima de  $440 \text{ Mm}^3$  (a cota 768 m.s.n.m. y con área 2900 ha) y un volumen mínimo de operación fijado en  $49 \text{ Mm}^3$  (a cota 745 m.s.n.m. y con área 710 ha). Esta última restricción se incluye para evitar el avance de los sedimentos hacia la zona de tomas de agua para uso de riego y de generación. Los valores de evaporación promedio mensual utilizados fueron obtenidos de la Unidad de Información Hidrometeorológica de la Universidad Nacional de San Juan. Se cuenta además con las ecuaciones representativas de la relación [Cota – Superficie] y [Cota – Volumen] del embalse de Ullúm obtenidos de la Subsecretaría de Recursos Energéticos de San Juan también incluidas como ecuaciones de relación entre variables en el modelo. La operación de la Central hidroeléctrica está regida por ciertas normas de operación del embalse y de la turbina hidráulica que ésta posee. Entre los límites y restricciones de operación más importantes se menciona el nivel de máximo maximorum de operación del embalse fijado para la crecida milenaria en 774.40 m.s.n.m., el nivel de embalse máximo normal de 768.00 m.s.n.m. y el nivel de embalse mínimo normal de 745.00 m.s.n.m. En cuanto a la turbina hidráulica requiere ciertas condiciones de operación óptimas fijadas por un salto máximo excepcional de 51.3 m, un salto máximo normal de 49.2m, un salto nominal de 44.0 m, un salto mínimo de

25.9 m. Por otro lado, debe verificarse que el caudal turbinado cumpla con ciertos requisitos para obtener el máximo rendimiento de la turbina, como ser, el caudal absorbido bajo el salto nominal debe ser de  $105.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , el caudal mínimo aprovechable es de  $26.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tales condiciones de operación permiten obtener una potencia nominal con rendimiento de 0.9 bajo salto nominal igual a 42,300 Kva, valores de potencia bajo el salto máximo normal y plena apertura de 47,000 Kva y valores de potencia máxima excepcional de 50,000 Kva. Con las relaciones anteriores se puede garantizar una producción energética que logre una generación anual media de 171,200,000 kwh; una generación anual máxima de 283,900,000 kwh y una generación anual mínima 37,100,000 kwh.

La modelación del tramo del Río San Juan entre el Embalse de Ullúm y el Embalse Ignacio de la Roza requirió el conocimiento de las características principales de esta conducción tales como su capacidad, que en este caso es ilimitada, por tratarse de un tramo natural y las pérdidas por infiltración estimadas en un 1.5 % del caudal escurrido.

El Embalse Ignacio de la Roza es una obra destinada a la derivación de agua hacia la red matriz de canales de riego, con una capacidad de  $200 \text{ Mm}^3$ . En este nodo del Sistema nace el canal matriz que alimenta, según las reglas operativas dadas al Partidor San Emiliano, los canales principales de riego del valle de Tulúm. Esta obra se utiliza también para suministrar aguas superficiales a la ciudad de San Juan.

La empresa de tratamiento y distribución del agua potable de la ciudad de San Juan (OSSE) posee su toma de alimentación en el Dique Ignacio de la Roza. La capacidad de la toma es de  $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se incluye en este elemento del sistema, la toma de la galería filtrante, con lo que la capacidad total de derivación a la planta de tratamiento es de  $6.04 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ .

### **5.4.3 Interacción de la cuenca subterránea del valle de Tulúm con el río y los sistemas de extracción y drenaje.**

El potencial de las aguas subterráneas en el valle de Tulúm es de consideración, lo cual permite alentar un incremento sustancial de los terrenos cultivados. Esto se debe al espeso cono de depósitos aluviales que las soportan, su emplazamiento dentro del área misma bajo riego, su volumen y sus variadas fuentes de recarga.

El acuífero de Tulúm, principal cuenca de agua subterránea del Valle de Tulúm, posee una superficie de 78,300 ha y se extiende entre las sierras pampeanas (Sierra de Pie de Palo) al este y la precordillera (Sierra del Villicum y Zonda) al oeste. En los ciclos secos el embalse de agua subterránea podría aportar el volumen necesario para el desarrollo de los cultivos mediante la utilización de un importante número de pozos (unos 8,000 privados con un caudal total de entre 220-330 m<sup>3</sup>/s y 118 importantes perforaciones oficiales localizadas en lugares estratégicos en condiciones de aportar un caudal de 13 m<sup>3</sup>/s). El acuífero recibe la recarga debida a filtraciones del río San Juan, a las pérdidas de las redes de riego del valle de Tulúm y al exceso de riego de las zonas cultivables del valle. Tiene drenajes por el Arroyo de Aguas Negras, el arroyo de los Tapones, el colector América, y Alfonso XIII entre otros. También tiene pérdidas por evaporación directa en las zonas de niveles piezométricos próximos a la superficie del terreno. Las extracciones corresponden a los bombeos distribuidos de la ciudad de San Juan, de las zonas regables del valle de Tulúm, y a la batería de pozos oficiales de San Martín, Angaco, Chimbas, 9 de Julio, Médano de Oro y Sarmiento. En total la capacidad de bombeo instalada en el valle de Tulúm es de 66.98 Mm<sup>3</sup>/mes.

El tramo del Río San Juan desde el Embalse I. De la Roza al Arroyo Los Tapones es un elemento natural importante, debido a que aporta la mayor cantidad de agua de recarga al acuífero de Tulúm. Ello se debe a la forma en que se opera el Dique Ignacio de la Roza y el Partidor San Emiliano, la cual posee un gran impacto en el control de los ingresos de agua a dicho acuífero. Las pérdidas por infiltración en este

tramo de río son importantes y siguen la siguiente ley que relaciona la infiltración de agua al acuífero (P) con el caudal que circula por el río (Q), ecuación ajustada por el Centro Regional de Aguas Subterráneas de San Juan (INHA):

$$P = 2.723 \times Q^{0.4765} \quad (P \text{ y } Q \text{ en [Mm}^3\text{/mes]})$$

En el centro del área bajo riego, desde Santa Lucía hacia el sudeste, los bajos de Baño del Chaparro, el Medanito, Médano de Oro, Ciénaga Grande y Arroyo de Agua Negra constituyen una zona deprimida, curiosamente alineada, paralela al cauce del río San Juan, que es interpretada por los geólogos como un antiguo cauce del río San Juan, durante el proceso del prolongado empuje de la placa terrestre de Nazca sobre la placa Sudamericana, lo que provocó el levantamiento sucesivo de la Cordillera Frontal y de la Precordillera en el Plioceno tardío, fenómeno que produjo el desplazamiento hacia el este del río San Juan.

Este cauce anterior, conjuntamente con la ciénaga Grande, constituyen un reservorio hídrico natural (cuenca subterránea) de gran significación y su explotación controlada para evitar situaciones de anegamiento y de salinización, podría ser aprovechada dado lo ideal del relleno aluvional para maniobras de recargas y extracciones de aguas destinadas a aumentar el área cultivable en el valle (Rodrigo, 1998).

#### **5.4.4 Caracterización de la zona bajo riego**

El sistema hídrico del río San Juan posee un valle cultivable de unos 100,000 has aproximadamente con un sistema de distribución de agua de riego por gravedad con más de 1,000 Km. de canales revestidos en hormigón, que ocupa el segundo lugar en tamaño en cuanto a obras de infraestructura de distribución de agua de riego de este tipo en la República Argentina, después del sistema de similares características construido en la provincia de Mendoza. Un componente muy importante del modelo lo constituye la red de riego y las zonas bajo riego. Los elementos principales corresponden al Canal Matriz que es una conducción de 2,000 m. de



longitud que sale del Embalse I. De la Roza y conduce el agua hasta el partidor San Emiliano. Este canal es revestido en hormigón por lo que no se suponen pérdidas en conducción y posee una capacidad máxima normal de 82.5 m<sup>3</sup>/s. (213 Mm<sup>3</sup>/mes) y máxima maximorum de 105 m<sup>3</sup>/s (272 Mm<sup>3</sup>/mes).

El partidor San Emiliano distribuye el agua de riego entre tres canales principales. En este estudio se ha adoptado una jerarquía de nivel que incluye solo el modelado a escala de canales principales. Estos tres canales aportan el agua de riego a la mayor parte de la superficie cultivable del valle. Se les denomina aquí canal 1 (canal Quiroga o del Norte), canal 2 (Canal Playa o Benavidez) y canal 3 (canal Céspedes).

Las características principales del canal 1 son las siguientes: posee una capacidad máxima normal de 40 m<sup>3</sup>/s. (103.68 Mm<sup>3</sup>/mes) y un máximo maximorum de 52,5 m<sup>3</sup>/s(136.08 Mm<sup>3</sup>/mes). Está impermeabilizado en toda su extensión de 37Km. y posee una pendiente de 0.4% a 6.8% por lo que no se suponen pérdidas por infiltración y riega una superficie de 34,000 has. entregando agua a los departamentos de Albardón, Angaco, San Martín y Caucete y una prolongación (canal secundario) totalmente impermeabilizada de 27 Km. con capacidad de conducción máxima normal de 16.5 m<sup>3</sup>/s. destinada al riego de 14,149 has en el departamento de 25 de Mayo. El primer tramo de 2.5 Km de longitud está situado sobre la margen derecha del río San Juan que atraviesa, casi perpendicularmente, de derecha a izquierda con dos galerías policéntricas paralelas de unos 2.3 Km. cada una.

La demanda de riego del canal 1 se calcula en función de la superficie empadronada con derecho a riego (59,076 ha), una distribución de cultivos de acuerdo a los censos agrícolas de los últimos 10 años y, de la evapotranspiración potencial de los cultivos. Finalmente se ha tenido en cuenta en el cálculo una eficiencia global de riego del 40%, que considera pérdidas en canales secundarios de distribución y eficiencias de aplicación del riego en fincas para entrega por surcos y melgas. Estos datos de demanda, conforman finalmente un patrón de demanda de riego promedio mensual que fue aportado por la Unidad de Información Hidrometeorológica de la Universidad Nacional

de San Juan. También se incluye en el modelo la existencia de un sistema de bombeo distribuido en la zona de riego del canal 1 con un total de 42 pozos que bombea del acuífero de Tulúm y posee una capacidad máxima de extracción de 34.819 Mm<sup>3</sup>/mes.

El Canal 2 denominado Benavidez o Playas tiene una longitud de 18 Km. y una capacidad de conducción máxima normal de 13.7 m<sup>3</sup>/s.. Entrega agua de riego a los departamentos de Chimbas, Rivadavia, Capital, Santa Lucía y 9 de Julio para una superficie cultivada de 13,680 has. aproximadamente. Atraviesa una zona densamente poblada, por lo cual es un canal con numerosas obras de arte (puentes, sifones, alcantarillas, pasarelas, etc.). Para reforzar la dotación al departamento más alejado (9 de Julio) se ha construido una batería de pozos que erogan un caudal de 1m<sup>3</sup>/s.

El canal 3 denominado Guillermo Céspedes tiene una longitud de 26 Km. y posee una capacidad de conducción máxima normal de 38 m<sup>3</sup>/s., es totalmente impermeabilizado por lo que no se suponen pérdidas por infiltración. Entrega agua de riego a los departamentos de Rawson, Pocito y Sarmiento que poseen un área cultivada de 31,400 has. Atraviesa una zona densamente poblada donde se ha realizado un tramo entubado subterráneo de unos 1,300 m. Posee tres prolongaciones importantes (canales secundarios): la prolongación 1 (canal carpintería) de unos 19 Km. de longitud total impermeabilizada con un caudal de 8,78 m<sup>3</sup>/s. que riega un total de 8,500 has.; la prolongación 2 (canal Sarmiento) de 16 Km. totalmente impermeabilizada con un caudal de 9 m<sup>3</sup>/s. que riega un total de 10,500 has. y la prolongación 3 (canal prolongación Centenario) de 21 Km. totalmente impermeabilizada con un caudal de 2,3 m<sup>3</sup>/s. que riega un total de 2,130 has.

El patrón de demanda de riego para este canal 3 fue elaborado con datos obtenidos de la Unidad de Información Hidrometeorológica de la Universidad Nacional de San Juan. El acuífero al que recarga el exceso de riego es el acuífero de Tulúm. Existe en el valle un sistema de bombeo distribuido con una capacidad máxima de extracción de 32 Mm<sup>3</sup>/mes.

La longitud total de los canales de los niveles secundario y terciario, estos últimos son los que entregan el agua a nivel de parcela mediante compuertas, corresponde a la siguiente distribución: 435 Km. de canales derivados del Canal del Norte, 233 Km. de canales derivados del Canal Playas y 394 Km. de canales derivados del Canal Céspedes. Además de estos existen un total de unos 400 Km. de canales no revestidos o en proceso de impermeabilización.

#### **5.4.5 Caracterización de la oferta de agua**

Casi el total de la oferta de agua, esto es el agua que ingresa al sistema hídrico lo constituyen los aportes del río San Juan. Los aportes laterales de los ríos Uruguay y Sasso no son significativos en cuanto al volumen de agua total anual. Sin embargo estos ríos encauzan grandes crecidas originadas en las intensas lluvias de verano precipitadas en sus áreas de captación (la lluvia máxima diaria con 200 años de período de retorno es de 100 mm) provocando en importante arrastre de sedimentos hacia el río.

En suma, la estación de aforos en el km 47.3 brinda el dato de caudal que egresa del área de captación del río San Juan y cuyos registros han sido utilizados para representar el ingreso de volúmenes de agua al sistema. El valor de caudal promedio para un registro continuo de 90 años en la estación de aforos Km 47.3 corresponde a 69 m<sup>3</sup>/s. Los datos utilizados para la caracterización estadística (Tabla B-1) de la variable de entrada de agua al sistema cubren una longitud de registro de 90 años (desde 1908 a 1997) fueron obtenidos en esta estación km. 47.3 dependiente del Departamento de Hidráulica de la provincia de San Juan. (ANEXO B)

#### **5.4.6. Caracterización de las demandas de agua.**

Todas las demandas de usuarios de agua (agua potable, hidroenergía y riego) se representaron en el modelo mediante un patrón característico de demanda (uno para cada usuario) que varía para cada mes del año y el cual se mantiene constante durante todo el período de simulación.

**a) Demanda de agua de riego**

Se simuló al valle completo como si fuera una zona con monocultivo correspondiente a una demanda promedio para 70,000 has. bajo riego. Las demandas de este sector se han simplificado asignando el siguiente patrón aportado por el Dpto. de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Juan, cuyos valores se presentan en la Tabla V.1.

**Tabla V.1 Volúmenes mensuales de Demanda**

Mes	Volumen de Demanda mensual (Hm <sup>3</sup> )				
	Riego	Central Caracoles	Central Punta Negra	Central Ullúm	Agua potable e industrial
Julio	5.7	24.2	22.9	66.96	4.15
Agosto	59.8	44.9	42.4	92.14	4.15
Septiembre	91.5	52.2	49.3	109.90	5.44
Octubre	113.7	91	85.9	110.88	5.44
Noviembre	160.9	103.1	97.4	137.89	5.44
Diciembre	218.9	121.3	114.6	158.63	5.44
Enero	227.6	121.3	114.6	167.40	5.44
Febrero	146.5	97	91.6	139.10	5.44
Marzo	65.7	77.6	73.3	121.06	4.15
Abril	18.8	64.3	60.7	110.16	4.15
Mayo	8.3	51	48.1	93.74	4.15
Junio	6.2	54.2	22.9	99.27	4.15

**b) Demanda de agua para hidroenergía en la Central de Caracoles**

El establecimiento del patrón de demanda de hidroenergía de la central de Caracoles se basó en el estudio de factibilidad de la central a pie de la presa Caracoles, realizado por la Secretaría de Recursos Energéticos de la provincia de San Juan, el cual corresponde a los valores de la Tabla V.1.

### **c) Demanda de agua para hidroenergía en la Central de Punta Negra**

El establecimiento del patrón de demanda de hidroenergía de la central de Punta Negra se basó en el estudio de la central al pie de la presa Punta Negra, realizado por la Secretaría de Recursos Energéticos de la provincia de San Juan, el cual corresponde a los valores de la Tabla V.1.

### **d) Demanda de agua para hidroenergía en la central de Ullúm**

El establecimiento del patrón de demanda de hidroenergía de la central de Ullúm se basó en el estudio de la información disponible sobre el régimen de operación de dicha central ubicada al pie de la presa Quebrada de Ullúm. Como valor mensual se adoptó el valor promedio derivado a la central por la Secretaría de Recursos Energéticos de la provincia de San Juan durante el período 1980 a 1997.

### **e) Demanda de agua para usos domésticos e industriales**

La empresa de tratamiento y distribución del agua potable de la ciudad de San Juan (OSSE) posee su toma de alimentación en el Dique Ignacio de la Roza. La capacidad de la toma es de  $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se incluye en este elemento del sistema, la toma de la galería filtrante, con lo que la capacidad total de derivación a la planta de tratamiento es de  $6.04 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ . La ciudad se abastece de agua potable a partir del sistema superficial con  $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . ( $5.44 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ ) en verano y  $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ . ( $4.15 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ ) en invierno, además de  $20,000 \text{ m}^3/\text{día}$  ( $0.6 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ ) provenientes de la galería filtrante, y  $30,000 \text{ m}^3/\text{día}$  ( $0.9 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ ) de bombeos del acuífero de Tulúm. La demanda total de agua potable es de  $75.54 \text{ Mm}^3/\text{año}$  cuya distribución mensual ha sido tomada en cuenta en la modelación como un patrón de demanda que representa los valores medios mensuales pero que se mantiene fijo a lo largo de todo el período de simulación que se presenta en la Tabla V.1.

## **5.5 Modelado del Sistema**

### **5.5.1 Supuestos del Modelo de Simulación Continua.**

El sistema estudiado y los problemas que presenta la zona, desde el punto de vista de recursos hídricos, han sido simplificados de tal manera de lograr un modelo que ocupe el menor número de expresiones analíticas posibles en la descripción de sus características y de los vínculos entre elementos – componentes. Sin embargo el modelo permite la fácil introducción de modificaciones, y aumento del nivel de detalle conforme sean los objetivos del estudio y los datos disponibles.

Las simplificaciones introducidas a la realidad permiten representar al sistema según se indica en la (Figura 5.1), lo cual implica la admisión de los supuestos que se enuncian a continuación:

#### **a) Supuestos del Sistema físico**

Los sistemas poseen dos aspectos importantes para su análisis el estructural y el funcional. El aspecto estructural es básicamente la organización de los componentes del sistema, es decir su organización espacial y sus interacciones. Mientras que los aspectos funcionales de los sistemas son procesos, es decir fenómenos que dependen del tiempo, esto es la organización temporal del sistema.

Entre los supuestos adoptados en el modelo referidos a la organización estructural está el cumplimiento de la ley de la conservación de la masa dentro del sistema; contar con una superficie de riego única con monocultivo; no modelar la interacción entre el embalse de Ullúm y el acuífero de Zonda debido a que se ha construido un dique lateral que interrumpió dicha interacción; suponer que el río cede agua al acuífero de Tulúm con tasa de infiltración definida; aceptar que las leyes de almacenamiento (cota – área - volumen) de los embalses superficiales son invariables y conocidas; no limitar la capacidad de los sistemas de bombeo para control del

anegamiento de suelos; adoptar una eficiencia para las turbinas hidráulicas del 95% y suponer una eficiencia global del sistema de bombeo del 80%.

En cuanto a la organización temporal, el modelo de simulación es continuo y los procesos de cálculo se realizan en forma secuencial y en modo siempre hacia delante (forward chaining) en el mismo sentido que sigue el flujo de agua dentro del sistema.

#### **b) Supuestos de los procesos**

Los supuestos sobre los procesos más importantes que ocurren dentro del sistema, son los siguientes. El proceso de evaporación se modela sin tener en cuenta la variación temporal de la superficie del espejo de agua de embalse durante el tiempo asignado al paso de simulación (mes), asumiendo una tasa de demanda evaporativa de la atmósfera promedio para cada mes (calculado según estadísticas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Estación Pocito - San Juan). Estos valores no tienen en cuenta las variaciones meteorológicas (viento, radiación solar, temperatura) en el cálculo de dicha demanda de evaporación mensual. La curva de demanda de riego no tiene en cuenta los efectos del clima en el consumo de los cultivos (no se caracteriza el clima en este modelo), sin embargo se ha utilizado un patrón que refleja la variación mensual de esta demanda. La demanda de agua para energía no tiene en cuenta el comportamiento estocástico del mercado eléctrico, si bien se ha utilizado un patrón de demanda variable en el tiempo. La infiltración en ríos y zonas de riego no tiene en cuenta el estado de humedad anterior del suelo. El modelo de pronóstico de superficie de anegamiento tiene en cuenta el estado de humedad antecedente en el valle hasta tres meses anteriores al mes de pronóstico. La lluvia no es tenida en cuenta como variable de entrada dada su pequeña incidencia en el estudio plurianual respecto a otros componentes del ciclo hidrológico. Los volúmenes de escurrimiento mensual utilizados en las simulaciones corresponden a los valores de la serie histórica de escurrimientos



aforados en la estación Km 47.3, planteándose el problema como un análisis de toma de decisiones basado en condiciones de certeza.

**c) Parametrización de reglas de los elementos de control.**

Se han elaborado bloques jerárquicos que contienen reglas lógicas de operación específicas de los distintos elementos de control de la distribución del agua en el sistema, como son, el embalse Caracoles, el embalse Punta Negra, el embalse Ullúm, el dique Ignacio de la Roza, el Partidor San Emiliano y el sistema de bombeo para el control de anegamiento.

Cada bloque contiene un conjunto de reglas estructuradas a través de expresiones lógicas del tipo (IF...THEN...), fórmulas aritméticas sencillas y desigualdades, utilizadas para introducir en el modelo las consignas operativas y la jerarquización de modos dentro del sistema de gestión.

A continuación se ilustra la estructura de los bloques de consignas operativas que guían el proceso de cálculo de la descarga de volúmenes de agua de los embalses en cadena Caracoles (Figura 5.3), Punta Negra (Figura 5.4) y Ullúm (Figura 5.5).

