

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente



Metodología para la generación y evaluación de políticas de operación en sistemas de recursos hídricos. Aplicación a un sistema de México.

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Alba Nélide García Beltrán

Dirigida por:

Dr. Abel Solera Solera

Dr. Joaquín Andreu Álvarez

Valencia, diciembre de 2007.

*A mis padres, por su amor y apoyo incondicional y por darme a los mejores
compañeros de vida: Salvador, Yolanda, Silvia, Roberto y Juan Carlos.*

*It is of prime importance that the public be able
comprehensively and understandably to acquire
information about scientific research and its results...
If scientific findings are restricted to small circle of people,
the philosophical sense of a people is weakened,
which leads to its mental depletion.*

Albert Einstein

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, por la financiación parcial de mis estudios de doctorado, mediante la concesión de una beca-crédito.

Al Ministerio de Educación y Ciencia de España, por la financiación parcial de mis estudios de doctorado a través de la beca: BES-2003-0772.

A la Comisión Nacional del Agua de México, porque gracias a su constante labor en la medición de variables hidroclimáticas es posible la realización de trabajos como éste.

A la Universidad Politécnica de Valencia, especialmente al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio ambiente, por acogerme durante estos cinco años.

A la UNAM, mi *alma Mater*, porque gracias a la formación que me brindó he logrado otro objetivo.

A mis directores de tesis los Drs.: D. Joaquín Andreu y D. Abel Solera, especialmente al Dr. Solera, porque gracias a su oportuna intervención y apoyo fue posible la finalización de este trabajo.

A mis revisores los Drs.: D. Ramón Domínguez, D. Luis Garrote y D. José Roldán por sus observaciones; especialmente al Dr. Domínguez, por sus ideas y apoyo en varias fases de la tesis.

A mis compañeros del Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente: Ángel Villalobos por su colaboración durante el desarrollo de la tesis, Claudia Contreras por su apoyo y ayuda con las referencias, Carlos Segura por la traducción del resumen al valenciano, Miguel Ángel Pérez por sus aportaciones, Gabriel Lozano por sus observaciones, Guillermo Collazos por su ayuda con el trabajo de investigación previo a la tesis, Eduardo Triana, Eduardo Álvarez, Leonardo Hernández, Davide Deida y David Pulido. Y de los chicos de fin de carrera a: Pablo, Isabel, Roberto, Álvaro y Vicente.

A Roberto García, por su paciencia y disposición para revisar mis documentos.

A Lisa y Chava, por la revisión del resumen en Inglés.

A Teresa Argüello por ayudarme a darle el toque final a la portada.

A quienes desde el otro lado del charco siempre estuvieron presentes: Isabel García, Norma Legorreta y Alejandro García.

A Paty, Tere, Liz, Gerónimo, Chiara y Miguel, por los momentos compartidos.

Y por último, porque al final han sido lo más importante de mi estancia en Valencia:

A Delva Guichard y Ángel Villalobos, porque me hicieron sentir como en casa.

A Claudia, Eyder, Gabriel, Olga, Ángela, José Luis y Yesid; mi familia colombiana.

Resumen

El agua como recurso finito e indispensable para la supervivencia de la humanidad y el desarrollo de las civilizaciones, ha sido, es y será objeto de múltiples estudios. La variabilidad espacial y temporal, así como el incremento constante de su demanda ha provocado el interés de especialistas en ingeniería de recursos hídricos y ramas afines que colaboran de forma conjunta para mejorar el aprovechamiento de este bien a nivel global.

Un instrumento fundamental para la gestión integral del recurso hídrico es la planificación hidrológica, donde las reglas de operación o explotación de los sistemas son algunas de las estrategias de las que se sirve el planificador para mejorar el aprovechamiento de dichos recursos. El objetivo de estas reglas es obtener un mejor aprovechamiento de los recursos de una cuenca o sistema de cuencas, tratando de mitigar los efectos adversos de las sequías hidrológicas y de las crecidas que inevitablemente se presentan en tales sistemas, debido a su