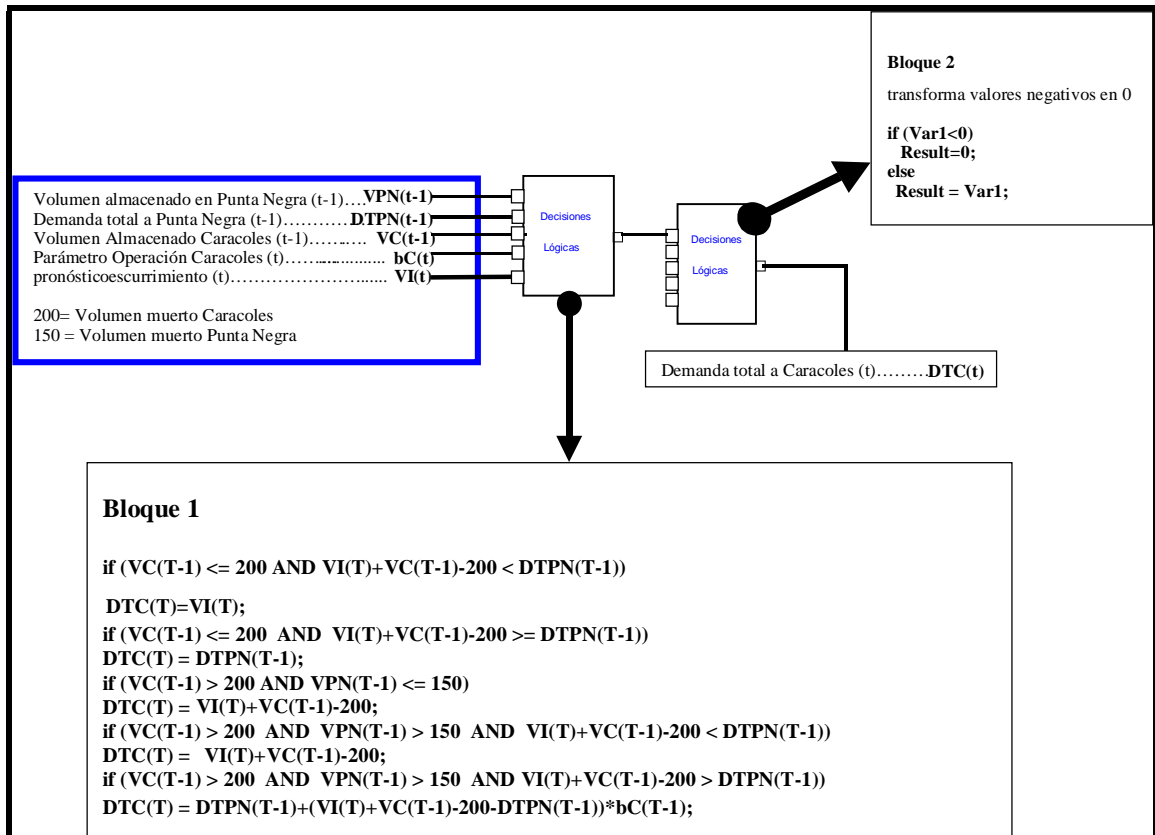


Figura 5.3: Bloque de reglas operativas del embalse Caracoles

Como puede observarse en las Figuras, el volumen de agua demandado a cada embalse se calcula no sólo en función de las demandas de los usuarios directos sino en función de los requerimientos del sistema en su conjunto. Dado que los embalses de Caracoles y Punta Negra aún no están en servicio, se ha incluido un grupo de reglas, que dependen de la disponibilidad de recurso agua, destinadas a realizar el llenado de los embalses cuando estos se encuentran por debajo de su embalse muerto. Una vez superado este modo jerárquico de llenado inicial de embalses, las reglas incluidas impiden que los embalses se vacíen por debajo del volumen muerto asignado.

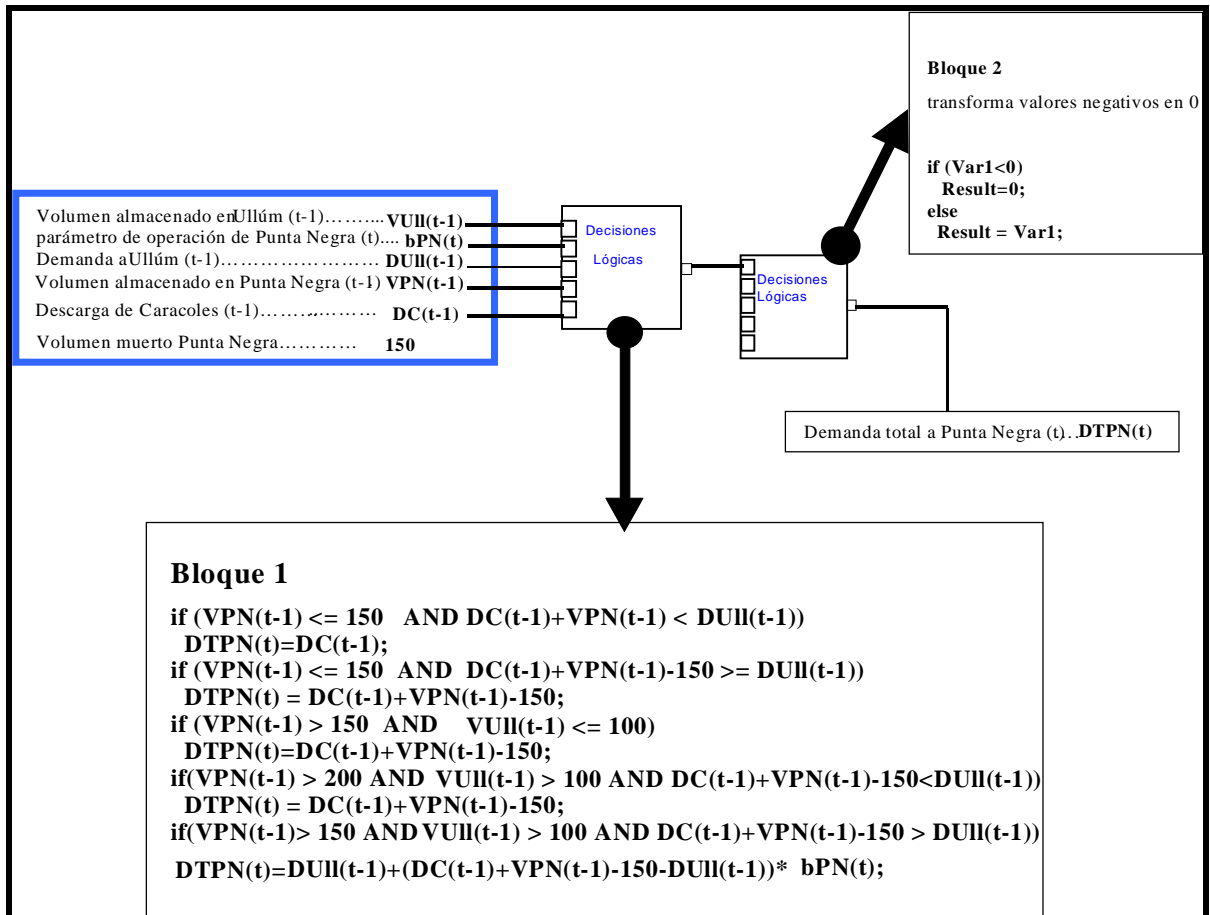


Figura 5.4: Bloque de reglas operativas del Embalse Punta Negra

En los bloques de cada embalse se ha incluido una última regla destinada a la jerarquía de modo caracterizada porque todos los embalses tienen un volumen almacenado superior al embalse muerto y existe disponibilidad de agua por sobre el volumen demandado al embalse por el sistema para el mes analizado (modo de llenado). Esta regla está parametrizada a través de un coeficiente. La parametrización consiste en transformar la ecuación que define el valor de la demanda del sistema en cada embalse según:

$$\text{Demanda}(i) = \text{Dem}(i) + [C(i) \times V_{\text{disp}}(i)]$$

donde  $i$  = identifica al embalse,  $\text{Demanda}(i)$  es la demanda de agua parametrizada del sistema al embalse  $i$ ,  $\text{Dem}(i)$  la demanda de agua actual del sistema al embalse  $i$ ,

$V_{disp}(i)$  es el volumen disponible en el embalse  $i$  y  $C(i)$  el parámetro de decisión sobre la demanda a realizar del embalse ( $i$ ).

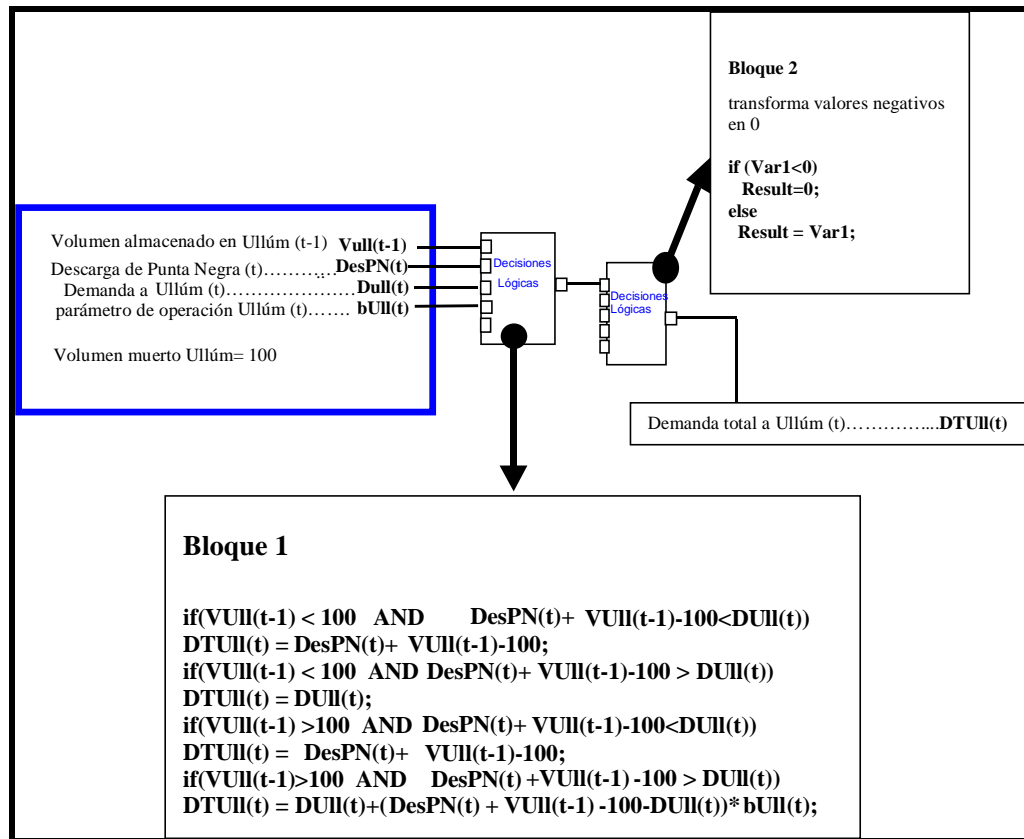


Figura 5.5 : Bloque de reglas operativas del embalse Ullúm

Los otros tres elementos de control del sistema: el dique Ignacio de la Roza; el Partidor San Emiliano y el Sistema de bombeo para el control de anegamiento, poseen reglas estructuradas con el mismo concepto que el analizado en detalle para los embalses en cadena, incluyendo también una regla parametrizada.

En particular la regla parametrizada del Partidor San Emiliano actúa solo en aquellas situaciones en que el volumen que ingresa al partidor es superior a la demanda de riego, en este caso, las reglas operativas derivan al río el volumen excedente sobre la

demanda de riego multiplicado por un parámetro de operación, en cambio, si el volumen que ingresa al partidador no supera el volumen que demanda el sector de riego, entonces la decisión es no derivar agua al río. La última condición garantiza el balance de masas en el partidador.

if Driego < (DT1 - IT1)

DT2 = ((DT1-IT1)-Driego) \* (1 + bPSE)

else

DT2 = 0

If DT2 > (DT1-IT1)

DT2 = (DT1 - IT1)

Donde:

Driego= Volumen de demanda mensual de riego (Mm<sup>3</sup>)

DT1-IT1 = Volumen que ingresa al partidador San Emiliano

DT1 = Volumen que circula por el tramo 1 del río San Juan

IT1 = Volumen que se infiltra en el tramo 1 del río San Juan

IT1= DT1 \* 0.15

DT2 = Volumen derivado por el partidador San Emiliano el tramo 2 del río San Juan

bPSE = parámetro de operación del partidador San Emiliano.

Un análisis detallado del significado físico del parámetro de operación **bPS** y su influencia en la determinación de los índices de fallo del sistema se incluye en el punto 5.5.4.

Otro elemento de control importante en el sistema, es el sistema de bombeo. En el caso del río San Juan analizado, se ha considerado que no existen restricciones a las capacidades de extracción, lo cual permite analizar la capacidad necesaria de bombeo para la regla de operación seleccionada. Una vez definida la cantidad de agua a entregar al río por el Partidor San Emiliano, se conoce entonces el volumen a ser derivado a la red de riego, lo que permite calcular, en el caso que no se derive agua al río el excedente de agua entregado a la zona cultivada por comparación con la demanda de agua de los cultivos. Para evitar el anegamiento, entonces, el gestor puede decidir que porcentaje de dicho volumen de agua entregado en exceso a los cultivos desea extraer del acuífero para evitar forme parte del proceso de anegamiento. Esta decisión la realiza asignando un valor al parámetro **bBombeo**. A continuación se detalla el conjunto de reglas de operación del sistema de bombeo.

$$\text{Derivado Riego} = DT1 - IT1 - DT2$$

$$\text{if Derivado Riego} > \text{Driego}$$

$$\text{Excedente} = (\text{Derivado Riego} - \text{Driego}) * \text{bBombeo}$$

else

$$\text{Excedente} = 0$$

$$\text{VcirculaT2} = DT2 * \text{bBombeo}$$

$$IT2 = 2.723 * V_{circulaT2}^{0.4765}$$

Superficie Anegada = Modelo Pronostico (Excedente, IT2)

Donde:

Derivado Riego = Volumen de agua que ha sido derivado a la red de riego por el Partidor San Emiliano

DT1 = Volumen que circula por el tramo 1 del río San Juan

IT1 = Volumen que se infiltra en el tramo 1 del río San Juan

DT2 = Volumen derivado por el partidor San Emiliano el tramo 2 del río San Juan.

BBombeo= coeficiente de bombeo seleccionado por el gestor para realizar el control de anegamiento.

Excedente = Volumen que se entrega en exceso a la red de riego multiplicado por el coeficiente de bombeo. Representa el volumen de agua que se deja infiltrar al acuífero luego de la decisión de control de anegamiento

$V_{circulaT2}$  = Volumen de agua que circula por el río en el tramo 2 luego de la decisión de control de anegamiento.

IT2= Volumen de agua que se infiltra al acuífero desde el río en el tramo 2 luego de la decisión de control de anegamiento.

Superficie Anegada= Superficie de anegamiento en el valle de Tulum producida por la actual gestión del sistema y que se calcula con el modelo de anegamiento descrito en el punto 5.5.2- h.

**d) Escenario de gestión**



El escenario de gestión está conformado por los valores que el usuario asigna a un subconjunto del conjunto formado por todos los parámetros controlables presentes en el sistema y por todas las variables de entrada.

La dimensionalidad del problema de gestión, entonces, depende del número de parámetros de control y de las variables de entrada que el usuario selecciona como generadores de distintos escenarios de gestión y que adoptarán valores invariables durante una corrida del modelo de simulación. Al conjunto de valores asignados al grupo de parámetros y variables así seleccionado conforma entonces lo que se denomina el *escenario de gestión*.

En el sistema hídrico del río San Juan se distingue el siguiente subconjunto de parámetros y variables posibles de formar parte de grupos generadores de escenarios de gestión: el valor inicial de almacenamiento en cada embalse superficial; la cantidad de superficie anegada en el valle del Tulúm al comienzo de la simulación; el coeficiente de eficiencia de aplicación de agua de riego; el horizonte de simulación; el mes de inicio de la simulación; los patrones de demanda de los distintos usuarios; la tasa de evaporación mensual de la atmósfera en la zona de embalses; los valores de escurrimiento del río San Juan para el horizonte de gestión; los parámetros de las reglas operativas de los elementos de control de distribución de agua seleccionados.

Definir distintos valores para todos los parámetros controlables del sistema y las variables de entrada incluidos en el modelo, implicaría un problema de gestión de muy alto grado de dimensionalidad, por ello en general se adoptan valores fijos para la mayoría de ellos en todas las simulaciones que formarán parte de un análisis particular y los distintos escenarios analizados se generan variando solamente el valor de un subconjunto de parámetros menor. Esto disminuye la dimensionalidad del problema de gestión, y mejora la comprensión del gestor sobre la sensibilidad del sistema a la modificación de estos parámetros. Los demás parámetros y variables de entrada a los

cuales se le asigna un valor invariante en todas las simulaciones pasan a ser condiciones iniciales del análisis.

En este trabajo, la generación de escenarios se realizó a partir de la asignación de valor a los parámetros que definen las reglas de operación de los tres embalses en cadena, la regla de operación del partidor San Emiliano y la regla de operación del sistema de bombeo para control de anegamiento en el valle del Tulúm.

#### **e) Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales adoptadas para el modelo de simulación son entre otras : el volumen almacenado inicialmente en los embalses superficiales; la superficie anegada en el valle del Tulúm al comienzo de la simulación; el coeficiente de eficiencia de aplicación de agua de riego (0.4); el horizonte de simulación (323 meses); el mes de inicio de la simulación (julio); los patrones de demanda de los distintos usuarios (riego, agua potable, hidroenergía); la tasa de evaporación mensual de la atmósfera en la zona de embalses y los valores de escurrimiento del río San Juan para el horizonte de gestión, (serie histórica observada entre julio de 1969 y diciembre de 1996).

#### **5.5.2. Módulos del Modelo de Simulación**

El diseño y construcción del sistema se realizó a través del modelado matemático de subprocesos y su jerarquización en subsistemas los cuales se llamarán aquí *módulos*, aprovechando las bondades del ambiente de simulación Extend. A continuación se describen los distintos módulos y bloques desarrollados que representan, junto con los vínculos existentes entre ellos y con el entorno, al sistema de recursos de agua de la cuenca del río San Juan.

## a) Embalses

Para el desarrollo de este módulo se debió modificar el bloque *Accumulate*, provisto originalmente por EXTEND en su librería GENERIC.LIX, ya que el mismo no permitía simular el comportamiento de las descargas de un embalse con una exigencia de cota máxima. Se desarrolló un lenguaje C un nuevo bloque bautizado *embalse2* cuya estructura cubre todas las posibles situaciones a que se ve sometido durante la simulación. Se agregó a este bloque un conector para ingreso del volumen máximo que no puede ser superado, y un conector de salida que arroja el valor de los excesos de agua que deja pasar el bloque por sobre el valor de la demanda y que no puede retener por la condición de volumen máximo.

La variable de entrada al bloque *embalse2*, corresponde a los volúmenes de escurrimiento mensuales que el río aporta al embalse superficial en el caso del embalse Caracoles, o a los volúmenes de descarga del embalse inmediato aguas arriba para el caso de embalses en serie aguas abajo (caso de Punta Negra y Ullúm).

Los valores de salida entregados por el bloque *embalse2* son, el volumen almacenado en el embalse, el volumen descargado por los elementos de control del embalse y el volumen descargado por vertederos de excesos si los hubiera (Figura 5.6).

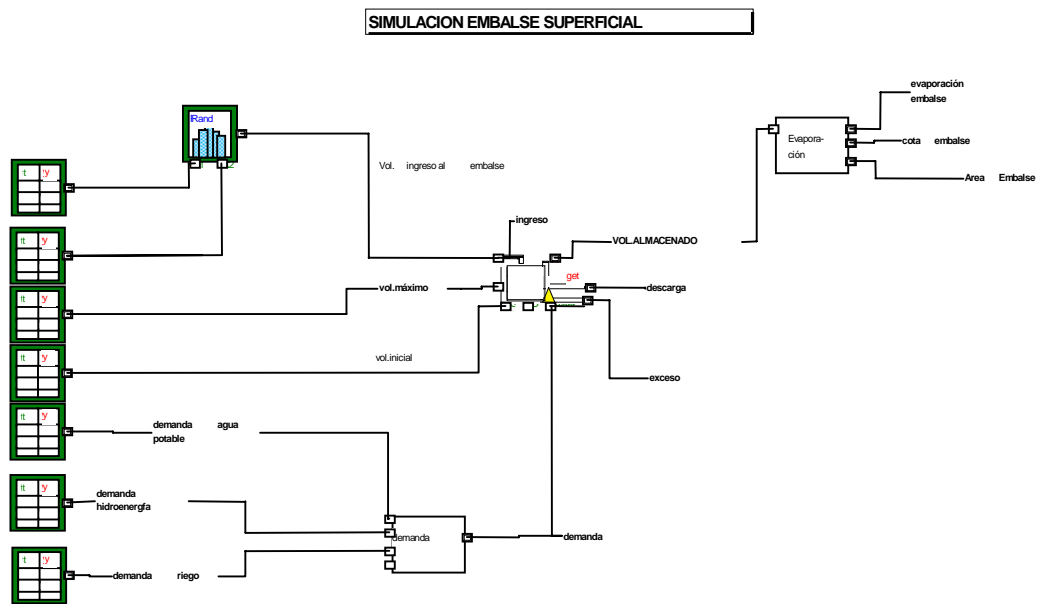


Figura 5.6: Esquema de Entrada y salida de datos del Modulo *embalse2*.

**b) Cálculo de la evaporación del embalse**

El cálculo de demanda requiere un cálculo de evaporación directa del embalse, cuyo volumen mensual no es despreciable. Como la evaporación depende del área del espejo de agua y ésta a su vez es función de la cota de embalse, la cual depende del volumen contenido en el mismo, es necesario calcular dichos valores antes de realizar el cálculo de evaporación. Una simplificación que hace el modelo a la realidad es considerar para el cálculo, el valor del área de espejo correspondiente al volumen

almacenado al comienzo del intervalo, aunque en realidad el espejo varía día a día durante el mes entre el contenido del embalse en el instante inicial y final del intervalo de tiempo.

Para el cálculo se utilizaron bloques **Equation** que representan las relaciones entre las variables. En el primer bloque está representada la curva *volumen almacenado vs cota* de embalse. En el segundo la curva que representa la relación *cota vs área de embalse* y en el tercero la ecuación que calcula la evaporación directa en función del área del embalse calculada previamente y una tasa de evaporación promedio para el mes.

### c) Análisis de demanda

La demanda está compuesta por demanda de agua para riego, demanda de agua para hidroenergía, demanda de agua potable y demanda evaporativa de la atmósfera.

Este módulo integra la demanda en cada embalse en forma inteligente. Dado que el agua que se entrega a la central hidroeléctrica es restituida al río aguas abajo no deben sumarse directamente la demanda de riego y la demanda de hidroenergía sino que lo entregado para cubrir la demanda de hidroenergía forma parte de lo descargado para satisfacer la demanda de riego. Además, si en alguna maniobra la demanda de riego es inferior a lo entregado para satisfacer la demanda de energía el exceso será derivado al río por el módulo que representa al operador del Partidor San Emiliano (derivador de aguas) sin ser derivado a la red de riego.

Una vez integradas las demandas de los distintos usuarios se realiza el cálculo de la demanda total que el sistema realiza a cada embalse. Este valor de demanda depende no solo de los requerimientos de los usuarios, calculados en este punto, sino además de las consignas operativas que se han definido en el punto 5.5.1.. Con base en esta demanda total del sistema, el bloque embalse calcula una descarga

controlada del embalse y las descargas de excesos teniendo en cuenta el volumen máximo admitido en cada uno de los embalses.

**d) Tramo río numero 1**

Este módulo elimina del sistema el volumen de agua requerido por la evaporación y calcula una infiltración que recarga (alimenta) el embalse subterráneo (acuífero libre) estimada en el 1,5% del volumen que escurre entre el Dique de Ullúm y el Dique Derivador (partidor) San Emiliano.

**e) Partidor San Emiliano**

Este módulo decide la cantidad de agua que se deriva al río y la que se entrega a la red de riego. Esta última será tanta agua como le sea posible, para satisfacer la demanda de riego, considerando el agua que realmente le llega, luego de eliminar lo que se pierde por la infiltración en el tramo 1 del río.

**f) Central Hidroeléctrica**

Este módulo calcula la energía producida por la central hidroeléctrica a pie del embalse, la cual es función de la cantidad de agua derivada a la central y del salto útil (cota del embalse referida al nivel del eje de la turbina).

Este módulo también permite salirse del patrón de demanda promedio entregado como dato base, en aquellos casos que el volumen de agua erogada por el embalse supere el valor de demanda de la central. La única restricción que se impone es que el caudal máximo turbinable no supere el valor máximo admisible (por ejemplo, 315Mm<sup>3</sup>/mes para la central Ullúm).

**g) Red de Riego**

Este módulo simula el comportamiento de la zona bajo riego. En este modelo no se subdividió el valle en varias zonas sino que se simuló al valle completo como si fuera una zona con monocultivo correspondiente a una demanda promedio para 70,000 ha bajo riego.

Primero se calcula lo que realmente recibe la zona bajo riego (AGUA RIEGO), considerando lo que ingresa por escurrimiento superficial (D.RED RIEGO), lo que ingresa por bombeo para control de anegamiento y lo que ingresa por bombeo destinado específicamente a riego (agua acuífero). Este último valor se obtiene de calcular la necesidad de bombeo de riego como la diferencia entre los dos primeros valores y la demanda real de los cultivos dada como dato. Finalmente la variable agua acuífero representa lo que aporta el acuífero a la red de riego en concepto de suplir déficits de riego.

Finalmente este módulo también estima la cantidad de agua que se infiltra bajo la zona de riego y que recarga el embalse subterráneo. Esta infiltración es función de la eficiencia total del sistema de riego adoptado. En la simulación realizada se consideró que la infiltración era del orden del 40% del volumen destinado a riego (Figura 5.7).

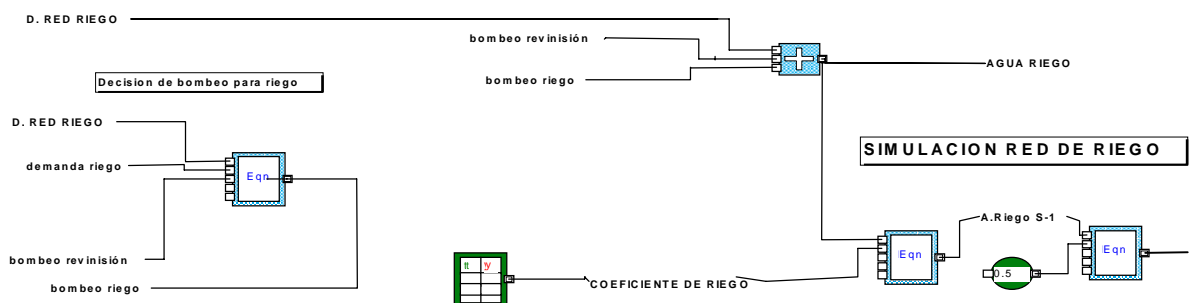


Figura 5.7: Esquema de Distribución de agua a Red de Riego y operación del Sistema de Bombeo

## **h) Pronóstico de la Superficie de anegamiento**

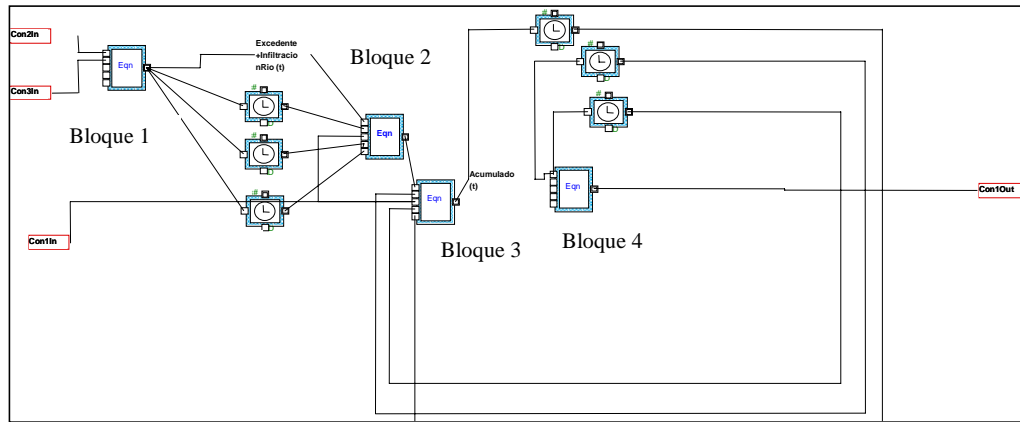
Se ha ajustado un modelo de pronóstico de superficies de anegamiento en el valle del Tulúm sustentado en la información de campo obtenida a través de una amplia red de freatómetros instalada por el Departamento de Drenaje de la Dirección de Planificación de Obras Hidráulicas dependiente del gobierno provincial. La red cuenta actualmente con 829 freatómetros de 3 a 6 metros de profundidad que se distribuyen en un área de unas 141,500 has. de un total de 323.300 has. que abarca todo el valle. La red de 6 metros se ha diseñado para reforzar la información de la red de 3 metros en lugares con fluctuaciones de mayor rango.

Lamentablemente la información disponible no es continua sino que se han realizado cuatro lecturas anuales en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre para los años 1991 a 1994. La densidad de freatómetros no es uniforme y oscila según el Departamento analizado entre 100 y 200 Has./freatómetro siendo en promedio de 140 has/freatómetro. La información obtenida por esta red ha sido llevada a una base de datos la cual ha servido para construir, en AutoCAD, las curvas de igual profundidad de nivel freático relativas al nivel de terreno (Mapa A-2 ANEXO A). Estos planos han servido de base para calcular planillas que entregan para cada evento de medición, los valores de superficie anegada clasificadas por el rango de profundidad de freática entre 0 y 0.5 m; 0.5 y 1 m.; 1 y 1.5 m.; 1.5 y 2. m; 2. Y 2.5 m ; 2.5 y 3m. y más de 3 m.

El modelo de pronóstico elaborado es un simple modelo de balance hídrico de flujo vertical que toma como dato base la información de superficies anegadas para los dos primeros estratos (de 0 a 1 m.) y establece relaciones entre los volúmenes de anegamiento (área anegada x espesor de 1 m.), los volúmenes en exceso entregados a la red de riego por sobre el patrón de demanda y los volúmenes de agua derivados al río San Juan por el Partidor San Emiliano y el Dique Ignacio de la Rosa. Los coeficientes de ponderación de cada variable dentro del modelo (Figura 5.8-1) se interpretan como porcentajes de acumulación (+) de agua en el estrato del acuífero de profundidad entre 0



y 1 m o de drenaje (-) de agua de este estrato a estratos inferiores o fuera del sistema subterráneo y han sido ajustados comparando la respuesta del modelo de balance con los valores de superficie realmente anegada obtenida de los mapas de isobatas (Mapa A-2 ANEXO A). El bloque elaborado para representar estas relaciones presenta la Figura (5.8-1).



**Bloque 1**  
**Result = Var1\*1+ Var2\*0.15;**

Donde:  
 Var1= Excedentes de agua en la zona cultivada luego del bombeo para control de anegamiento  
 Var2= Agua excedente de lo derivado al tramo 2 del río San Juan luego del bombeo de control de anegamiento  
 1 = indica que el 100% del excedente en la zona cultivada se infiltra y recarga la napa subterránea  
 0.15= indica que un 15% del agua excedente que circula por el río en el Tramo 2 se infiltra y recarga la napa subterránea  
 Result= Cantidad de volumen de recarga que recibe el acuífero

**Bloque 2**  
**if(V3<7500)**  
**Result = 0;**  
**if(V3>7500 and V3<10000)**  
**Result = V2\*0.15;**  
**else**  
**Result=V1\*0.3+V5\*0.3;**

Donde:  
 V1= Cantidad de volumen de recarga que recibe el acuífero en (t)  
 V2= Cantidad de volumen de recarga que recibe el acuífero en (t-1)  
 V3= Superficie anegada en (t-1)  
 V4= Cantidad de volumen de recarga que recibe el acuífero en (t-2)  
 V5= Cantidad de volumen de recarga que recibe el acuífero en (t-3)  
 7500 y 10000 = Valores de Superficie anegada con nivel freático ubicado entre 0 y 1 m. de profundidad en (has)  
 Result= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0 y 1m. desde el nivel de suelo en la primer etapa de cálculo (t)

**Bloque 3**  
**if(Var3<7000)**  
**Result = Var1 + Var2;**  
**if(Var3>7000 and Var3<10000)**  
**Result = Var1 + Var2 - Var4\*0.1-**  
**-Var5\*0.1;**  
**else**  
**Result=Var1+Var2-Var4\*0.3;**

Donde:  
 Var1= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el suelo en la primer etapa de cálculo  
 Var2= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el suelo en la segunda etapa de cálculo  
 Var3= Superficie anegada en (t-1)  
 Var4= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el suelo en la segunda etapa de cálculo  
 Var5= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el suelo en la segunda etapa de cálculo  
 Result= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el suelo en la segunda etapa de cálculo

**Bloque 4**  
**Calcula la superficie anegada**  
**Result = Var1**  
**if(Result<0)**  
**Result=0**

Donde:  
 Var1= Volumen de agua acumulada en el estrato de acuífero entre 0m y 1m desde el nivel de suelo en la segunda etapa de cálculo (t) en (Hm3)  
 Result= Superficie anegada en (Has)  
 100= factor de conversión a Has

Figura 5.8-1: Modelo de pronóstico de superficie de anegamiento

La siguiente (Figura 5.8-2) muestra la comparación entre los valores de volumen de anegamiento presente en la capa entre 0 y 1 metro de profundidad desde el pronosticada por el modelo de balance implementado en el modelo de simulación Extend.

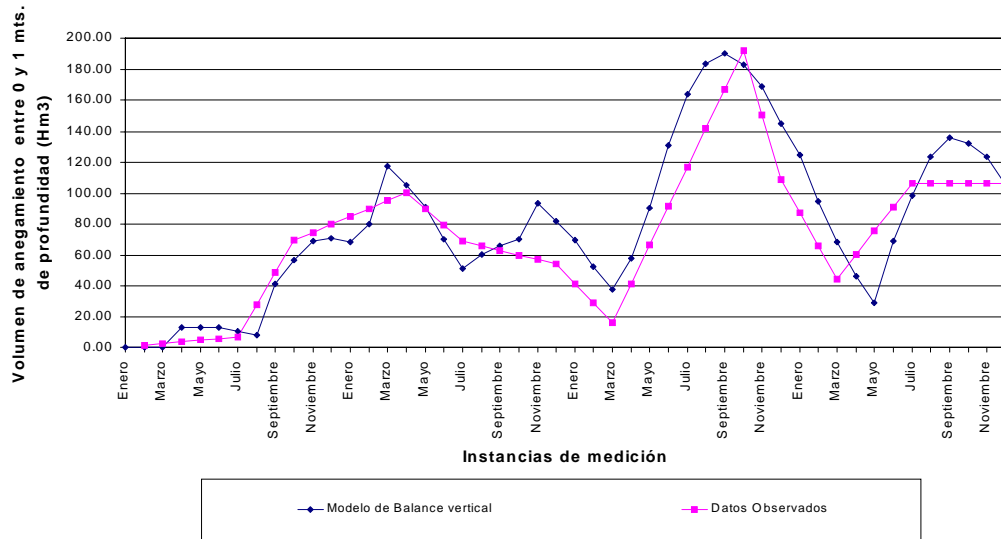


Figura 5.8-2: Volumen de Anegamiento (estrato 0 a 1m.) en distintos instantes de observación.

### i) Energía de Bombeo

La superficie de anegamiento pronosticada por el modelo de balance vertical descrito permite calcular el volumen que es necesario extraer por el sistema de bombeo para lograr el control del anegamiento en el estrato de 0 a 1 m., ello permite a su vez calcular la energía necesaria para lograr la depresión de la napa freática en las zonas afectadas por debajo de 1 m de profundidad. La energía depende del volumen mensual de extracción y de la profundidad de la cual se extrae el agua, la cual depende de la zona de extracción. A los efectos de este modelo se adoptó el supuesto que dicha profundidad es de 100 m, por ser este el promedio de profundidades de los pozos del sistema de

bombeo oficial que opera el Departamento de Hidráulica de la provincia y no se tuvo en cuenta la heterogeneidad de suelos.

**j) Índices de evaluación de fallo (ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad)**

En el punto 2.4.1. se introducen los conceptos fundamentales sobre la utilización de los índices de evaluación de fallo como medidas de efectividad de los sistemas. En el siguiente punto se detalla el algoritmo implementado en Extend, que, partiendo de la definición de fallo para los distintos propósitos del aprovechamiento del agua en el sistema hídrico del río San Juan dados en el punto 5.3, permite calcular los índices de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad de cada propósito.

El algoritmo (Figura 5.9) sigue 4 pasos de cálculo bien definidos y comunes a todos los propósitos: 1) Detección y cálculo de la magnitud de fallo 2) Cálculo de la probabilidad de que un estado de falla se mantenga en esta situación en el período siguiente, 3) Cálculo de la probabilidad de que un estado de Satisfacción mantenga esta situación en el período siguiente y 4) cálculo de los valores de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para el período de simulación corrido.

## INSTANCIAS DE CÁLCULO DEL ALGORITMO DE ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE FALLO

### Paso 1

- A- Calcula el Estado de falla(i,t) (uso i período t)  
 Estado falla(i,t) = 1 indica Fallo  
 Estado falla(i,t) = 0 indica Satisfacción
- B- Calcula el número de fallas entre t=0 inicial y t=N actual (N = horizonte de simulación)  
 $nfallas(i,N) = \text{SUMA}(\text{Estado fallas}(i,t))$  (integra entre t=0 y t=N)

### Paso 2

- C- Calcula la Probabilidad de que un estado de falla mantenga esta situación en el período siguiente como:

$$P(X\%)_t = P(M/F)_t = \frac{\text{SUMA}(\text{Estado } (F_t/F_{t-1})) \text{ entre } t=0 \text{ y } t=N}{nfallas(i,N)}$$

### Paso 3

- E- Calcula el Estado Satisfactorio(i,t) (uso i período t)  
 Estados satisfactorios(i,t) = 1 indica Satisfacción  
 Estados satisfactorios(i,t) = 0 indica Fallo
- F- Calcula el número de Estados Satisfactorios(i,t) entre t=0 inicial y t=N actual  
 numero de Estados satisfactorios(i,N) =  $nfallas(i,t) - N$  (integra entre t=0 y t=N)
- G- Calcula la Probabilidad de que un estado Satisfactorio mantenga esta situación en el período siguiente como:

$$P(Y\%)_t = P(M/S)_t = \frac{\text{SUMA}(\text{Estado } (S_t/S_{t-1})) \text{ entre } t=0 \text{ y } t=N}{\text{numero de Estados Satisfactorios}(i,N)}$$

### Paso 4

- H- Calcula la Vulnerabilidad(i,t) como la máxima magnitud de la falla(i,t) calculada en el período entre t=0 y t=N para t=N
- I- Calcula la Probabilidad de fallas (frecuencia u ocurrencia de fallo del período N)

$$P(1-Z\%) = \frac{nfallas(i,t)}{N}$$

Finalmente el Bloque 1 multiplica por 100 el valor P(1-Z%) para encontrar el valor de ocurrencia en porcentaje.

- J- Calcula el valor de resiliencia como

$$\text{Resiliencia} = \frac{P(X\%) \cdot P(1-Z\%)}{((P(1-Z\%) \cdot P(X\%)) + (P(Y\%) \cdot (1 - P(1-Z\%))))}$$

Figura 5.9: Algoritmo de cálculo de índices de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad

### k) Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.)

Dado que el proceso de toma de decisiones necesita una medida única de efectividad cuya expresión matemática pueda ser utilizada luego para incluirla como función objetivo en un modelo que optimice (maximice o minimice) el valor de dicha medida de efectividad, se propuso la siguiente ecuación que permite englobar en un único valor (M.E.G.S.) el conjunto de objetivos que el usuario plantea para cada uno de los cinco propósitos del aprovechamiento del agua dentro del sistema. Para evitar el problema de escala de magnitudes entre Índices, éstos fueron escalados de 0 a 1 dividiéndolos por su valor máximo registrado en 3,500 simulaciones realizadas:

Donde:

$$M.E.G.S. = \sum_{i=1}^5 b(i) * \sum_{j=1}^3 \frac{p(i, j) * I(i, j)}{I_{max}(i, j)}$$

i = tipo de propósito del sistema: 1)Riego; 2)Hidroenergía; 3) Control de Crecidas; 4) Control de Anegamiento; 5) Recreación.

j = tipo de Índice de Fallo: 1) Ocurrencia de Fallo; 2) Resiliencia; 3) Vulnerabilidad

b(i)= importancia relativa asignada a cada propósito (i) por el usuario.

p(i,j) = importancia relativa (peso) asignado por el usuario al Índice de Fallo (j) del propósito (i)

I(i,j) = Valor del Índice de Fallo (j) del propósito (i)

I<sub>max</sub>(i,j) = Valor máximo (alcanzado en las 3,500 simulaciones) del Índice de Fallo(j) del propósito (i)

## l) Dibujo de variables

Mediante el bloque **MultiSim plotter** se dibujan las variables más representativas, tanto de entrada como de salida (Figura 4.12). Ello permite verificar el comportamiento de los distintos módulos desarrollados y el funcionamiento del modelo.

Cada módulo en sí representa un subproblema dentro del problema global a resolver y sus salidas son valores de entrada para otros módulos lo que hace que interactúen dinámicamente entre sí. Este esquema modular permite dar mayor complejidad a los módulos que se requiera para lograr representar mejor ciertas partes del sistema.

### 5.5.3 Red Neuronal para el pronóstico de aportaciones mensuales.

Se realizó una aplicación de la metodología descrita en el punto 3.5 para obtener un modelo de predicción de escurrimientos mensuales en la cuenca del río San Juan, usando datos climatológicos de la estación Pachón ubicada a 1200 mts. de altitud. Los escurrimientos fueron medidos en la estación de aforos Km 47.3 la cual controla una cuenca de 20.000 km<sup>2</sup>.

El modelo ANN se diseñó y validó para realizar predicciones en un horizonte desde uno a siete meses, pronóstico que debía realizarse previo a la ocurrencia de las nevadas más importantes (mes de Julio) y bajo condiciones de escasez de información. Se seleccionaron como variables de entrada: la información histórica del indicador del fenómeno ENSO (anomalías de la temperatura superficial del mar en la Zona 3 del Pacífico Ecuatorial, determinada entre los paralelos 5° Norte y 5° Sur y entre los meridianos 90° y 180° Oeste), la temperatura, la precipitación, el equivalente de agua, el viento, la radiación solar, variables controladas en la estación Pachón ubicada a

1200 m.s.n.m. en la alta cuenca del río San Juan para estimar los caudales de deshielo observados en la estación Km 47.3 sobre el río San Juan .

El desarrollo del modelo de pronóstico se encaró desde dos puntos de vista distintos. El primer enfoque consistió en desarrollar siete modelos ANNs dedicados cada uno al pronóstico del volumen de escurrimiento de cada mes de julio a enero, es decir siete modelos con una sola unidad de salida, basados en la estructura de entradas identificada como la más explicativa del deshielo. El segundo enfoque consistió en ajustar una sola red neuronal para la misma estructura de entradas anterior, pero con una capa de salida provista con siete unidades, una para cada mes a pronosticar, con lo cual se pretendió investigar la capacidad de las ANNs para aprender a reconocer varios conceptos simultáneamente (Wins, 1997 ), es decir la capacidad de predecir la onda completa de deshielo en un solo paso de pronóstico.

En particular en situaciones de escasez de información y por consiguiente con un número de duplas de entrenamiento reducido, la estrategia sugerida por Mitchell, (1997) parece ser la más adecuada y se utilizó en este trabajo. Algunos problemas que pueden derivarse de una mala estrategia de entrenamiento son que las redes multicapas del tipo feedforward entrenadas con el algoritmo backpropagation no garantizan la convergencia a un óptimo global. Conforme se modifiquen los pesos, el algoritmo se desliza en un hiperespacio sobre una superficie de error la cual puede presentar mínimos locales en los cuales el algoritmo puede quedar atrapado. Existen distintos procedimientos para escapar de los mínimos locales que tienen que ver con el adecuado uso de los parámetros de aprendizaje, del término de momentum (Figura 5.10).



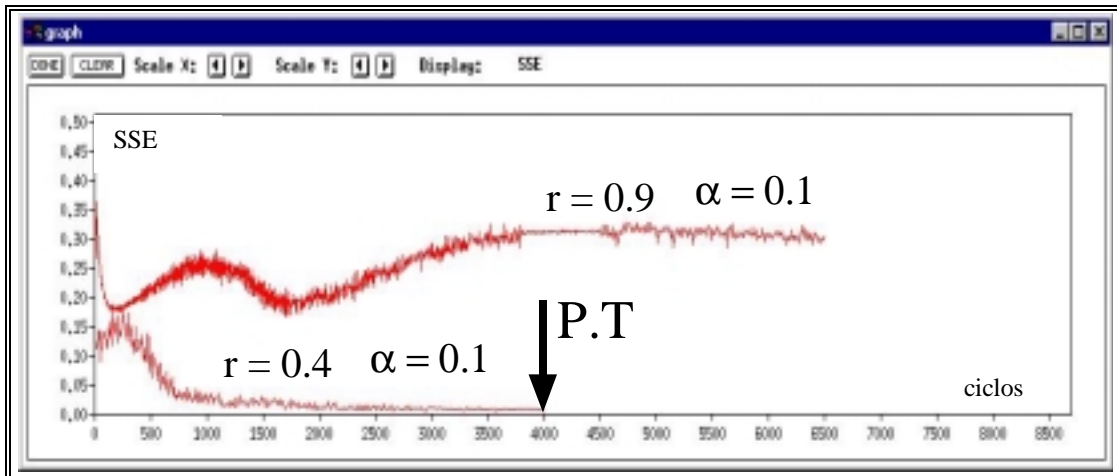


Figura 5.10: Curvas de entrenamiento del set de validación para distintos parámetros de aprendizaje del método backpropagation momentum.

Otro problema que suele presentarse durante el entrenamiento de redes feedforward entrenadas con algoritmos backpropagation error, es una mala selección del punto óptimo de finalización del entrenamiento. Un entrenamiento demasiado largo puede conducir al fenómeno indicado como sobreentrenamiento (overfitting), que puede derivar en una disminución considerable de la capacidad predictiva de la red. (Mitchell, 1997).

El procedimiento de validación de las redes neuronales se basó en un conjunto de análisis sobre los residuos (valores calculados como la diferencia entre los valores de escurrimiento observados y los calculados por la red) generados por cada modelo para los distintos conjuntos (entrenamiento, validación y test). También se usó como indicador de comportamiento el número de ciclos necesario para lograr un entrenamiento que asegure una buena generalización, que depende de la selección del Punto de Término P.T. del entrenamiento (Figura 5.10).

Para comprobar en los modelos el grado de ajuste a los datos de entrenamiento, la capacidad de generalización fuera del conjunto de entrenamiento y

detectar problemas de sobreentrenamiento, se usó el estadístico suma de errores cuadráticos, (SSE) y la función de autocorrelación de los residuos. La detección de coeficientes de autocorrelación de la serie de residuos que superen un determinado nivel de confianza, indica problemas en la identificación de las variables de entrada, o bien una arquitectura defectuosa de la red para capturar toda la información predecible.

La metodología retroalimentativa de elaboración de ANNs utilizada, permitió encontrar un modelo capaz de predecir, con suficiente precisión, los caudales de deshielo de la cuenca del río San Juan. El software y algoritmos de apoyo al diseño y entrenamiento de ANNs orientados a investigación aplicada SNNS, aportó una base de recursos importante en el desarrollo computacional de las herramientas necesarias para llevar a buen término las distintas etapas planteadas en la metodología utilizada.

Se comprobó el buen comportamiento predictivo de un modelo ANNs feedforward de arquitectura 30-20-7 (30 neuronas de entrada, 20 neuronas ocultas y 7 neuronas de salida) entrenado mediante el método de aprendizaje backpropagation momentum y utilizando la estrategia de aprendizaje sugerida por Mitchell (1997) para ejemplos escasos. Se inicializó la red con valores aleatorios entre  $-2$  y  $2$ . Se estudió el proceso de convergencia del método backpropagation y se probaron distintas tasas de aprendizaje y distintos coeficientes de momentum, finalmente se adoptaron los valores  $0,9$  y  $0,7$  respectivamente.

Se prepararon 18 duplas entrada-salida (30-7), esto es cada dupla compuesta por 30 variables de entrada y 7 variables de salida. De ellas 17 fueron usadas para el entrenamiento y la última dupla se utilizó para Test de la red. Las 30 variables de entrada incluidas en el modelo corresponden a los valores observados para los meses de abril, mayo y junio de Número del mes, IOS (Índice de Oscilación del Sur), precipitación mensual, temperatura promedio, humedad relativa promedio, heliofanía efectiva promedio, viento promedio mensual, altura máxima de nieve, días totalmente nublados (datos climáticos de la estación meteorológica Pachón) y el volumen de

escurrimiento (estación de aforo km 47.3) ambas estaciones dependientes del Dpto. Hidráulica de la provincia de San Juan. Las 7 variables de salida corresponden a los valores del volumen escurrido mensual (aforo en Km 47.3) para los meses de julio a enero del próximo año.

Todos los valores incluidos en las duplas fueron escalados de  $-0,7$  a  $0,7$  con el fin de homogeneizar las magnitudes de las distintas variables, utilizar la función Sigmoide como función de activación a la salida de la red y para poder extrapolar valores de salida superiores a los usados en el entrenamiento de la red.

El análisis de los valores de SSE (Suma de errores cuadráticos) obtenidos en la predicción del patrón de Test (julio 1997 a enero 1998) indica que la red entrenada presenta una mejor capacidad de generalización para los 4000 ciclos de entrenamiento.

Se realizó un análisis detallado de la frecuencia con que cada modelo entrenado cometía errores de predicción por bajo determinados umbrales. Esto permitió obtener lo que se denominó **curvas de error** para cada modelo. La introducción de indicadores de las anomalías de temperatura superficial del Pacífico Ecuatorial, como el IOS, fue un elemento explicativo de importancia en la cuenca de estudio. En particular, su inclusión en el modelo mejoró su repuesta en cuanto su capacidad de generalización, lo cual se puede observar utilizando las curvas de error que se presentan en la (Figura 5.11). Las curvas de error de los modelos de ANN entrenados para distintos ciclos de entrenamiento, ilustran la frecuencia con que un cierto umbral de error no es superado por el pronóstico. Este valor de frecuencia corresponde al promedio de los 7 valores de frecuencia correspondientes a los 7 meses pronosticados. Como un ejemplo de interpretación de esta gráfica se puede decir que para la red ANN entrenada con 4000 ciclos y que posee el indicador IOS como variable de entrada, en el 82% de los pronósticos realizados, el valor absoluto del error de predicción promedio de los siete meses no superó el 5%, mientras que en el 95% de los pronósticos realizados el valor absoluto del error de predicción promedio de los siete meses es inferior al 10%.

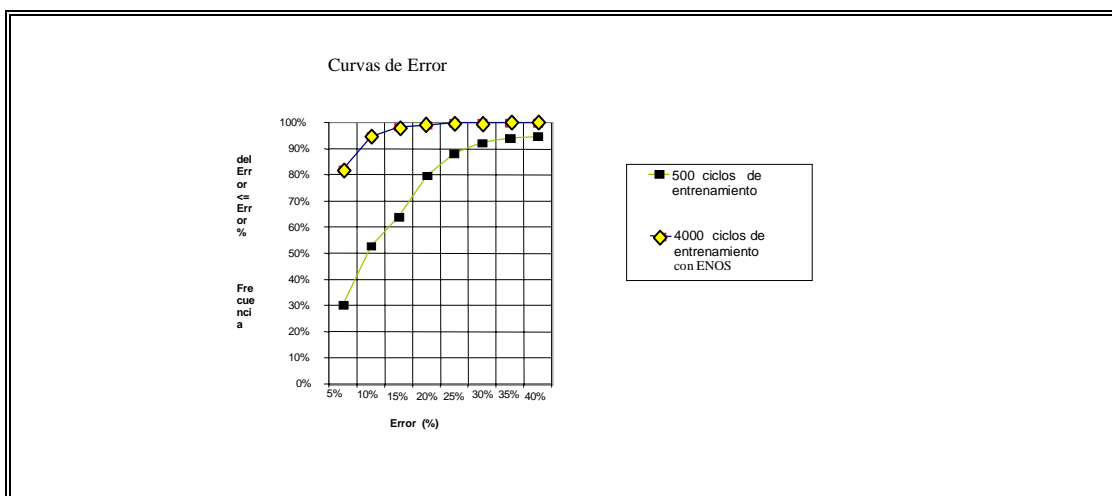


Figura 5.11: Curvas de error para el modelo ANN 27 20-7 (sin ENOS) y ANN 30-20-7 (con ENOS) para distintos ciclos de entrenamiento.

El diagrama de dispersión de valores pronosticados sobre los valores observados permite visualizar el comportamiento del modelo de pronóstico en todo el rango de datos analizado (Figura 5.12) y las tendencias hacia la sobre y la sub estimación de cada modelo.

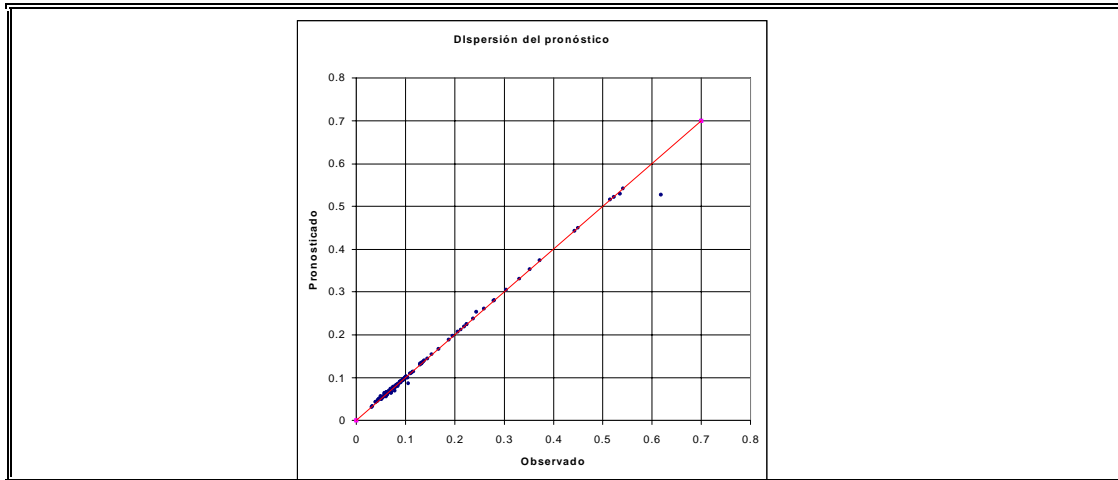


Figura 5.12: Diagrama de dispersión de valores de volúmenes de escurrimiento observados y pronosticados, escalados (0 a 0,7) para la red ANN 30-20-7 (con ENOS) entrenada con 4000 ciclos.

El análisis de autocorrelación de los residuos del modelo permite detectar la existencia de fallas estructurales. En la (Figura 5.13) se muestra la Función de autocorrelación simple FAS y de autocorrelación Parcial FAP de los residuos del modelo para las 18 duplas utilizadas en el entrenamiento y test de la red.

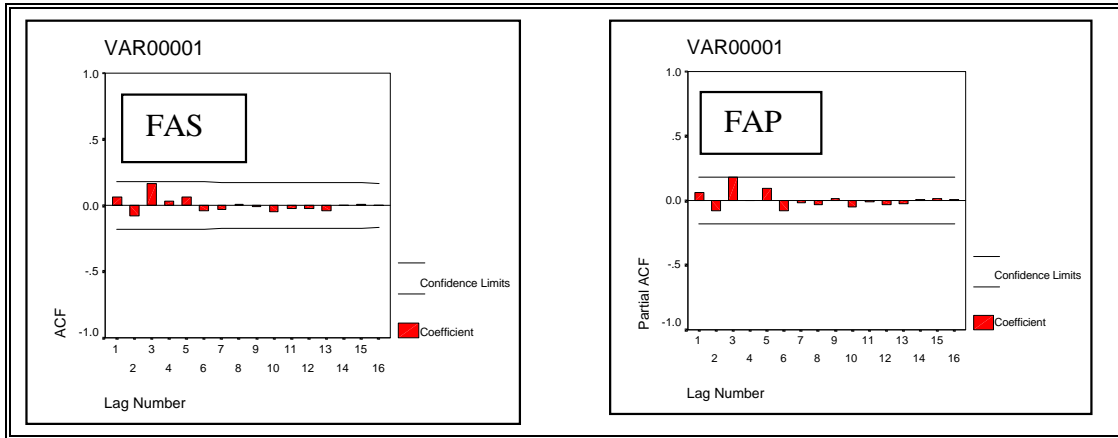


Figura 5.13: Funciones de Autocorrelación Simple (FAS) y de de Autocorrelación parcial (FAP) de la serie de residuos. Calculadas con la aplicación SPSS incluida en el sistema Los límites de confianza indican el 95% de probabilidad de que la serie sea considerada un proceso de ruido blanco.

La metodología retroalimentativa de elaboración de ANNs permitió encontrar un modelo capaz de predecir con aceptable precisión, los caudales de deshielo de la cuenca del río San Juan antes de registrar las nevadas más importantes en la cuenca (Figura 5.14).

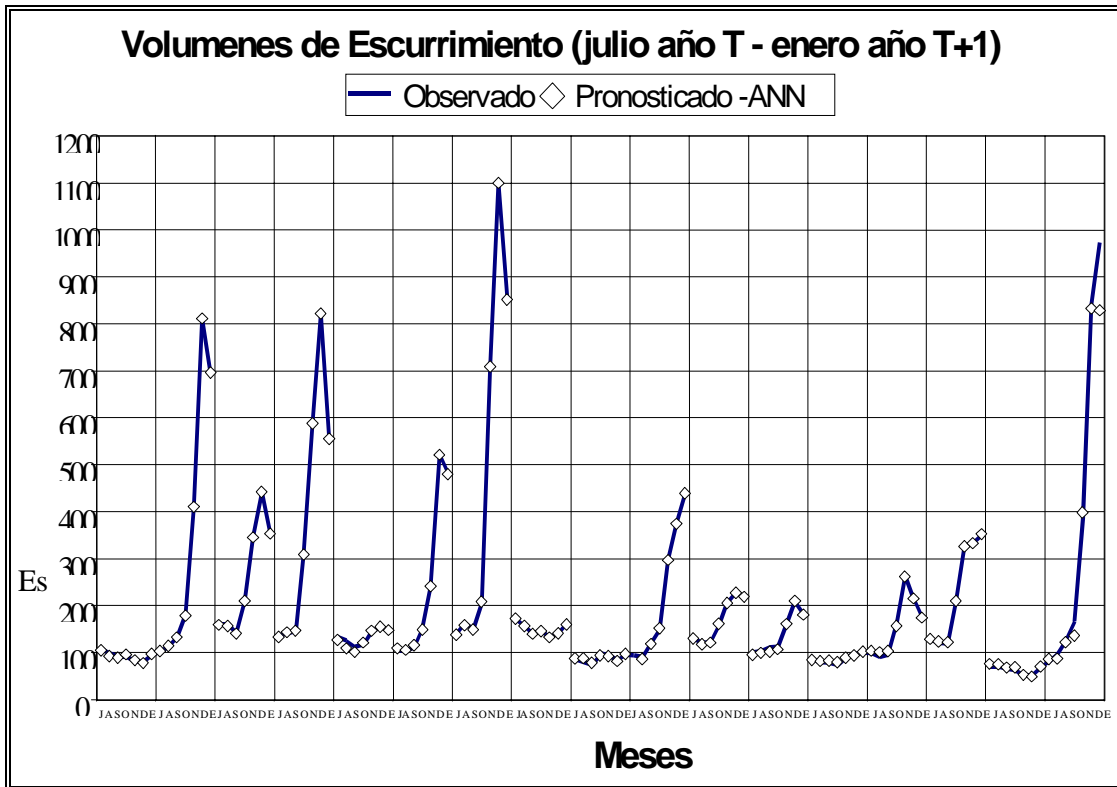


Figura 5.14: Gráfico de 17 patrones (Julio a Enero) de Volúmenes de escurrimiento observados comparados con los mismos valores calculados con la red ANN 30-20-7 (con ENOS) entrenada con 4000 ciclos.

Se estima que la metodología desarrollada, puede generalizarse a cuencas de similares características hidrológicas con buen grado de éxito, fundamentando esta apreciación, en los excelentes resultados obtenidos por el mismo autor en otras aplicaciones destinadas a identificar modelos ANNs capaces de predecir los escurrimientos derivados de fenómenos igualmente complejos como el de lluvia-escorrentía y lluvia-deshielo-escorrentía en cuencas de respuesta notablemente no lineal.

La introducción de indicadores de las anomalías de temperatura superficial del Pacífico Ecuatorial, es un elemento explicativo de importancia cuya inclusión en el

modelo mejoró el comportamiento predictivo de la red ANN ajustada por medio del método de aprendizaje backpropagation momentum y entrenada con la estrategia de aprendizaje sugerida por Mitchell para ejemplos escasos, calibrado para pronosticar los escurrimientos para la cuenca del río San Juan.

Este modelo de red neuronal, permite al usuario del sistema realizar generación de series sintéticas, ajustando distribuciones de probabilidad a las variables de entrada del modelo. Esto amplía las capacidades del sistema de apoyo para realizar estudios de toma de decisión basados en riesgo.

Existe numeroso software y algoritmos de apoyo al diseño y entrenamiento de ANNs elaborados en distintos lenguajes de computación y paquetes de software orientados a investigación aplicada como el SNNS que aportan una base de recursos muy importante en el desarrollo computacional de las herramientas necesarias para llevar a buen término las distintas etapas planteadas en la metodología de identificación y validación de modelos desarrollada.

#### **5.5.4 Modelo de red neuronal para la estimación de índices de Fallo del sistema**

El modelo de simulación continua descrito en 5.5.1., se utilizó para encontrar los índices de evaluación de fallo correspondientes a cinco propósitos del sistema (riego, hidroenergía, control de crecidas, control de anegamiento y recreación) para 3,500 escenarios de gestión distintos, generados aleatoriamente dentro de un rango de variación (ventana de búsqueda) seleccionado para cada uno de los parámetros de las reglas de operación de los cinco elementos de control elegidos dentro del sistema, que son: el embalse Caracoles, el embalse Punta Negra, el embalse Ullum, el partidador San Emiliano y la batería de pozos oficiales en el valle de Tulúm. Los resultados de dichas



corridas se grabaron en un archivo de texto y fueron utilizados para entrenar y validar un modelo de red neuronal que fuera capaz de encapsular el comportamiento del sistema enfrentado a las distintas situaciones contempladas en la etapa de simulación, es decir que el modelo de red neuronal fuera capaz de entregar las mismas medidas de efectividad (ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad) para cada propósito que el modelo de simulación para los mismos escenarios de gestión.

La metodología retroalimentativa de elaboración de ANNs (punto 3.5), permitió encontrar un modelo capaz de predecir, con suficiente precisión, los 15 índices de evaluación de fallo, esto es el índice de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para cada uno de los cinco propósitos del sistema. En este caso se utilizó también el software SNNS.

Se comprobó el buen comportamiento predictivo de un modelo ANNs feedforward de arquitectura 5-10-10-15 (5 neuronas de entrada, 20 neuronas ocultas y 15 neuronas de salida) entrenado mediante el método de aprendizaje backpropagation momentum. Se inicializó la red con valores aleatorios entre  $-1$  y  $1$ . Se estudió el proceso de convergencia del método backpropagation y se probaron distintas tasas de aprendizaje y distintos coeficientes de momentum, finalmente se adoptaron los valores 0,5 y 0,2 respectivamente.

Pudieron elaborarse 3500 duplas entrada-salida (5-15), esto es cada dupla compuesta por 5 variables de entrada y 15 variables de salida. De ellas 2000 fueron usadas para el entrenamiento, 1000 para validación y 500 para Test de la red. Las 5 variables de entrada incluidas en el modelo corresponden a los valores asignados aleatoriamente a los parámetros de las reglas de operación parametrizadas de los 5 elementos de control del sistema.

Los parámetros de los embalses Caracoles, Punta Negra y Ullúm tienen un rango  $[-0.3$  a  $0.3]$  donde un valor (0) del parámetro indica que el embalse cumple

exactamente con el volumen de agua demandado por el sistema. Los valores positivos (+) del parámetro representan la proporción de agua disponible que se entrega al sistema por sobre la demanda total que el sistema requiere del embalse. Los valores (-) del parámetro corresponden a situaciones en que el embalse se opera de manera de entregar un volumen menor que el agua demandada por el sistema al embalse en una cantidad igual al producto del parámetro por el volumen de agua disponible por sobre la demanda.

El agua descargada por el Dique de Ullúm llega al Dique Ignacio de la Roza, el cual puede derivar agua al canal matriz de riego o descargarla al río por medio de un sistema de compuertas. El agua derivada al canal matriz lleva al Partidor San Emiliano que tiene por misión distribuir el agua entre los tres canales principales de la red de riego y también puede descargar al río si es necesario.

Para estudiar la operación de estos elementos de distribución de agua, se parametrizan las reglas de operación del conjunto Dique Ignacio de la Roza - Partidor San Emiliano para situaciones en que el agua descargada por el Dique de Ullum exceda el volumen de agua requerido para riego. En los casos en que el volumen de agua descargado por Ullum sea igual o menor al volumen requerido por el sector de riego, el conjunto D.I.de la Roza- P. San Emiliano deriva todo el volumen de agua que recibe a riego.

El parámetro del conjunto D.I.de la Roza- P. San Emiliano tiene un rango de [-0.5 a 0.5]. El valor del parámetro corresponde al volumen de agua que se desea derivar al río en el tramo 2. Un valor (0) implica que se deriva al río todo el volumen de agua que excede el requerimiento de riego. Los valores (+) representan situaciones en las cuales se deriva un porcentaje mayor de agua al río provocando déficits en la entrega de agua de riego. Los valores (-) representan situaciones en las que se deriva al río un porcentaje menor de agua provocando se derive a riego más agua que la demandada por el sector.

El parámetro del Sistema de bombeo varía entre 0 y 100. Un valor de (0) indica que no se realiza ningún control de anegamiento en el valle, es decir el sistema de bombeo está inactivo. Un valor (100) implica que se requiere un control de anegamiento en el valle con garantía del 100%, la cual está definida por la situación en que la superficie anegada en la zona entre 0 y 1 m. de profundidad no debe superar las 1000 has.

Las 15 variables de salida corresponden a los valores que adoptan los 3 índices de evaluación de fallo para cada uno de los 5 propósitos del aprovechamiento de aguas.

Todos los valores incluidos en las duplas fueron escalados de  $-0,7$  a  $0,7$  con el fin de homogeneizar las magnitudes de las distintas variables, utilizar la función Sigmoide como función de activación a la salida de la red y para poder extrapolar valores de salida superiores a los usados en el entrenamiento de la red.

El análisis de los valores de SSE (Suma de errores cuadráticos) obtenidos en la predicción del patrón de Test indica que la red entrenada presenta una buena capacidad de generalización para los 50000 ciclos de entrenamiento.

Se analizaron los diagramas de dispersión de los índices de evaluación de fallo entregados por el modelo de simulación contra los mismos índices entregados por el modelo de red neuronal (Figura 5.16). En la figura se representan en absisas los valores escalados entre 0 y 0.7 de los índices obtenidos por la red ANN 5-10-10-15 y en ordenadas los mismos índices obtenidos por el modelo de simulación implementado en Extend. Los títulos asignados a cada gráfico corresponde a la nomenclatura que se presenta en la Figura (5.15):

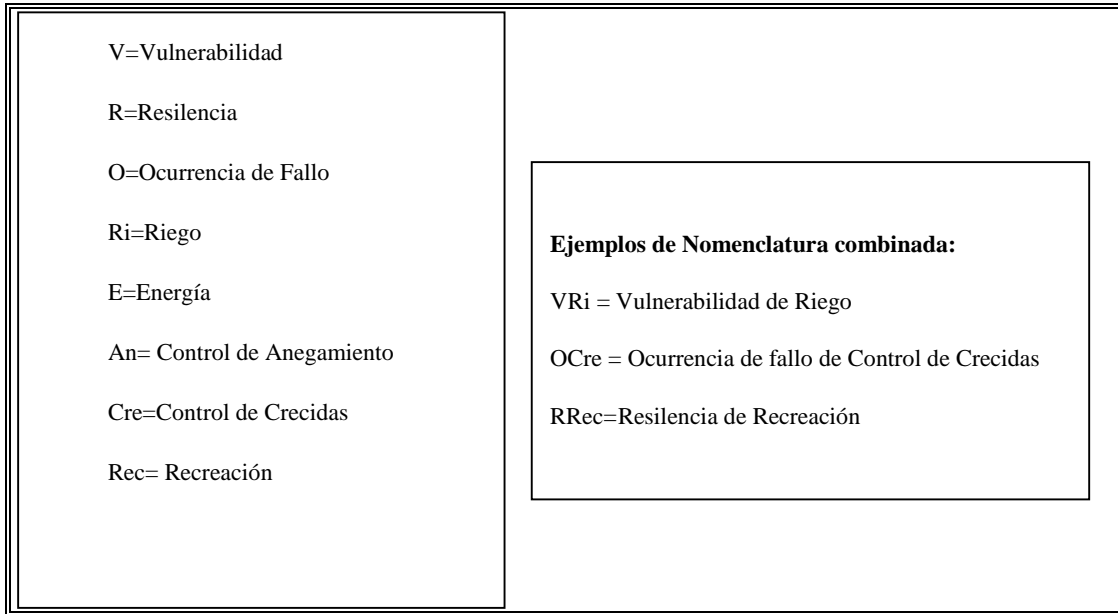


Figura 5.15: Nomenclatura de los diagramas de dispersión de la Figura 5.16

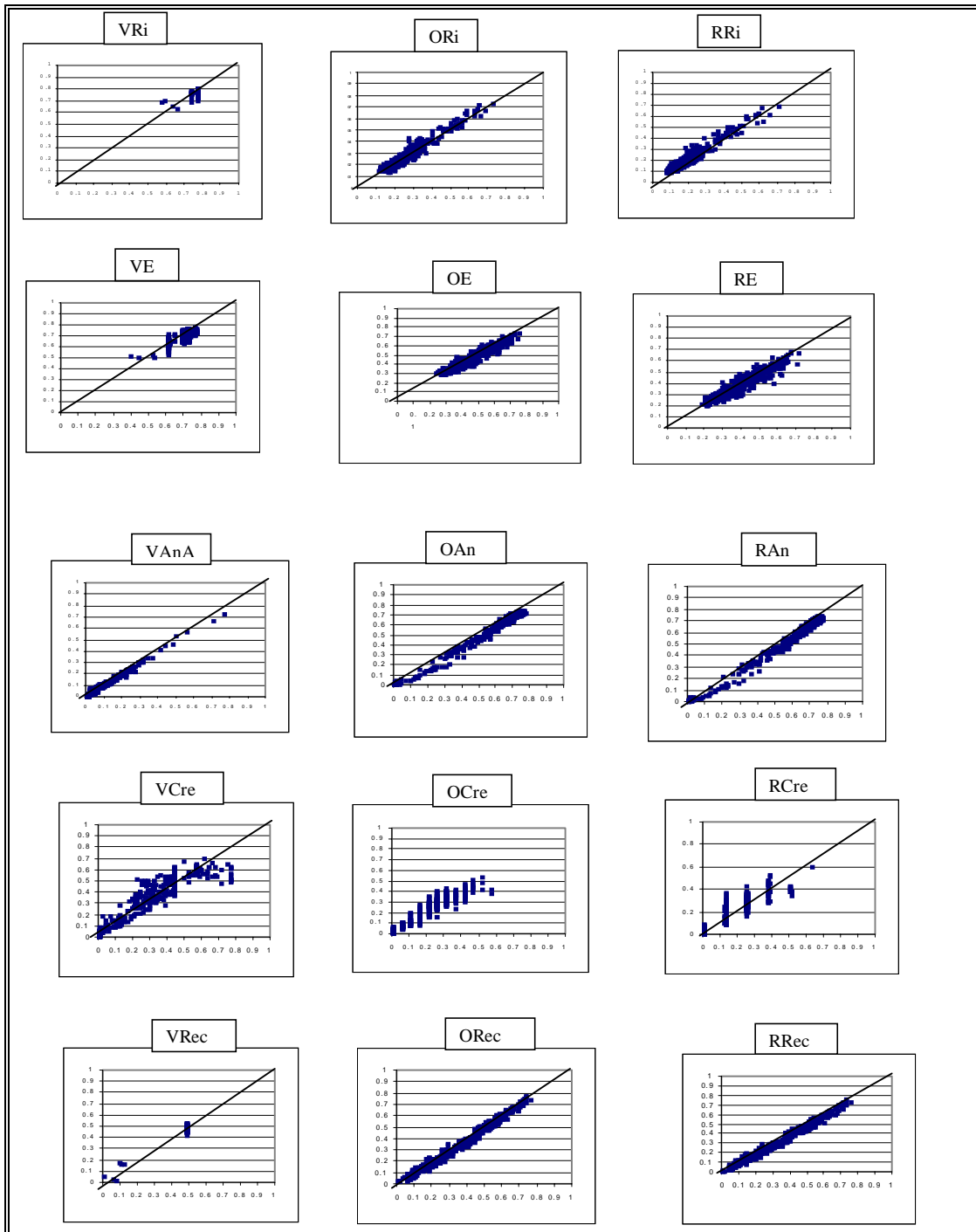


Figura 5.16: Diagramas de Dispersión de Índices de Fallo entre modelo ANN y Extend

Se puede observar que en general el modelo de red neuronal entrega valores de índices muy similares a los obtenidos con el modelo de simulación Extend. El análisis de los resultados entregados por el modelo ANN para los 500 ejemplos de Test entregó valores promedios del error absoluto referido al valor de escalamiento máximo 0.7 aceptables. El máximo valor de este error absoluto promedio es del 6.11% con una desviación típica del error de 8.11 (Figura 5.17) que corresponde al cálculo de la vulnerabilidad del sistema a situaciones de crecidas máximas. Los errores relativos fueron calculados según la expresión:

$$\text{Error(\%)} = [\text{valor absoluto} ( (\text{Indice Fallo Extend} - \text{Indice Fallo ANN}) / 0.7 )] * 100$$

Análisis de errores absolutos referidos a (0.7) del modelo ANN 5-10-10-15 para 500 ejemplos de Test									
Maximo	15.170129	19.972727	18.159740	15.085714	16.167532	22.764935	6.4259740	16.66103	19.323376
Minimo	-0.001298	0.0142857	-0.003896	-0.002597	0.0740259	0.0064935	0	0	0
Promedio	1.3630065	3.3388829	3.3786039	3.6130963	3.5648023	3.7205710	1.322455	3.0757671	4.374546
Des.	1.5237143	2.8516162	2.6753752	2.5413415	2.8035003	3.3040106	1.2947928	2.6496254	3.1306470
	VR	OR	RR	VE	OE	RE	Van	Oan	Ran
Maximo	38.879220	24.729870	31.209090	10.253246	10.050649	10.727272			
Minimo	0	0	0	0	0	0			
Promedio	6.176644	3.2318429	4.4955807	1.4934544	2.7590453	2.9797256			
Des.	8.1168567	4.1551499	6.2647957	1.317487	2.0244706	2.3697785			
	VCr	Ocr	RCr	Vrec	Orec	Rrec			

Figura 5.17: Análisis cuantitativo de los diagramas de dispersión de los indicadores de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad para los distintos usos del agua. (los nombres de las columnas siguen la nomenclatura de la Figura 5.15)

### 5.5.5 Optimización de la gestión

El concepto de Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.), explicado en el punto 5.5.1, se interpretó como una medida del comportamiento integral de todos los propósitos del sistema tenidos en cuenta en el modelo. Su cálculo es indispensable para implementar un modelo de optimización que entregue al gestor, información sobre cuál escenario de gestión puede obtener el menor valor de M.E.G.S. entre todos los escenarios factibles. La combinación de todos los índices de fallo de los distintos propósitos se logró escalando entre 0 y 1 a los índices de fallo.

Obtener el mínimo valor de M.E.G.S. del sistema significa tener la posibilidad de navegar (buscar) en un hiperespacio de 5 dimensiones, cada una asignada a uno de los parámetros de operación que definen los escenarios de gestión del sistema. Para que en el modelo de optimización, el algoritmo de búsqueda pueda navegar en este hiperespacio que representa la respuesta del sistema completo, el mismo debe estar representado matemáticamente por ecuaciones incluidas dentro de la función objetivo planteada en el problema de optimización del M.E.G.S. La inclusión del complejo modelo de simulación desarrollado en Extend dentro de la función objetivo, es una tarea compleja y de resultados sumamente ineficientes en cuanto a tiempos de computación, debido a la gran cantidad de cálculos incluidos en el modelo. Sin embargo tal representación matemática se puede lograr, utilizando un modelo matemático mucho más sencillo, tal como el del modelo de red neuronal artificial ajustado y validado presentado en el punto 5.5.3.

La (Figura 5.18) muestra un diagrama de dispersión donde se han colocado los valores de M.E.G.S. calculados con los Indices de Fallo entregados por el modelo ANNs 5-10-10-15 en ordenadas y los valores de M.E.G.S. calculados con los Indices de Fallo entregados por el modelo de simulación Extend, ambos para los 3,500 ejemplos de

gestión analizados y para la configuración de pesos relativos de propósitos y medidas de efectividad que se muestra en la Tabla V.2.

**Tabla V.2: Pesos relativos asignados a cada propósito dentro del sistema de aprovechamiento de agua (columna 2) y pesos relativos de las medidas de efectividad usadas para evaluar la probabilidad, magnitud y capacidad de recuperación de fallo (columna 4) para los cinco propósitos evaluados en el Sistema del Río San Juan en el ejemplo 1.**

<b>Propósito</b>	<b>peso</b>	<b>Medida de Efectividad</b>	<b>peso</b>
Riego	0.5	Vulnerabilidad	1
		Ocurrencia de fallo	0.5
		Resilencia	0.5
Energía	0.3	Vulnerabilidad	0.1
		Ocurrencia de fallo	0.4
		Resilencia	0.5
Anegamiento	0.1	Vulnerabilidad	0
		Ocurrencia de fallo	0
		Resilencia	0
Crecida	0.05	Vulnerabilidad	0.9
		Ocurrencia de fallo	0
		Resilencia	0
Recreación	0.05	Vulnerabilidad	0
		Ocurrencia de fallo	0.5
		Resilencia	0.5



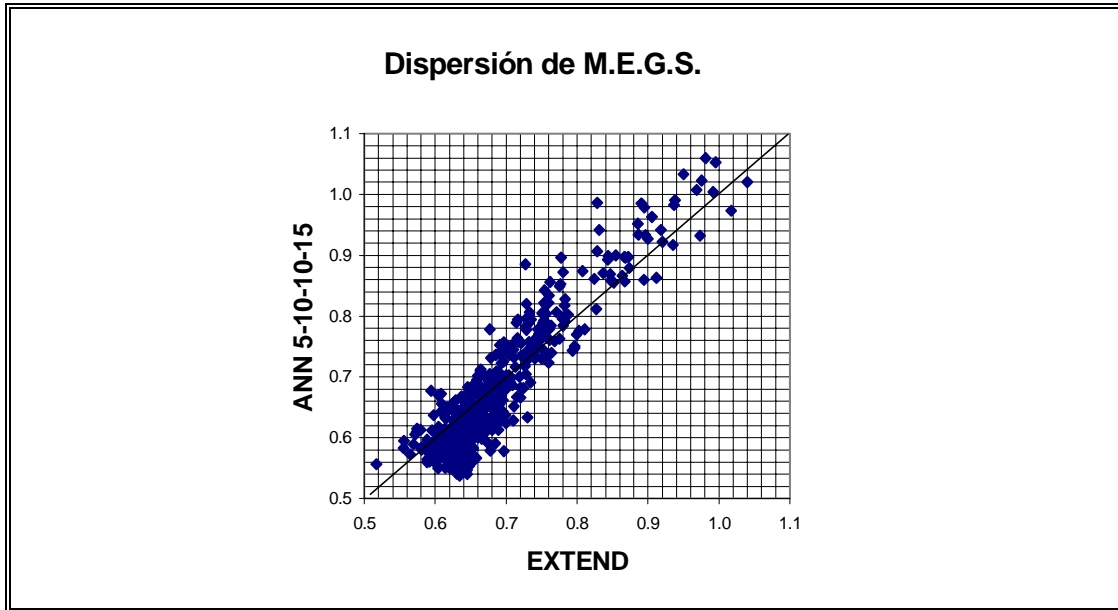


Figura 5.18: Diagrama de dispersión que compara la Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.) calculada por la red neuronal ANN 5-10-10-15 (ordenadas) y el modelo de simulación del Sistema Hídrico del Río San Juan desarrollado en Extend (abcisas).

Como se puede ver en el diagrama, el modelo ANN ha capturado aceptablemente el comportamiento global del sistema, evaluado a través de este Índice global M.E.G.S. Existe una clara tendencia del modelo ANN a la sub - estimación del parámetro M.E.G.S. para valores bajos de este y una sobre valoración del parámetro M.E.G.S. para valores altos del mismo para esta configuración de prioridades.

La Tabla V.3 muestra tales desviaciones, se entiende que las mismas no son de una magnitud significativa a los efectos de utilizar al modelo ANN para orientar al gestor en la búsqueda de valores bajos de M.E.G.S. utilizando optimización no lineal. Esta Tabla presenta la dispersión de los errores de estimación del modelo de red neuronal, encontrando aceptable su comportamiento para los propósitos de su utilización enunciados anteriormente.

**Tabla V.3: Cuantificación de errores y medidas de dispersión para el ejemplo 1**

	M.E.G.S.	Error(%)	Diferencia	errores relativos al máximo
<b>Máximo</b>	1.06	16.96	0.12	11.15
<b>Mínimo</b>	0.52	-21.76	-0.16	-14.93
Promedio		1.64	0.01	
Dispersión		6.42		

Donde los errores de estimación de la red neuronal han sido calculados como:

$$error\% = \frac{M.E.G.S.(Extend) - M.E.G.S.(ANN)}{M.E.G.S.(Extend)}$$

$$error.relativo.al.máximo\% = \frac{M.E.G.S.(Extend) - M.E.G.S.(ANN)}{\max(M.E.G.S.(Extend))}$$

Si se cambia la configuración de pesos relativos asignados a las medidas de efectividad, según la Tabla V.4, se puede analizar con el diagrama de dispersión la capacidad de la red neuronal para emular los resultados del modelo de simulación en este segundo ejemplo. En la Figura 5.19 vemos que el comportamiento resultante de la red neuronal es diferente al observado en la Figura 5.18, esto se debe a que el diagrama de dispersión de la Figura 5.19 representa el caso en que se incluye el propósito de control de anegamiento y se varía la representatividad del control de crecidas y la

recreación, variando los pesos de las medidas de efectividad, según la Tabla V.4 siguiente.

**Tabla V.4: Pesos relativos asignados a cada propósito dentro del sistema de aprovechamiento de agua (columna 2) y pesos relativos de las medidas de efectividad usadas para evaluar la probabilidad, magnitud y capacidad de recuperación de fallo (columna 4) para los cinco propósitos evaluados en el Sistema del Río San Juan en el ejemplo 2.**

<b>Propósito</b>	<b>Peso</b>	<b>Medida de Efectividad</b>	<b>Peso</b>
Riego	0.5	Vulnerabilidad	1
		Ocurrencia de fallo	0.5
		Resilencia	0.5
Energía	0.3	Vulnerabilidad	0.1
		Ocurrencia de fallo	0.4
		Resilencia	0.5
Anegamiento	0.1	Vulnerabilidad	1
		Ocurrencia de fallo	1
		Resilencia	1
Crecida	0.05	Vulnerabilidad	1
		Ocurrencia de fallo	1
		Resilencia	1
Recreación	0.05	Vulnerabilidad	1
		Ocurrencia de fallo	0.5
		Resilencia	0.5

El diagrama de dispersión (Figura 5.19) y la Tabla V.5 muestran un buen comportamiento del modelo ANN para esta configuración de pesos de prioridades y de medidas de efectividad, con una menor dispersión en el cálculo de M.E.G.S.

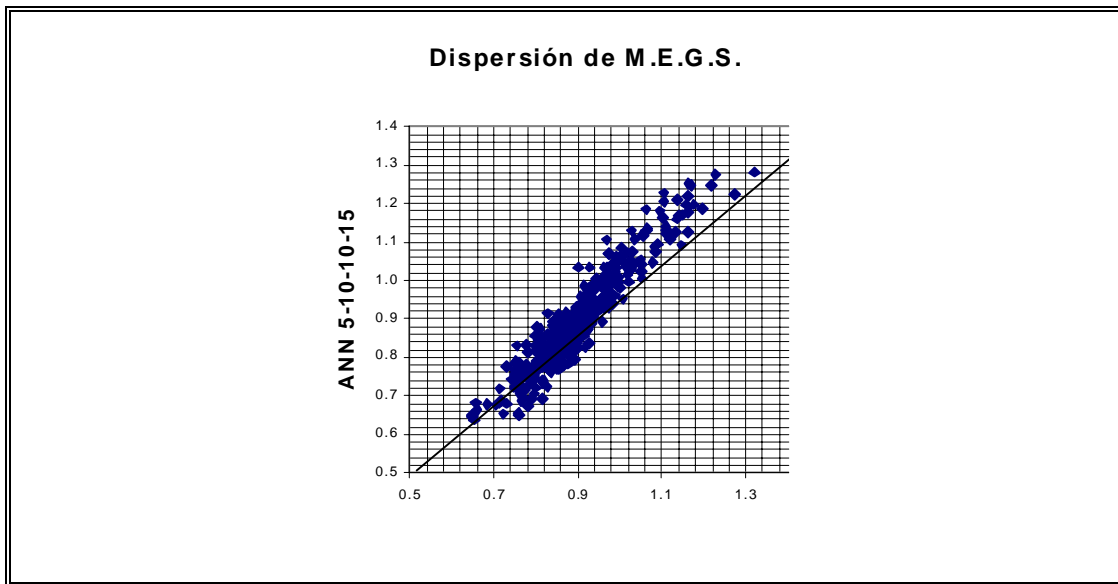


Figura 5.19: Diagrama de dispersión que compara la Medida de Efectividad Global del Sistema (M.E.G.S.) calculada por la red neuronal ANN 5-10-10-15 (ordenadas) y el modelo de simulación del Sistema Hídrico del Río San Juan desarrollado en Extend (abscisas), para el ejemplo 2.

**Tabla V.5: Cuantificación de errores y medidas de dispersión para el ejemplo 2**

	M.E.G.S:	error(%)	Diferencia	Errores relativos al máximo
<b>Máximo</b>	1.32	14.90	0.12	9.19
<b>Mínimo</b>	0.64	-14.76	-0.14	-10.35
Promedio		0.99	0.01	
Dispersión		4.55		

Se probaron distintas configuraciones de pesos relativos de usos y medidas de efectividad, sin embargo ninguna de ellas entregó valores de error y dispersión significativamente diferentes a los dos ejemplos presentados.

## 5.6 Síntesis del Sistema

### 5.6.1. Utilización de la interfaz usuario como herramienta de diseño y aprendizaje.

El modelo de simulación elaborado y la información entregada por el mismo, permite investigar el impacto que tiene sobre el sistema de recursos de agua el cambio de valor de ciertos parámetros de mucha importancia tales como las eficiencias de riego, las pérdidas por infiltración en los distintos tramos del río, las pérdidas totales de conducción en los canales de la red de riego, la capacidad de conducción de los

canales, la capacidad de extracción de agua de los sistemas de bombeo, así como también analizar los beneficios de la introducción de nuevos elementos tales como embalses en cadena, centrales hidroeléctricas o diversas obras hidráulicas destinadas al control y distribución de las aguas y analizar sus parámetros de diseño.

Otros estudios que pueden proyectarse a partir de la simulación de este modelo, corresponde al análisis de la repercusión en el largo plazo de la aplicación de *políticas de gestión de las obras existentes*. Como política de gestión se entiende, al conjunto de reglas y restricciones de operación que tienen como objetivo la satisfacción de las demandas.

El modelo permite al encargado de la gestión del sistema, el análisis del impacto de las distintas políticas adoptadas a través de la utilización de parámetros de insatisfacción de las demandas evaluados por medio de valores de **falla** tales como la insatisfacción de demanda de usuario de agua de riego y la insatisfacción de demanda de usuario de agua para hidroenergía, o la insatisfacción de ciertas condiciones necesarias para asegurar el control de crecidas o anegamientos.

Cabe destacar además que este tipo de modelos integrales de sistemas hídricos permiten presentar a la persona o ente encargado del manejo del sistema un panorama global de comportamiento de los distintos componentes que le permitan realizar el diseño de obras hidráulicas nuevas o la adecuación de las existentes a fin de lograr los objetivos de manejo integral perseguido con tales obras.

El análisis del comportamiento de los distintos componentes del sistema permite, como ejemplo, aportar información relevante en el diseño de sistemas de bombeo para prevenir anegamiento de las zonas bajo riego, en el diseño de la capacidad de embalses en cadena destinados a mejorar la regulación del río y permitir satisfacer la demanda bajando los costos de bombeo, entre otros.

La facilidad de presentación de resultados es una de las ventajas que ofrece el ambiente de simulación EXTEND. La capacidad de salidas gráficas de EXTEND permite al usuario obtener información relevante tal como un diagrama de fallas para cada sector de clientes de agua. La (Figura 5.20) muestra un diagrama que indica la magnitud y ubicación de fallas en el tiempo, lo cual junto a reportes convenientemente personalizados permite al operador del sistema hídrico evaluar rápidamente el impacto de la alternativa de operación simulada y decidir sobre las ventajas y desventajas de su aplicación.

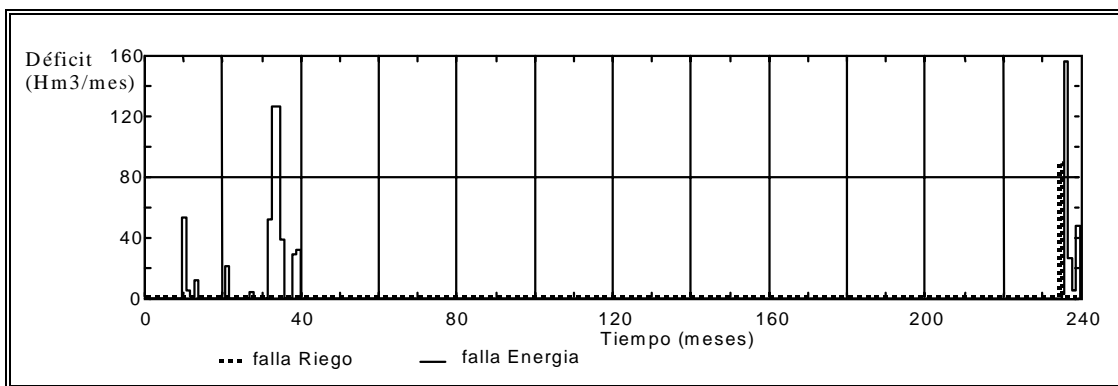


Figura 5.20: Diagrama de Fallas en el suministro de agua

Extend permite también visualizar mientras se está corriendo una simulación variables de interés tal como se observa en la Figura 5.21, que muestra la variación en el tiempo de la cota del embalse expresada en metros sobre el nivel del mar.

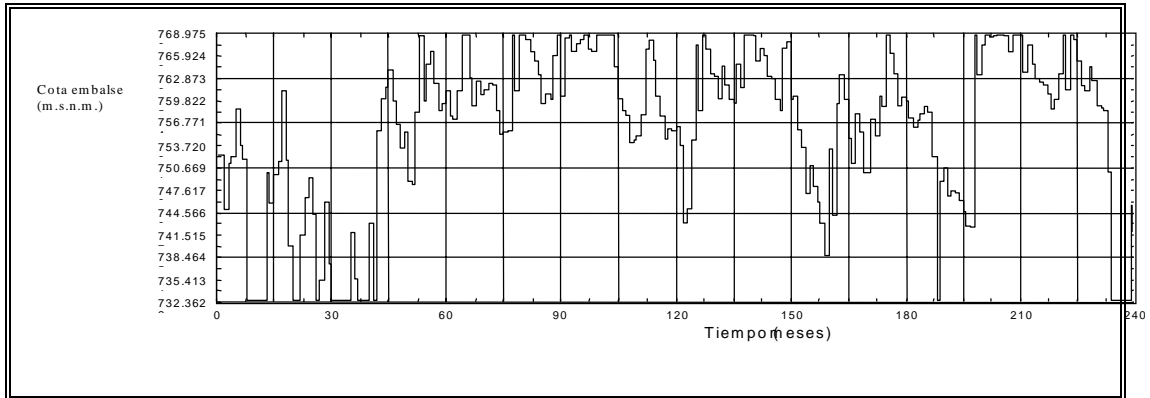


Figura 5.21: Estado de la cota del embalse Quebrada de Ullum en función del tiempo

La Figura 5.22 muestra un diagrama temporal del estado del volumen almacenado en el acuífero que permite visualizar la evolución del acuífero sometido a recargas en distintas zonas del valle y al régimen de extracción que debe tener el sistema de bombeo para mantener un nivel freático determinado. En este gráfico se observa, para la alternativa de operación simulada, que el acuífero inicialmente tiene un nivel freático bajo y que éste se recupera en poco tiempo gracias a las recargas que recibe. Sin embargo luego de unos meses se observa que comienza a perder agua debido a la escasez de recursos superficiales, lo cual obliga a la extracción del agua subterránea. Posteriormente al comenzar un período de riqueza hídrica, el acuífero no solo se recupera sino que es necesario la acción del sistema de bombeo para mantener el nivel freático a la cota máxima permitida.



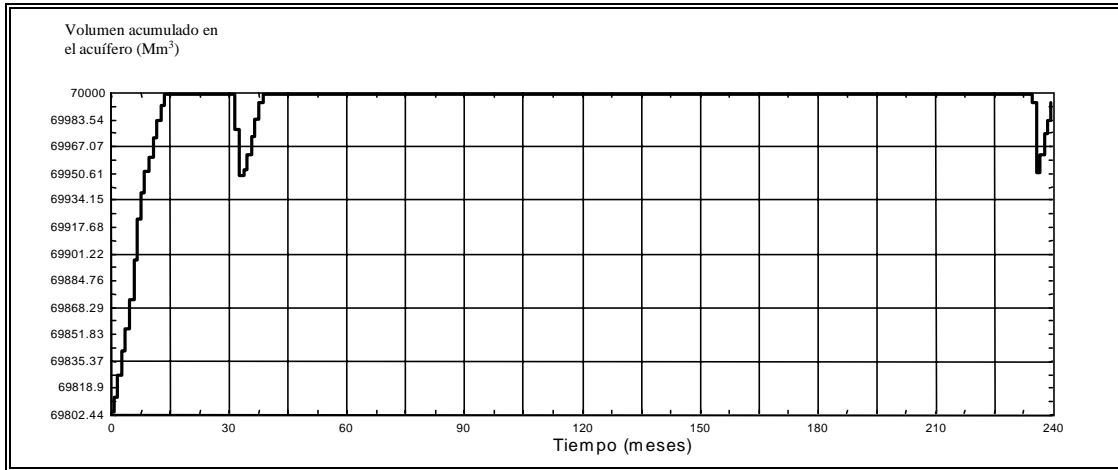


Figura 5.22: Estado del volumen acumulado en el acuífero en función del tiempo

La Figura 5.23 muestra (línea continua) los valores de volúmenes extraídos por medio del sistema de bombeo para evitar problemas de anegamiento en el valle y muestra el bombeo adicional (línea de trazos) que se efectuó para suplir déficit de riego superficial en la época de sequía mencionada.

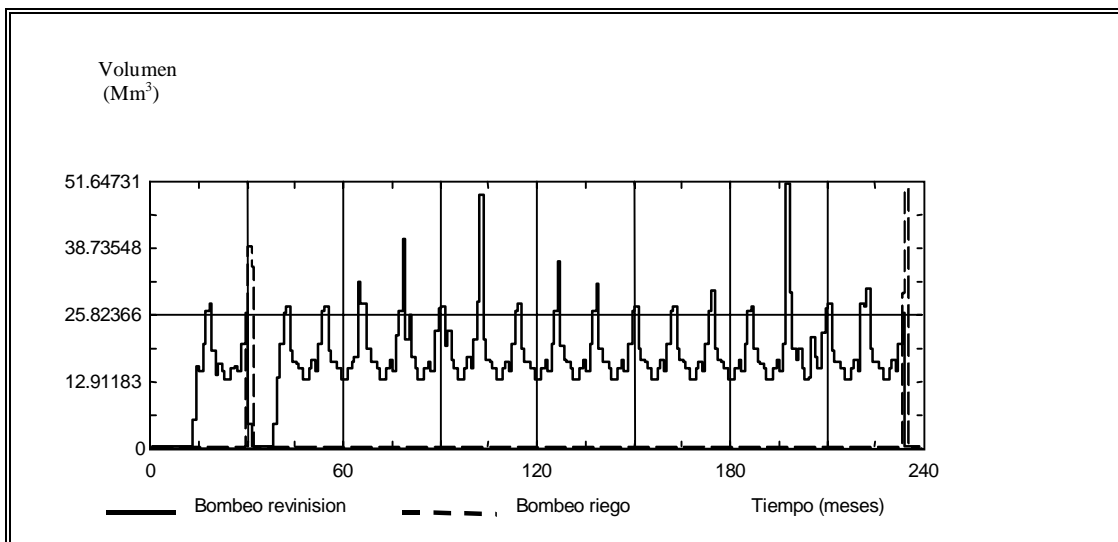


Figura 5.23: Volúmenes extraídos del acuífero en función del tiempo

Se pueden visualizar en un mismo gráfico hasta cuatro curvas distintas permitiendo comparar el comportamiento de distintas variables. La Figura 5.24 muestra una comparación entre el volumen de agua demandada para energía hidroeléctrica (línea de puntos) y el volumen efectivamente derivado a la central hidroeléctrica (línea continua).

Se hace notar que la caída de la curva continua coincide con situaciones de falla energética y que estas circunstancias se deben a las sequías simuladas. También en el gráfico se observa el cumplimiento de las reglas operativas impuestas al modelo, en este caso se interpreta que el modelo permite derivar a la central hidroeléctrica un volumen mayor a la demanda hidroenergética (siempre menor que 315 Mm<sup>3</sup> en el caso de Ullum) en aquellos meses en que el agua disponible lo permite y no se produce con ello un exceso de recarga hacia el acuífero.

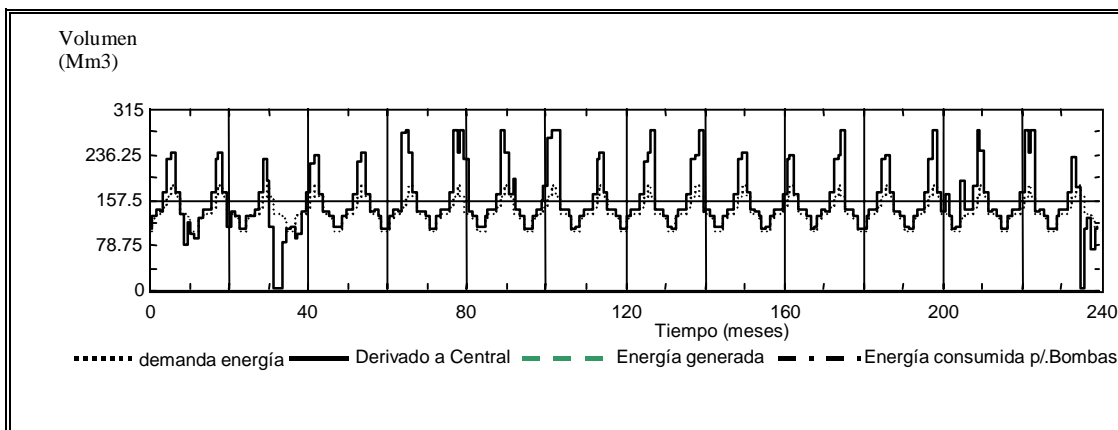


Figura 5.24: Volumen entregado al sector energético en función del tiempo

La Figura 5.25 muestra los valores de volúmenes que han sido embalsados en Caracoles (línea continua), los volúmenes almacenados en Punta Negra (línea de trazos) y los volúmenes embalsados en Ullum (línea punteada) para una simulación

realizada con valores de escurrimiento iguales a los observados entre Julio de 1969 y Diciembre de 1996.

Se observa el proceso de llenado para este escenario hidrológico de los embalses Caracoles y Punta Negra habiendo considerado como condición inicial que el embalse de Ullum estaba lleno el primer mes de simulación.

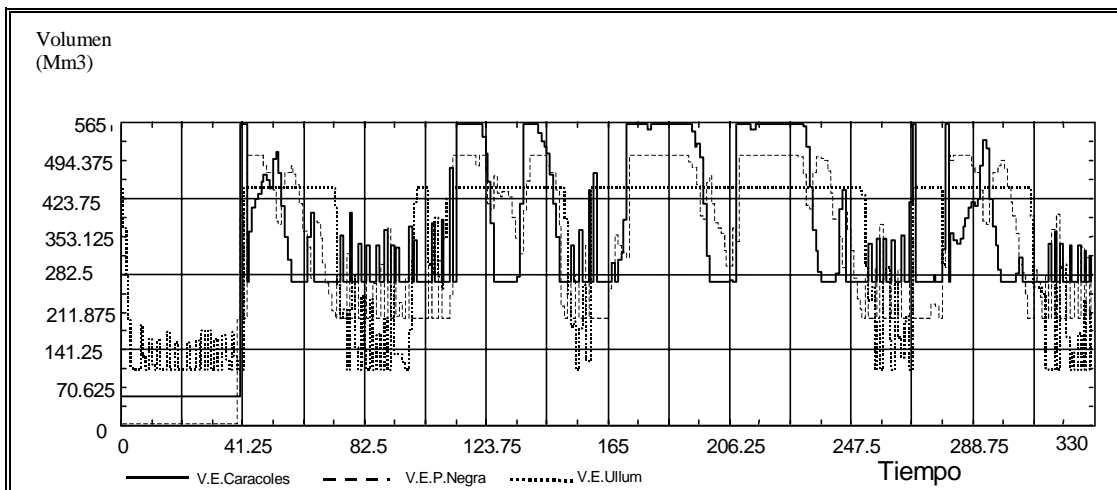


Figura 5.25: Volúmenes almacenados en los embalses Caracoles, Punta Negra y Ullum durante 330 meses de simulación.

### 5.6.2 Utilización de la interfaz usuario como herramienta de evaluación y análisis de alternativas de gestión.

El modelo de simulación también permite realizar un estudio comparativo de alternativas de gestión. Una vez definidas las medidas de efectividad del sistema, se puede sintetizar la respuesta por medio del cálculo de medidas de efectividad, tal como los índices de evaluación de fallo del sistema (ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad) para cada uno de los propósitos involucrados en el problema de gestión

planteado. Estos índices permiten medir la garantía de las políticas de operación a largo plazo durante la etapa de planificación del sistema y el riesgo en la etapa de explotación.

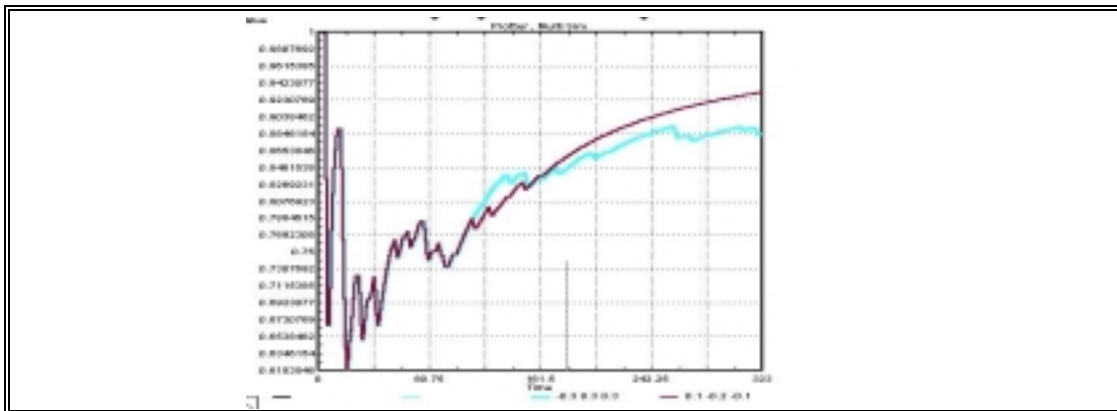


Figura 5.26: Evolución temporal del valor de resiliencia del sector riego para 2 reglas de descarga distintas de los embalses en serie Caracoles-Punta Negra-Ullum.

En la Figura 5.26 se puede observar un gráfico de la evolución temporal del índice de Resiliencia del sistema para el sector Riego, para un horizonte de explotación de 323 meses y para distintas alternativas de operación de los embalses en serie, obtenidas por parametrización de las reglas de descarga de cada embalse, según se detalla en el punto 5.5.1.

Una vez que el gestor ha definido los valores objetivo de los índices de garantía mencionados, es necesario que cuente con herramientas adecuadas para guiarlo en la búsqueda de aquel conjunto de reglas de operación más adecuado para el horizonte de explotación que se está analizando, los caminos para realizar tal búsqueda no son únicos. Una metodología de búsqueda de tales parámetros podría analizar individualmente el comportamiento de los índices de fallo de cada propósito para poder

sacar conclusiones. Un segundo método sería mezclar todos los propósitos e índices en un solo índice como el M.E.G.S. y optimizar su valor de acuerdo a ciertas restricciones. A continuación se da un ejemplo para ambos métodos planteados.

El *Primer Método de síntesis* es una metodología descriptiva cuyos pasos son:

- 1- Fijar aquellas consignas operativas que se mantendrán inalterables durante la simulación, por ser objetivos o restricciones rígidas del sistema. Este conjunto de reglas impone al sistema una franja de operación satisfactoria, reduciendo el espacio de búsqueda a un subespacio de reglas parametrizadas.
- 2- Parametrizar un subconjunto de reglas de operación de los elementos de control de agua en el sistema que permita conocer el comportamiento del sistema a la variabilidad de la oferta y las demandas de agua. En este caso se parametrizaron las reglas de descarga de los tres embalses en cadena para el caso en que la oferta superara a la demanda, del partidor de caudales aguas debajo de los embalses y del sistema de bombeo de aguas subterráneas.

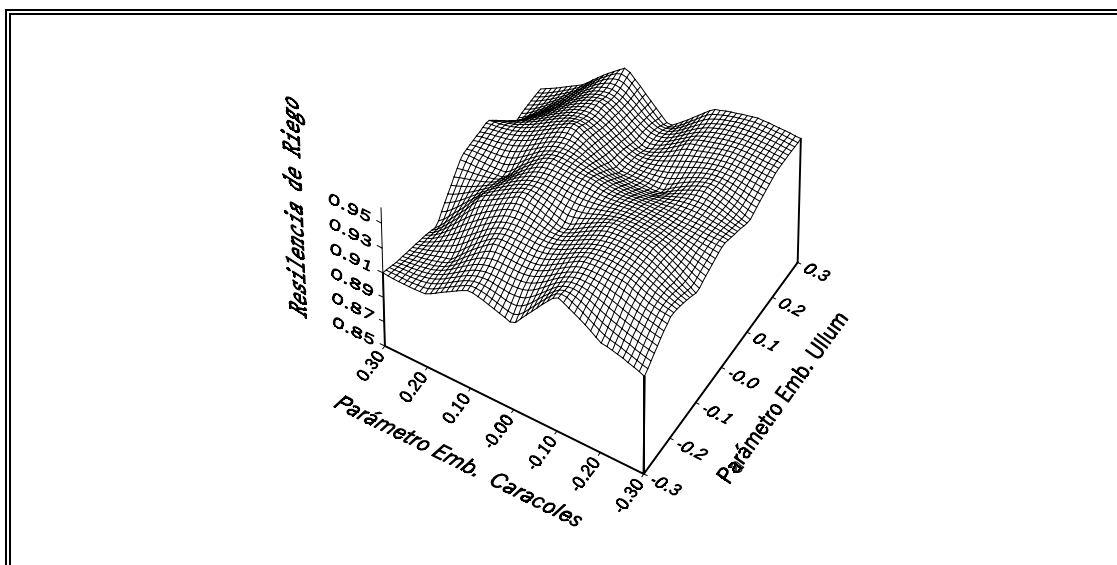


Figura 5.27: Variación de la Resiliencia del propósito Riego, en función de los parámetros de las reglas de operación del embalse Caracoles (bC) y del

embalse de Ullum (bUll). Observar que el parámetro bPN del embalse Punta Negra se mantiene fijo.

- 3- Analizar la variación del índice de resiliencia en función de los parámetros de las reglas de operación para el horizonte de tiempo requerido (por ejemplo 323 meses en este ejemplo). En la Figura 5.27 se observa un gráfico tridimensional que representa la variación del índice de resiliencia del sector de riego para la variación de los parámetros de operación de dos de los embalses en cadena, lo que ilustra la complejidad del proceso de toma de decisiones, si se tiene en cuenta que el modelo desarrollado posee 5 elementos con reglas parametrizadas, y en la Figura solo se visualizan dos de ellos.
- 4- Identificar la regla o reglas de operación con el valor de resiliencia más cercano al objetivo. Seleccionar aquellos parámetros que dentro de este conjunto de reglas minimicen la severidad de las fallas o índice de vulnerabilidad del sistema para el uso definido.

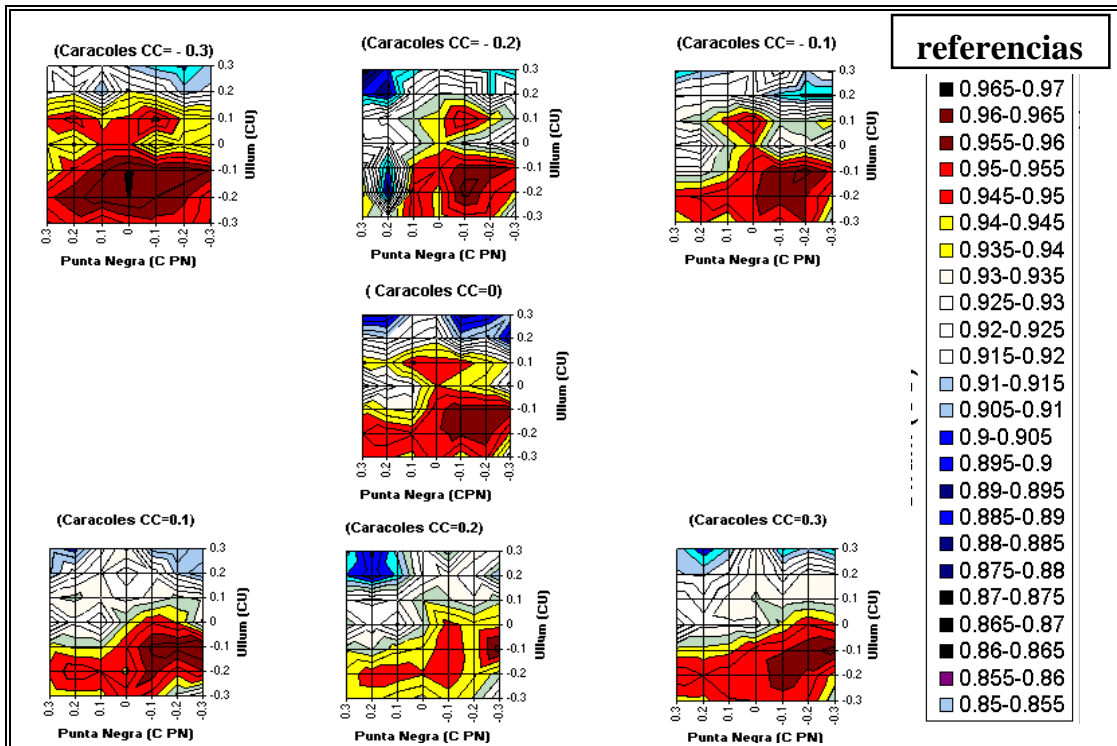


Figura 5.28: Diagramas de Resiliencia del sector de riego para un horizonte de planificación de 323 meses en función de los parámetros de las reglas de descarga CC(Caracoles CPN (Punta Negra) y CU (Ullum)).

En la Figura 5.28 se presenta un análisis de la variabilidad del valor de la resiliencia para uno de los usuarios del sistema (sector riego). Cada diagrama representa las curvas de nivel de una superficie de resiliencia generada a partir de la variación de los parámetros de las reglas de operación de los embalses de Punta Negra y de Ullum, dado un parámetro de operación fijo para la regla de descarga del embalse Caracoles ubicado aguas arriba de los otros dos. Los parámetros de las reglas de operación se variaron en el rango entre  $-0.3$  y  $0.3$ .

Los diagramas presentados en la Figura 5.28 sintetizan la información generada por el modelo de simulación para un espacio de 343 políticas de gestión distintas derivadas de la variación de los parámetros de las ecuaciones del volumen de

descarga para los embalses de Caracoles, Punta Negra y Ullum, para un horizonte de gestión de 323 meses.

Del análisis de los resultados obtenidos en esta aplicación para el sector de riego del sistema hídrico del río San Juan se pueden extraer conclusiones tales como:

- Entregar menos agua que la demandada en el embalse Caracoles (CC entre -0.3 y 0) origina en el diagrama (Figura 5.28) áreas de elevada resiliencia y con una mayor superficie que en el caso de descargar de Caracoles más agua que la demandada a dicho embalse (CC entre 0 y 0.3). Esto significa que el sistema posee una mayor capacidad de recuperación a situaciones de fallo (resiliencia) si se retiene agua en el embalse Caracoles, política que coincide con la regla conceptual general de llenar primero los embalses aguas arriba durante la estación de llenado (Lund y Guzmán, 1999).
- Si las áreas del diagrama (Figura 5.28) con elevados índices de resiliencia (capacidad de recuperación al fallo) son de mayor extensión, significa que el sistema se encuentra en una situación de mayor robustez, pues un cambio en la política de descarga de alguno de los embalses no produce un impacto significativo en la capacidad de recuperación del sistema a largo plazo.
- Los mayores valores de resiliencia en todos los casos se encuentran en la región donde los parámetros de la regla de descarga de Punta Negra y Ullum están entre (-0.1 y -0.2) Esto indica que el sector de riego tendría mayor capacidad de recuperación a largo plazo ante sucesivos estados de fallo, reservando agua en los embalses de Punta Negra y de Ullum.
- En el caso de pretender descargar del embalse Caracoles un mayor volumen que el demandado, con el fin de aumentar la producción del sector energético, lo ideal desde el sector de riego es que dicho volumen de agua quede almacenado en los embalses de Punta Negra y Ullum tal como lo demuestra el hecho de que el máximo valor de resiliencia (0.9652) fue encontrado para el conjunto de parámetros  $CC=0.1$ ,  $C_{PN}=-0.3$  y  $C_U=-0.1$ .



- El realizar descargas exactamente iguales al volumen demandado en cada embalse para el horizonte de gestión analizado, es una estrategia de operación que coloca al sector de riego en situación de poca capacidad de recuperación en el largo plazo, en el caso de entrar en falla, lo cual no es deseable. Sin embargo las políticas conservadoras colocan al sistema de riego en situación de mayor capacidad de recuperación (resiliencia) a largo plazo.
- No existe una relación lineal entre los índices de garantía (frecuencia de fallos), resiliencia (capacidad de recuperación del estado satisfactorio) y vulnerabilidad (severidad de falla). De hecho si el sistema es fiable y resiliente tiene más probabilidad de ser vulnerable a fallas de gran magnitud. La (Figura 5.29) muestra la relación entre los tres índices de evaluación de fallo para cada propósito. Se observa claramente que es muy poco probable alcanzar al mismo tiempo máxima resiliencia, mínima ocurrencia de fallo y mínima vulnerabilidad. Existe por definición una relación directa entre Resiliencia y ocurrencia de fallo, sin embargo la magnitud de las fallas no sigue esta proporcionalidad directa. Al contrario, en general se observa que a medida que disminuye la frecuencia de fallo el sistema se vuelve más vulnerable a fallos de mayor magnitud y viceversa.

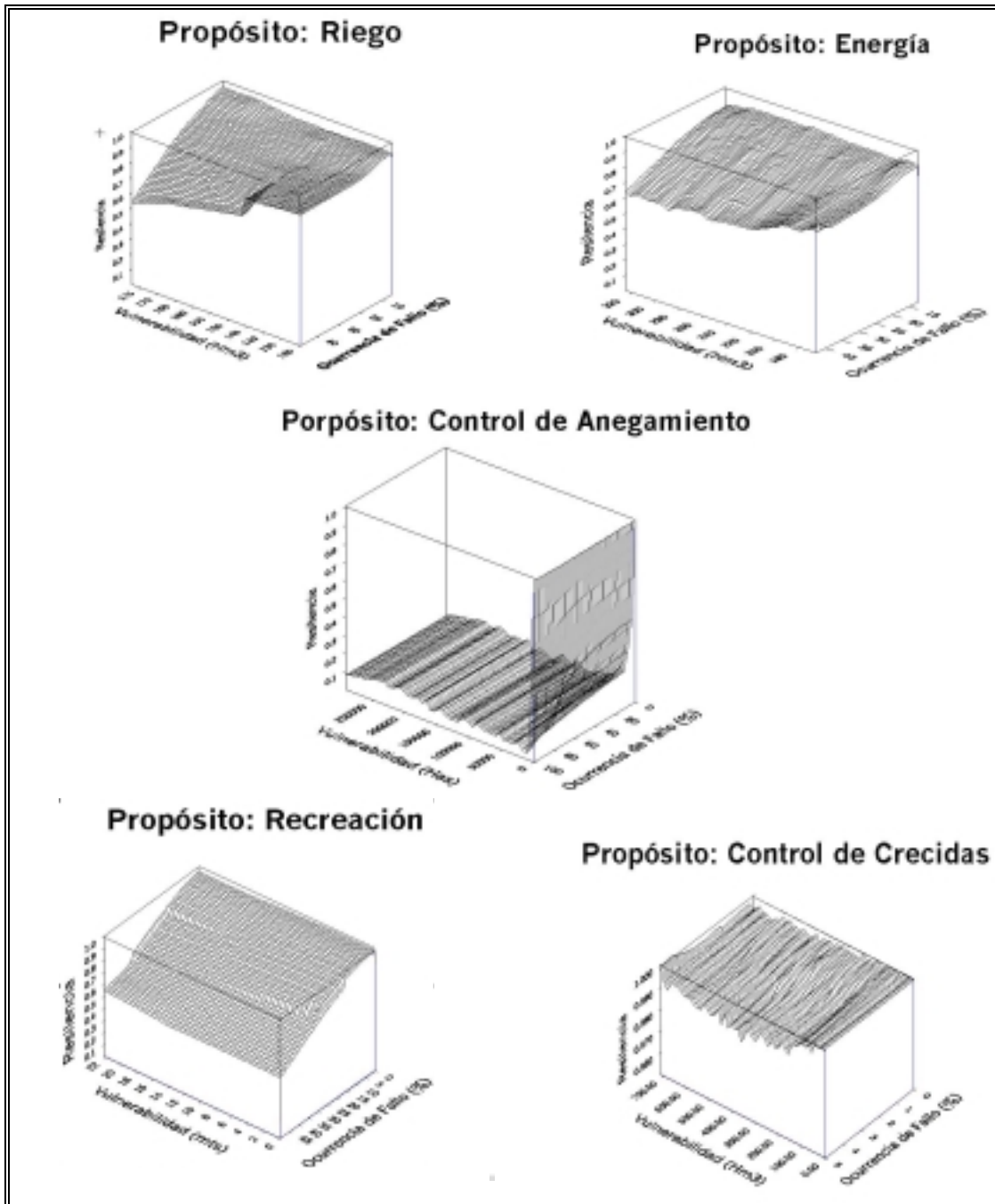


Figura 5.29 Representación de los Indices de Ocurrencia de Fallo, Resiliencia y Vulnerabilidad para los cinco propósitos analizados en el Sistema Hídrico del Río San Juan.

En la (Figura 5.29) que representa los valores adoptados por los índices para las 3,500 simulaciones del sistema hídrico del río San Juan, se observa una mala capacidad de recuperación del mismo frente al serio problema de anegamientos en el valle (baja resiliencia), y que es indiferente a la magnitud del problema (extensión anegada). Esto significa que una vez que comienza a ser anegada la zona del perfil de suelos entre 0 y 1 m. de profundidad, el sistema no logra recuperarse fácilmente. Ello se debe a la falta de un buen sistema de drenaje asociado al sistema de bombeo que permita evacuar rápidamente el agua de un estrato con una profundidad mayor de 2 m.

Una regla de operación realista puede indicar que la mejor alternativa es buscar alta garantía, resiliencia moderada y mínima vulnerabilidad. El sistema desarrollado demuestra ser lo suficientemente útil para apoyar al gestor del sistema a encontrar aquellas estrategias de operación que consigan satisfacer los valores deseados para cada uno de estos índices de comportamiento del sistema, sin necesidad de escatimar en los detalles en la modelación matemática de cada uno de los procesos que intervienen en el sistema.

El *Segundo Método de Síntesis*, radica en construir un índice tal como el M.E.G.S. que englobe todas las medidas de efectividad de todos los propósitos del sistema, lo que tiene sus ventajas y desventajas. Entre las ventajas, es que permite utilizar herramientas de búsqueda que optimizan el valor de la función objetivo definida en el problema de optimización. Sin embargo la desventaja radica en que el gestor debe concebir la manera de combinar todos los propósitos del aprovechamiento y sus características en un solo índice, por lo que debe dar pesos relativos que le permitan priorizar los propósitos y los índices de comportamiento. Esta asignación de pesos dependerá de los grupos de interés consultados y representa el problema más importante a salvar al encarar este tipo de metodología. Tal selección de pesos, requiere de valores de juicio. Para muchos proyectos, dentro de países en desarrollo, estos pesos son estimados con frecuencia mediante las agencias que financian los proyectos. Los pesos especificados por estas agencias pueden ser, y a menudo lo son, diferentes de aquellos

que reflejarían la política regional o nacional. Pero más allá de quien lo hace, la estimación de los pesos apropiados requiere un estudio del impacto sobre la economía, la sociedad y las prioridades de desarrollo involucradas.

Ahora bien, el problema que enfrenta el analista, a la hora de comparar planes alternativos (distintos conjuntos de pesos relativos entre objetivos) es que los valores sociales óptimos para dichos pesos y los rangos entre los cuales pueden variar son desconocidos. Son aún desconocidos para los que toman decisiones hasta que no tienen la oportunidad de examinar los detalles y el impacto de cada plan resultante.

Quienes tienen a cargo la toma de decisiones no pueden saber lo que quieren hasta saber qué es lo que pueden lograr. Sin embargo, pueden seleccionarse varios juegos de pesos y de rangos y resolver el modelo para cada juego.

Cada solución factible es un punto de la frontera de eficiencia que puede servir como punto de partida para la discusión y búsqueda posterior.

El uso de la técnica de optimización con aproximación por ponderación, es una de las técnicas disponibles para generar soluciones eficientes, que permite al tomador de decisiones junto al analista, seleccionar la mejor alternativa de compromiso de entre las numerosas alternativas eficientes. Existen distintos métodos de selección para encontrar la mejor alternativa, basados en la teoría del valor.

Por último es interesante resaltar que, el primer método planteado puede ayudar al gestor a interpretar mejor las relaciones entre las políticas de gestión, los índices de fallo y las relaciones de los índices entre sí, permitiéndole tomar decisiones en cuanto a la asignación de las prioridades relativas entre los índices. Estas decisiones deben estar también íntimamente ligadas a los objetivos del aprovechamiento del recurso agua para cada uno de los propósitos, enmarcados en el objetivo general de gestión del sistema hídrico total.

## VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 Conclusiones

La principal contribución de esta investigación en el campo de la gestión de los recursos hídricos, se basa en el desarrollo de un método que potencia las posibilidades de búsqueda de soluciones, brindando al gestor de un sistema hídrico complejo una herramienta dinámica que le permite fácilmente personalizar tanto el problema como la búsqueda de la gestión óptima del sistema global.

Tal aporte se materializó a partir de la combinación estratégica de tres herramientas matemáticas y cuatro conceptos básicos. Las tres herramientas son la *simulación de procesos continuos*, las *redes neuronales artificiales* y los *métodos de optimización*. Los cuatro conceptos son *la utilización de reglas de producción*, *la parametrización de reglas de operación*, *el cálculo de las medidas de efectividad de los distintos usos del sistema* y *la ponderación relativa de propósitos conflictivos y de las medidas de efectividad de los usos*.

Se han obtenido conclusiones referidas al desempeño del método como herramienta de apoyo a la gestión integral de los recursos hídricos multipropósitos, referidas a la aplicación, robustez, ventajas y limitaciones del método.

Las principales conclusiones referidas a la aplicación de la metodología son las siguientes:

- La metodología es generalizable a cualquier sistema complejo de recursos hídricos mediante las herramientas incluidas en el SARH-2000.
- La metodología de gestión de cuencas utilizada, se enmarca en la teoría del análisis de sistemas lo cual permite resolver problemas de diseño, operación y

gestión mediante el adecuado planteo del problema y uso de las técnicas de simulación unidas a las técnicas de optimización. La unión entre ambas técnicas matemáticas se materializó a través de la utilización de la técnica de redes neuronales artificiales que permite encapsular el modelo de simulación en un modelo simple no lineal, y luego incorporarlo en la estructura del modelo de optimización a fin de buscar políticas de gestión óptimas dentro del espacio de políticas factibles.

- La parametrización de reglas de operación de los elementos de regulación y control más importantes del sistema, permite la construcción de un espacio de políticas factibles dentro del cual se puede realizar la búsqueda de valores de parámetros que optimicen la medida de efectividad seleccionada para evaluar el desempeño del sistema frente a distintos escenarios y políticas de gestión.
- La utilización del indicador de ocurrencia de fallo permite al gestor obtener información sobre la probabilidad de fallo de cada propósito para distintos horizontes de explotación o de gestión, dándole elementos de juicio que le otorgan la capacidad para evaluar el riesgo de la aplicación de una regla de operación, definida a partir de los parámetros de operación. Así mismo índices tales como la resiliencia y la vulnerabilidad de fallo incorporan conocimiento al gestor sobre la capacidad de reacción de un propósito frente a una situación de fallo y sobre la severidad que puede tener dicho fallo respectivamente, información valiosa al momento de decidir sobre cual política de operación alcanza los objetivos de gestión preestablecidos.
- La naturaleza estocástica de los flujos de entrada al sistema puede ser modelada utilizando redes neuronales artificiales que permiten captar la no linealidad de los fenómenos involucrados en el complejo proceso de derretimiento de nieve-escorrentía, obteniendo un modelo cuya serie de residuos posea un comportamiento similar a un proceso de ruido blanco. Este modelo de red

neuronal puede usarse para generar series equiprobables de escurrimientos de ingreso al sistema, posibilitando estudios del sistema bajo situaciones de incertidumbre y la evaluación del riesgo de la adopción de reglas de operación definidas en estas condiciones.

- El sistema permite introducir modificaciones estructurales, reglas de operación y definición de fallos en el modelo de simulación en forma fácil, sin necesidad de variar los aspectos metodológicos, permitiendo encarar distintos tipos de análisis físicos, económicos o una mezcla de ambos.
- Las redes neuronales artificiales pueden entrenarse para capturar el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios de operación. Dicho comportamiento se representa por un conjunto de medidas de efectividad asociadas a los distintos propósitos del sistema. Las medidas de efectividad pueden tener relación con aspectos económicos, físicos o mixtos, de acuerdo al tipo de análisis que se desee realizar del sistema.
- Las redes neuronales tienen la capacidad de aprender varios conceptos en forma simultánea, dando la posibilidad de encapsular el conocimiento inserto en un modelo de simulación complejo en un solo modelo de red neuronal de varias salidas. Por ser las redes neuronales, una combinación lineal de funciones no lineales continuas y diferenciables, se pueden utilizar como parte de una función objetivo igualmente continua y diferenciable, incorporando el conocimiento de todo el modelo de simulación dentro del modelo de optimización no lineal, lo que potencia las bondades de ambos modelos.
- Las redes neuronales se entrenan con un número suficientemente grande de ejemplos de simulación, de tal forma de tener una buena capacidad de generalización, es decir de reconocer nuevas situaciones fuera del conjunto de entrenamiento. En el caso de aplicación estudiado se realizaron 3,500

simulaciones, utilizando 2,000 conjuntos de entrada - salida para entrenamiento, 1,000 conjuntos para validación y 500 para test de la red.

Las principales conclusiones referidas a la robustez y ventajas de la metodología son las siguientes:

- La idea de personalizar los pesos relativos de propósitos en forma independiente del modelo de simulación propiamente tal, tiene la ventaja de entregar al usuario gestor una herramienta valiosa para adaptar su sistema al dinamismo de la competencia entre propósitos sin necesidad de modificar los modelos de simulación y de redes neuronales desarrollados.
- La ventaja del sistema SARH-2000 radica en la generalidad de aplicación de las herramientas de computación incluidas dentro del sistema. La metodología de análisis de políticas de gestión explicada en el capítulo III no presenta limitaciones, dado su universalidad, en cuanto a su capacidad de aplicación a distintos sistemas hídricos cualquiera sea su grado de complejidad, escenarios hidrológicos, tipos de propósitos, sistema legal que regule el mercado de usuarios y procesos involucrados.
- La visualización de la relación entre los índices de ocurrencia de fallo, resiliencia y vulnerabilidad como la presentada en la Figura 5.28 entrega al gestor información importante en el momento de la toma de decisiones, ya que le permite conocer las consecuencias de la decisión en forma anticipada.
- El sistema SARH-2000 permite desarrollar modelos que pueden ser usados como sistema de advertencia temprana en el caso del estudio del impacto de la adopción de regla específica y como sistema de evaluación de reglas alternativas lo que otorga al gestor la capacidad de implementar medidas de mitigación en casos extremos como sequías o crecidas pronosticadas.



- Las modificaciones de las características hidrológicas de la cuenca pueden fácilmente incorporarse actualizando la red neuronal de pronóstico si se considera un caso fuera de su capacidad de generalización.
- El período de gestión u horizonte de explotación, así como el paso de tiempo se cambian fácilmente en el modelo de simulación, para adaptar el modelo a distintos jerarquías de tiempo.

Una limitación del sistema SARH-2000, es intrínseca del método de unión entre el modelo de simulación y el modelo de optimización. Dado que esta unión se materializa a través de un modelo de red neuronal entrenado para un escenario de gestión definido, cualquier modificación de los parámetros que fijan dicho escenario de gestión implica la necesidad de ajustar una nueva red neuronal e introducirle en el modelo de optimización. El sistema permite hacerlo, por lo que la limitación se plantea sólo en el nivel de usuario gestor y no en el de usuario analista.

## **6.2 Trabajos Futuros**

La metodología propuesta abre la puerta a una gran cantidad de posibles desarrollos futuros, ya que el sistema SARH-2000 sienta una base metodológica para explorar y desarrollar futuras líneas de investigación tales como:

- Explorar la adopción de nuevas medidas de efectividad para los distintos propósitos tales como períodos de retorno de fallos en procesos dependientes, tema que se ha abordado recientemente en algunas investigaciones sobre sequías periódicas mensuales.
- Explorar la capacidad de redes neuronales complejas para capturar distintos índices de comportamiento del sistema, no sólo ante un escenario de gestión, sino

también ante varios escenarios de gestión en forma simultánea, de manera de salvar la limitación a que se hace referencia en las conclusiones.

Desarrollar una base de datos común a todas las aplicaciones que permita automatizar las tareas de manejo de información dentro del sistema. Esto mejoraría los tiempos del usuario analista y reduce los riesgos de errores en la etapa de tratamiento de información.

Desarrollar un módulo de inferencias basado en un lenguaje de representación del conocimiento tal como PROLOG, que permita al usuario gestor inexperto tomar decisiones de operación en base a la información que le brinda el sistema. Este módulo también puede ser utilizado como herramienta de aprendizaje.

Con respecto a la aplicación realizada en la cuenca del río San Juan, cabe profundizar en el nivel de detalle de todos los módulos desarrollados en la medida que se cuente con información más detallada. En este sentido, la actualización de la información debe ser permanente, por lo que debe implementarse en la cuenca un sistema de monitoreo tanto de las variables de entrada como de estado del sistema.

## VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHART, R. J., SEE, L. y KNEALE, P. E. (1998) New Tools for Neurohydrologists : using network pruning and model breeding algorithms to discover optimum inputs and architectures. <http://www.geog.port.ac.uk/geocomp/geo98/20/gc-20.htm>
2. ABRAHART, R. J. y SEE, L. (1998) Neural Network vs ARMA Modelling: Constructing benchmark case studies of river flow prediction. [http://divcom.otago.ac.nz/sirc/geoc98/05/gc\\_05.htm](http://divcom.otago.ac.nz/sirc/geoc98/05/gc_05.htm)
3. ANDREU, J., CAPILLA, J. y SANCHIS, E. (1996) AQUATOOL, a generalized decision support system for water resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 117(96), 269-291.
4. BAKONYI, P. (1993) Expert Systems in Hidrology World Meteorological organization - Geneva - Switzerland WMO/TD- No. 532 Technical Reports in *Hydrology and Water Resources* No. 36
5. BAYAZIT, M. y ÜNAL, N. E. (1990) Effects of Hedging on Reservoir Performance. *Water Resources Research*, 26(4), 713-719.
6. BEARD, L. R. (1973). Status of Water Resources Systema Analysis. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol 99 – HY4, pp. 559-565.
7. BELAINEH, G., PERALTA, R. C. y HUGHES, T. C. (1999) Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* / May/June pages 154-161.

8. BURGOS, J. (1998) *Microsoft Visual Basic 5*. Editorial ABETO. España
9. CASAS, I. y NAVÓN, J. (1997). *Apuntes del Curso II-2712 Sistemas de Información*. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
10. CFI, CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (1961). Recursos hídricos superficiales. *Consejo federal de Inversiones CFI Tomo IV, Vol.1*, Buenos Aires.
11. CORIA JOFRE, D. O. (1982). Uso Conjunto del agua superficial y subterránea Valles de Tulum, Ullum y Zonda- *Provincia de San Juan. C.R.A.S. D61, Argentina*.
12. CORREA, N. (1988) *Optimale betriebsregeln für die verbund-bewirtschaftung von oberflächen und grundwasserspeichern* Tesis doctoral en la Universidad de Hannover.
13. DEAN, T., ALLEN, J. y ALOIMONOS, Y. (1995) *Artificial Intelligence Theory and Practice*. Cap.5 Learning 179-216. The Benjamin Cummings Pub. Comp., Inc.
14. DIAZ, G. E. y BROWN, T. (1997) AQUARIUS: A Modeling System for River Basin Water Allocation. *USDA Forest Service. General Technical Report RM-GTR-299 /September*.
15. DIBIKE, Y. B., SOLOMATINE, D. y ABBOTT, M. B. (1999) On the encapsulation of numerical hydraulic models in artificial neural network. *Journal of Hydraulica Research*, Vol. 37 N° 2 - 147-161.
16. DÖLLING, O. y VARAS, E. (2000) Operación de sistemas de recursos de agua multipropósito usando un modelo de simulación de procesos. *Ingeniería Hidráulica en México* Vol. XV, número 2/mayo-Agosto.

17. DÖLLING, O. (1995) *Análisis de Métodos de optimización y su relación con métodos de simulación para su aplicación en la formulación de criterios de operación de sistemas de embalses con propósitos múltiples*. Informe Final Beca Interna CONICET Categoría Iniciación- Dpto Hidráulica Universidad Nacional de San Juan/Diciembre.
18. DÖLLING, O. (1999) *Aplicación de redes neuronales artificiales en la predicción de caudales en cuencas hidrográficas*. Informe de Examen de Candidatura para optar al grado de Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería Postgrado Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile.
19. DÖLLING, O. (1999) Entrenamiento de redes neuronales feedforward a la predicción de escurrimientos en cuencas pluvio-nivales con ejemplos escasos. Ponencia *Seminario de Postgrado Departamento de Computación Pontificia Universidad Católica de Chile, 6 de mayo de 1999*.
20. DORFMAN, R. (1962) *Mathematical Models: The multistage approach, in Design of Water Resources Systems* edited by A. Mass, Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1962.
21. DROESEN, W. J. y GEELLEN, L. (1993) Application of fuzzy sets in ecohydrological expert modelling *IAHS International Proc. of Viena Conference HydroGIS'93* Publ. No. 211 p 3-11.
22. ELAINE, R. y KNIGHT, K. (1996) *Inteligencia Artificial. Cap. 18 Modelos Conexionistas*. Mc Graw Hill 2° Edición .537-581.
23. FIERING, M. B. (1964) Multivariate Techniques for Synthetic Hydrology *Journal of Hydraulic Division, ASCE* Vol. 90 N°H45, . 43-60.

24. FLORIS, V. y GOFORTH, G. F. (1990) Planning the development of de OASIS advisory system Optim Resource Water Management *Proc ASCE 17th Natl Conf. Publ. by ASCE*, Boston Society of Civil Engineers Sect, Boston MA, USA p 288-293
25. FREEMAN, J. A. y SKAPURA, D. M. (1992) *Neural Networks Algorithms, Applications and Programming Techniques* Cap. 3 Backpropagation. Addison Wesley Pub. Comp. 89-125.
26. GEREZ, V. y GRIJALVA, M. (1988) *El enfoque de Sistemas*. Editorial limusa/ Mexico Tomos I al VIII.
27. GUARISO, G. y WERTHNER, H. (1989) *Enviromental Decission Support Systems*. Ellis Horwood/John Wiley, New York, NY.
28. HALL, W. A. y DRACUP, J. A. (1970) *Water Resources Systems Engineering* McGraw Hill C., New York.
29. HASHIMOTO, T. (1982) Reliability, Resilence and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resource Research*, 18(1), 14-20.
30. HASSOUN, M. H. (1995) *Fundamentals of Artificial Networks*. Cap.5 Adaptive Multilayer Neural Networks I. MIT Press - Cambridge Massachusetts – a Bradford Book.
31. KARUNANITHI, N., GRENNEY, W. J., WHITLEY, D. y BOVEE, K. (1994) Neural Networks for River Flow Prediction. *ASCE. Journal of Computing in Civil Engineering* Vol. 8 N° 2.
32. LINSLEY, R., KOHLER, M. y PAULHUS, J. (1988) *Hidrología para ingenieros*. Mc Graw Hill 2° edición.

33. LOUCKS, D. P., KINDLER y FEDRA, K. (1985). Interactive Water Resources Modeling and Model Use: An Overview. *Water Resources Research*, 21(2), 95-102.
34. LOUKS, D. P. (1990). IRIS: An Interactive River System Simulation Program. User Manual. HASA, Laxenburg, Austria.
35. LOUCKS, D. P. y DA COSTA, J. R. (1991). Decision support systems. *Water resources planning*. Ed. Springer-Verlag.
36. LOUCKS, D. P. y SIGVALDASON, O. T. (1982) Multiple reservoir operation in North America. In: The operation of Multiple Reservoir Systems, Z. Kaazmarek and J. Kindler (eds.), *International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria*.
37. LSWC (1999) Pagina Internet del LUND SPACE WEATHER CENTER. <http://nastol.astro.lu.se/~henrik/neuralnet3.html>
38. LUND, J. R. y GUZMAN, J. (1999) Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *Journal of Water Resources Planning and Management* /May/June, pp. 143-153.
39. MELLI, A. (1948) Embalse de Punta Negra. *Secretaría Técnica- Gobierno de la provincia de San Juan*.
40. MAAS, A., HUFSCHMIDT, M. M. y DORFMAN, R. (1962). *Design of Water Resource Systems*. Harvard University. Press, Cambridge, M.A.
41. MÁRQUEZ J. y DIEZ, C. (1987) *Fundamentación de Teoría de Optimización*. Editorial Limusa, S.A., México, México.

42. MARTINS CARRIZO, M. B. (1999) *Visual Basic 6.0*. Edición Profesional en un solo libro. Editorial YR S.R.L. Argentina. Cap. Federal.
43. MITDL, K. V. (1984) *Métodos de Optimización*. Editorial Limusa- Wiley México, México.
44. MINNS, A. W. (1998) *Artificial Neural Networks as subsymbolic Process Descriptors*. Thesis PhD Delft University of Technology (Holanda) Director: Abbot M.B.
45. MITCHELL, T. M. (1997) *Machine Learning*. Cap.4 Artificial Neural Networks. Carnegie Mellon University Mc Graw Hill (81-127) . <http://www.mhcollege.com>
46. MOREL SEYTOUX, H. J. (1999) Optimal Deterministic Reservoir Operations in Continuous Time. *Journal of Water Resources Planning and Management* /May/June, pp. 126- 134.
47. NAGY, A., BARLISHEN, K. D., BURN, D. H. y SIMONOVIC, S. P. (1989): Expert System for Improving the operations Planning in Manitoba Hydro. *ASCE Speciality Conference, Water Resource Planning and Management Division, Sacramento*.
48. NALBANTIS, I. y KOUTSOYIANNIS, D. (1997) A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems. *Water Resources Research*. Vol. 33, No 9, pp. 2165-2177. September.
49. NUSSBAUM, M. y SEPULVEDA, M. (1996) Ingeniería del Conocimiento. *Apuntes del ramo ICC3623 Pontificia Universidad Católica de Chile*.
50. PALMER, R. N. y HOLMES, K. J. (1988). Operational Guidance During Droughts: Expert System Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(6), 647-666.



51. PALMER, R. N. y TULL, R. M. (1987) An Expert System for Drought Management Planning. *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol.1, No. 4, 284-297.
52. PARKER, B. J. y AL-UTABI, G. A. (1986). Decision Support Systems: The Reality The Seems to be Too Hard to Accept. *OMEGA Int.J. of Management Science*, 14(2).
53. PHILIPPI, B. (1988). *Introducción a la Optimización de Sistemas*. Lecciones. Editorial Universidad Católica de Chile- Escuela de Ingeniería.
54. PINTO JAVIER (1998) Inteligencia Artificial Cap. Aprendizaje en Redes Neuronales. *Apuntes de clases ramo IIC2612 PUC*. [http://lyrcc.ing.puc.cl/iic2612/index\\_5html](http://lyrcc.ing.puc.cl/iic2612/index_5html)
55. RESLEMAN, B., PEASLEY R. y PRUNCHNIAK W. (1999) *Visual basic 6*. Editorial Prentice Hall. España.
56. RODRIGO, F. (1998) Recursos Hídricos de la Cuenca del Río San Juan (provincia de San Juan). *Edit. Rodrigo, Felix. Buenos Aires Julio 1998*.
57. RIPPL, W. (1883). The capacity of storage reservoirs for water supply. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 71, 270-278.
58. RUMELHART, D. E., WIDROW, B. y LEHR, M. A. (1994). The basic ideas in neural networks. *Communications of the ACM* ,37, 3, . 87-92.
59. SANCHEZ QUISPE, S. (1999). *Gestión de Sistemas de recursos Hídricos con Toma de Decisión Basada en Riesgo*. Tesis Doctorado en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos .Editada por Universidad Politécnica de Valencia.

60. SEEGER, D. (1987). Optimization of reservoir Systems by Simulation *Second Chinese- German Symposium on Hydrology and Coastal Engineering* - Paper N°H9.
61. SIMONOVIC, S. P. y SAVIC, D. (1989) Intelligent Decision Support and Reservoir management and Operations *Journal of Computing in Civil Engineering* vol.3 No. 4
62. SIMONOVIC, S. P., VENEMA, H. D. y BURN, D. H. (1992) Risk-Based parameter selection for short-term reservoir operation. *Journal of Hydrology* v 131 n 1-4 Feb 1992 p 269-291.
63. SONCINI SESSA, R., ZULETA, J. y PICCARDI, C. (1991). Remarks on the Application of Risk-Averse Approach to the Management of EL Carrizal Reservoir. *Advances Water Research. NATO Asi Series Edited by Loucks D.P., da Costa J.R. Springer Verlag - New York..*
64. SOUTH FLORIDA WATER MANAGEMENT DISTRICT (1987). OASIS. The South Florida Water Management District's Operations Artificial Intelligence Program . *District Brochure.*
65. SPRAGUE, JR. y CARLSON, R. D. (1982). *Building effective Decision Support Systems.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
66. TAYLOR, M. R., LOUCKS, D. P. y FRENCH, P. N. (1995) Quantifying Policy Reliability, resilience and Vulnerability in IRAS. <http://www.englib.cornell.edu/coe/dbl3/IRAS/iras1195.html>
67. VICTORIA, J. A. (1972) Ajuste de Transmisividades, coeficientes de almacenamiento y recargas/descargas verticales netas mediante operación del

programa de cálculo JAIM3- Valle de Tulúm Provincia de San Juan C.R.A.S. P-045 ,San Juan Argentina.

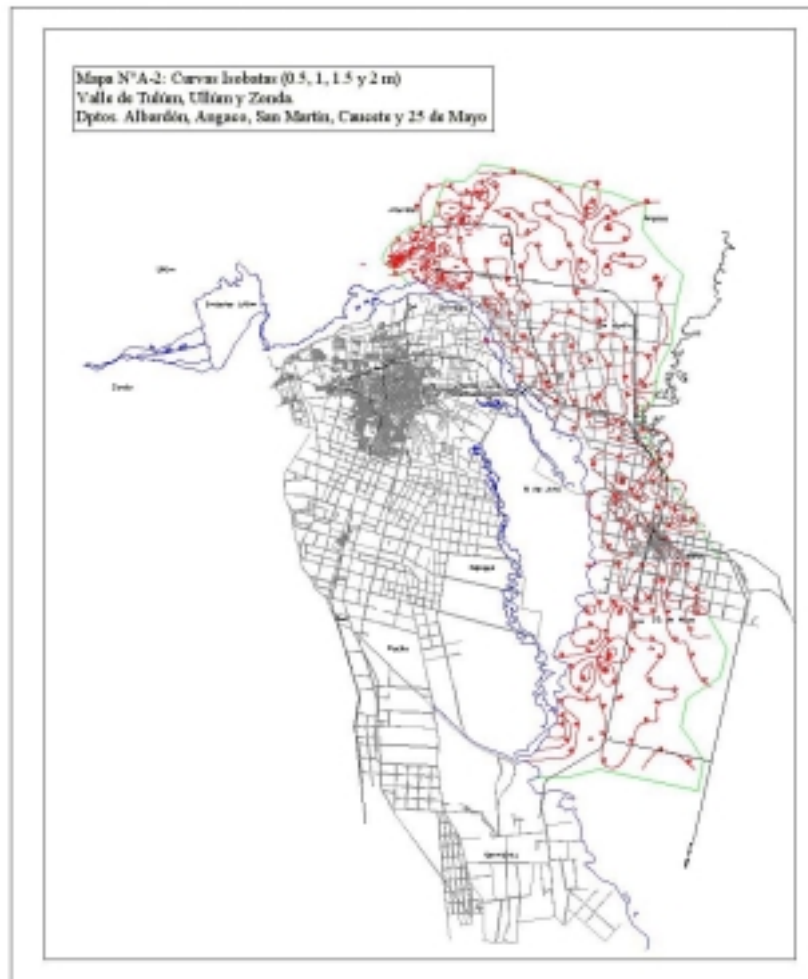
68. WINS, P. H. (1997) *Inteligencia Artificial*. Cap.22 : Aprendizaje mediante entrenamiento de redes neuronales. Addison Wesley iberoamericana 3° edición, 477-505.
69. WELLS, E. y HARSHBARGER, S. (1997) *Microsoft Excel 97. Desarrollo de soluciones*. Mc Graw- Hill / Interamericana de España, S.A.U.
70. YEVJEVICH, V. (1972) *Probability and Statitics in Hidrology*. Cap. 12 Multivariate Analysis. Water Resources Pub. Fort Collins, Colorado, 80521 U.S.A. 277- 286.
71. ZAKALIK, B., RIMOLDI, H. V. y PALMA, A. (1992) Recursos hídricos superficiales de San Juan. *XI Congreso de Geología Argentina*, Buenos Aires.
72. ZEALAND, C. M., BURN, D. H. y SIMONOVIC, S. P. (1999) Short Term Streamflow forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*.214 32-48
73. ZELL ANDREAS, et al (1995) Manual Stuttgart Neural Network Simulator. SNNS .ver 4.1- *Report N°6/95. University of Stuttgart. Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems (IPVR)*

# **ANEXOS**

# **ANEXO A – MAPAS**



## MAPA A-2



# **ANEXO B – TABLAS**



**TABLA B-1 : CAUDALES MEDIOS MENSUALES RÍO SAN JUAN ESTACIÓN KM 47.3 (m3/seg)**

RÍO: SAN JUAN  
 LUGAR: KM 47.3  
 PROVINCIA: SAN JUAN  
 CUENCA: RÍO SAN JUAN

LATITUD: 31° 32'  
 LONGITUD: 68° 53'  
 ALTITUD (msnm): 945  
 AREA (km2): 25,670

AÑO	CAUDALES MEDIO MENSUALES M3/SEG.												DERRAME ANUAL HM3	CAUDAL MEDIO ANUAL M3/SEG.
	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN		
1909-10	31	29,5	32	35,8	43,8	42,5	39,5	40	31	30	31,5	29	1092,2	34,6
1910-11	28	26,5	28	30,2	25,5	24	35,5	43,5	31,5	29,5	30	28	946,6	30,0
1911-12	27,5	27,5	24,5	20,3	28	28,2	29,2	30	27,5	23	21	30	834,6	26,4
1912-13	17,5	18,5	24,5	54,5	54,8	132,3	125,1	92,5	56,5	44,5	42,5	37	1840,1	58,4
1913-14	29,2	35,9	26,8	29	35,8	40,8	37,6	37	37,2	29,2	30	27,4	1040,4	33,0
1914-15	31,2	31,2	30	45,3	80,4	438,5	744,8	501,6	228	134,5	119,5	111,5	6560,8	208,0
1915-16	102	93	111,6	113,5	190	317,5	276,4	172,5	120,1	86,8	71,5	63,8	4529,1	143,2
1916-17	58	61	52,4	78	67	46,5	86,8	62,5	39	31,8	34,5	32,2	1707,4	54,1
1918-19	32,3	31	31,2	40	64,5	114,3	129,5	67	54	48	57,3	61,2	1919,2	60,9
1919-20	60	66,5	58	123	227,6	774,2	569	364	175,5	101,5	85	79,5	7072,3	223,7
1920-21	82,5	82,5	78	77	82	132,6	146,2	142	107	63	88,2	80	3051,1	96,8
1921-22	65,8	64	76,5	115,5	231	192,5	209	126,2	109	78,5	74,5	70	3712,1	117,7
1922-23	72	70,8	68	62,5	143,5	119,5	105,5	86	53,5	46,5	45,5	45	2413,3	76,5
1923-24	42	42,5	40,5	40,6	77,5	101	94	61,5	43,8	36	36,2	32	1706,6	54,0
1924-25	30	30	25	23,5	18	27,5	36	41,8	36	28,5	30	30,8	938,5	29,5
1925-26	29	28,8	28	32,2	62,2	114	70,2	60,6	47,5	31	31	34	1494,0	47,4
1926-27	45	42	41	76	246	387,5	274,5	208	117	83	75,5	79	4400,6	139,5
1927-28	67	55,5	49	65,5	126,5	162,5	114	76	52,5	44	42,2	49	2381,4	75,3
1928-29	49	44	38,5	47,5	103,5	91,8	80,2	79	50,6	44,5	44,5	46	1889,8	59,9
1929-30	40	37	41	47	103,2	128,3	97,5	76,8	47,5	46,5	44	43,2	1976,3	62,7
1930-31	45,5	41,0	52,5	60,5	230,0	205,5	300,3	211,2	131,0	72,0	69,0	61,0	3887,3	123,3

1931-32	54,5	53,0	51,0	104,0	119,5	192,8	166,5	102,0	63,5	50,0	47,0	46,2	2759,4	87,5
1932-33	46,5	51,0	49,0	41,5	75,0	84,2	74,2	65,8	37,3	30,0	30,5	35,3	1630,1	51,7
1933-34	34,3	29,0	34,7	60,2	91,1	73,8	63,5	41,2	29,2	34,5	53,5	65,5	1604,4	50,9
1934-35	62,0	42,0	53,0	76,0	175,5	210,0	234,5	148,5	78,0	63,5	52,5	48,0	3267,9	103,6
1935-36	45,2	46,5	43,0	40,5	93,0	60,8	57,7	61,2	44,0	34,2	38,0	37,0	1579,2	50,1
1936-37	35,0	34,0	37,0	45,0	57,5	68,5	66,0	50,8	41,0	36,5	33,5	32,0	1410,7	44,7
1937-38	34,0	34,0	32,5	46,5	98,5	182,0	106,0	74,5	61,0	42,5	42,5	45,0	1099,8	66,6
1938-39	41,0	37,5	38,0	47,5	36,5	36,5	51,5	43,1	36,5	32,1	32,1	31,5	1218,9	38,7
1939-40	25,7	25,7	29,0	33,5	35,5	40,0	40,5	35,0	31,5	28,5	28,5	30,0	1007,6	32,0
1940-41	30,0	29,1	33,2	48,5	96,0	140,6	163,5	83,5	56,3	49,1	57,5	50,0	2200,4	69,8
1941-42	44,5	47,5	55,7	135,5	170,0	386,7	414,5	280,5	170,0	96,5	84,2	78,0	5160,3	163,6
1942-43	66,2	66,4	70,4	86,2	151,2	143,8	159,8	102,5	77,3	65,6	60,5	61,0	2919,2	92,6
1943-44	57,0	53,0	50,2	67,5	87,2	91,0	91,0	91,3	62,5	57,5	53,2	50,5	2133,7	67,7
1944-45	49,5	45,5	55,5	82,2	132,5	198,5	123,0	119,5	85,3	59,5	59,0	55,5	2800,1	88,8
1945-46	47,5	42,5	45,4	50,5	46,0	46,1	44,2	39,5	40,0	34,3	36,8	39,0	1345,0	42,7
1946-47	38,7	33,5	33,8	36,0	51,0	38,5	45,7	44,6	33,2	28,0	27,8	28,0	1153,2	36,6
1947-48	26,0	25,6	30,0	33,5	66,5	64,4	54,0	41,5	31,3	23,8	28,5	38,8	1192,3	37,89
1948-49	29,0	27,8	34,0	54,0	93,5	149,5	100,1	61,5	43,4	39,3	37,0	38,5	1864,8	59,1
1949-50	33,2	35,5	35,1	38,6	55,0	42,0	40,2	35,2	30,2	27,0	29,0	33,0	1140,6	36,2
1950-51	28,3	28,2	28,1	37,0	55,4	76,6	59,5	35,9	29,2	26,8	29,8	30,7	1223,2	38,8
1951-52	30,1	28,5	27,1	26,7	41,6	43,9	45,1	40,8	32,4	28,3	29,6	32,0	1066,9	33,8
1952-53	31,8	30,9	36,0	48,3	65,0	91,5	66,8	60,9	49,0	38,0	36,1	40,7	1563,9	49,6
1953-54	36,2	35,3	43,8	58,5	206,8	376,7	235,9	164,7	104,9	92,80,4	69,1	60,2	3869,9	122,7
1954-55	54,4	52,0	53,6	58,8	90,4	84,1	89,0	61,9	51,1	42,4	44,4	42,7	1904,5	60,4
1955-56	39,6	37,1	37,0	42,4	66,9	65,2	54,7	42,0	33,2	29,3	31,3	32,3	1342,8	42,6
1956-57	30,1	27,8	28,2	35,3	35,6	31,8	33,5	34,2	30,5	28,6	28,5	32,5	989,3	31,4
1957-58	29,8	27,2	28,8	50,4	97,8	140,6	117,5	67,7	58,7	41,2	37,5	37,9	1932,7	61,3
1958-59	37,3	34,2	35,6	51,5	56,9	48,0	41,5	41,4	39,3	31,1	31,4	31,0	1259,6	39,9
1959-60	30,5	30,1	38,6	46,6	58,0	56,4	56,5	45,6	32,8	28,2	28,3	28,3	1261,2	40,0

1960-61	30,5	32,4	34,4	46,3	70,0	94,1	52,0	44,7	34,5	30,1	30,8	29,8	1391,9	44,1
1961-62	30,1	30,1	29,1	55,7	108,7	112,2	63,5	53,7	41,2	35,1	33,6	33,0	1645,0	52,2
1962-63	31,9	30,5	30,1	34,0	58,8	52,2	32,9	41,5	39,9	29,2	30,2	29,8	1187,7	37,7
1963-64	29,4	27,6	31,0	35,4	56,0	239,7	234,2	111,4	64,9	50,8	46,3	45,1	2553,4	81,0
1964-65	42,8	35,7	37,1	37,4	33,8	30,7	32,8	32,3	30,2	30,9	32,1	33,1	1074,9	34,1
1965-66	29,9	32,1	36,1	60,2	170,8	205,7	203,3	110,6	68,2	54,7	49,0	45,8	2802,2	88,9
1966-67	45,5	42,3	42,0	55,4	72,6	74,4	59,4	58,8	40,5	34,9	35,6	35,0	1567,1	49,7
1967-68	33,3	31,6	30,5	34,0	32,9	34,2	33,5	34,1	30,9	25,0	26,4	25,5	977,1	31,0
1968-69	24,1	22,3	18,9	17,0	17,6	16,5	17,4	27,0	22,6	17,2	18,3	20,0	628,3	19,9
1969-70	19,9	19,0	21,8	22,1	30,3	58,5	40,5	33,1	29,1	20,6	22,2	22,2	891,4	28,3
1970-71	21,6	21,2	21,0	19,7	26,8	26,1	21,4	19,9	18,8	17,3	18,9	19,1	661,8	21,0
1971-72	18,9	19,0	20,5	24,9	28,6	23,4	28,5	30,0	22,2	18,8	22,4	24,5	750,5	23,5
1972-73	24,2	26,4	27,0	36,4	75,3	272,3	293,5	175,0	100,7	72,1	60,2	54,8	3200,2	101,5
1973-74	51,6	48,0	45,7	49,3	76,2	70,7	75,3	68,0	44,2	39,1	37,4	36,3	1687,0	53,5
1974-75	36,4	36,4	35,7	55,9	87,7	84,2	83,0	65,2	43,7	37,2	35,3	35,7	1669,5	52,9
1975-76	30,7	31,1	31,1	33,6	38,0	45,1	50,0	40,8	30,3	27,3	27,6	27,9	1086,7	34,5
1976-77	26,2	25,6	24,2	26,1	40,0	37,9	37,1	26,9	26,7	24,6	25,2	25,5	909,8	28,9
1977-78	25,7	27,8	39,6	66,1	135,7	185,7	116,6	76,6	55,7	43,2	42,4	40,2	2247,6	71,3
1978-79	40,9	45,7	44,5	81,8	164,4	266,8	211,4	114,2	73,6	62,2	58,4	49,5	3189,5	101,1
1979-80	44,9	42,4	39,5	44,4	42,1	47,1	59,5	46,7	41,9	52,2	54,0	42,1	1463,1	46,1
1980-81	37,8	37,1	39,9	57,1	107,7	177,8	105,9	102,9	73,6	62,1	47,2	42,6	2317,0	73,5
1981-82	39,6	36,2	36,4	33,9	30,3	29,9	35,6	35,8	29,7	26,1	28,0	29,9	1028,9	32,6
1982-83	38,2	41,4	51,7	67,5	157,2	310,6	255,2	202,5	108,1	79,8	71,0	64,0	3802,8	120,6
1983-84	58,9	58,9	54,7	78,3	133,3	159,2	130,2	99,0	72,5	56,7	50,9	45,4	2622,7	83,2
1984-85	48,8	50,4	55,5	111,6	222,1	295,5	205,1	115,9	99,1	63,7	57,2	50,7	3615,1	114,6
1985-86	48,8	46,1	43,0	42,9	56,6	56,6	53,5	53,7	39,0	35,1	36,3	38,1	1444,7	45,8
1986-87	38,4	37,8	41,0	56,9	96,1	187,0	179,8	100,3	80,3	51,8	49,7	50,9	2548,9	80,8
1987-88	52,3	59,1	57,4	74,4	262,2	392,3	322,2	179,8	131,2	90,7	77,7	69,0	4646,9	147,4
1988-89	64,5	58,8	53,2	54,6	52,0	51,3	59,5	62,3	47,7	40,0	40,8	39,8	1640,9	52,0

1989-90	35,7	33,3	36,0	62,1	102,2	78,1	66,6	54,1	38,6	34,5	35,4	34,7	1606,4	50,9
1990-91	32,3	29,9	28,3	35,8	36,9	33,0	35,7	32,6	30,5	29,2	30,2	33,3	1018,4	32,3
1991-92	33,6	32,2	46,8	56,4	114,7	139,6	164,3	105,4	75,1	54,1	51,4	52,3	2433,4	77,2
1992-93	48,1	43,6	45,9	78,6	125,6	124,5	131,2	91,4	62,7	53,7	62,5	56,4	2428,6	77,0
1993-94	48,4	44,9	47,2	59,6	79,0	73,8	81,7	55,8	43,8	37,6	36,9	36,5	1695,6	53,8
1994-95	35,7	38,0	43,0	45,4	61,2	78,1	68,3	48,6	37,5	34,1	35,2	32,4	1465,2	46,5
1995-96	31,5	29,6	29,8	27,6	34,7	36,1	37,5	28,3	28,8	26,4	26,2	26,7	954,7	30,3
1996-97	26,1	26,2	24,8	23,3	19,9	18,9	25,3	24,7	25,9	20,5	21,5	25,8	743,3	23,6
1997-98	30,1	35,9	48,4	62,0	147,8	325,0	363,5	164,9	102,6	84,4	70,2	61,4	3932,0	124,7
1998-99	53,6	46,7	41,5	46,9	43,9	47,6	53,6	50,92	44,5	36,9	34,8	36,0	1410,9	44,7

NOTA: DE 1909 A 1949 / 50 VALORES OBTENIDOS POR CORRELACION CON ESTACION LA PUNTILLA

Información proporcionada por:

Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan-- Departamento de Irrigación - División de Hidrología -

**TABLA B-2 : Superficies Anegadas en el Valle de Tulúm - San Juan Argentina (por Departamentos)**

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HAS) PROFUNDIDAD DE 0.00 A 1.00												
	mar-91	jul-91	oct-91	abr-92	jul-92	SET/92	dic-92	mar-93	oct-93	dic-93	mar-94	jul-94	oct-95
ALBARDON	0	0	500	550	315	400	300	365	1520	67	340	650	520
ANGACO	1210	0	750	500	810	400	800	0	3890	1525	0	0	175
SAN MARTIN	210	0	830	1440	400	140	1820	515	2560	135	0	540	185
SANTA LUCIA	0	0	220	500	620	300	0	800	530	0	70	310	250
9 DE JULIO	0	0	100	250	170	400	300	0	330	540	110	460	15
RAWSON	0	410	1500	1940	4100	2640	1800	2240	4440	2720	2090	2800	0
SARMIENTO	0	0	1150	1050	450	1970	0	1070	560	230	190	850	85
25 DE MAYO	150	220	0	150	0	0	0	0	1640	410	0	0	1915
CAUCETE	0	0	0	0	0	0	0	80	3650	3610	40	170	590
POCITO	0	70	1900	3650	0	0	400	910	100	1080	1620	4860	1590
TOTALES	1570	700	6950	10030	6865	6250	5420	1620	19220	10920	4460	10650	5325

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HAS) PROFUNDIDAD DE 1.00 A 1.50												
	mar-91	jul-91	oct-91	abr-92	jul-92	SET/92	dic-92	mar-93	oct-93	dic-93	mar-94	jul-94	oct-95
ALBARDON	0	360	1150	800	670	890	800	960	2490	3280	1180	825	610
ANGACO	2190	1660	4400	2780	3080	5880	4900	3590	6940	5200	200	2965	4175
SAN MARTIN	270	370	4500	2870	6700	7360	4950	4735	5850	5935	320	4360	2895
SANTA LUCIA	130	0	1100	1000	500	950	1600	1175	1410	510	1320	930	410
9 DE JULIO	0	130	2510	220	150	3300	1500	1230	4480	1970	1080	1360	1655
RAWSON	0	3740	6870	4500	6630	5110	2300	3845	7040	3940	2680	4030	4020
SARMIENTO	0	490	6410	5280	3350	7810	350	4000	9600	6250	2470	5260	7160
25 DE MAYO	1305	710	2930	2540	2580	4250	800	1635	8990	1760	6550	2800	850
CAUCETE	40	0	1400	500	190	1730	1400	1215	2550	2585	1090	1460	1445
POCITO	0	5870	4250	5050	2250	5440	2680	4070	2930	2430	3130	5015	2875
TOTALES	3935	1330	35520	25540	26100	42720	21280	26455	52280	33860	20020	29005	27095

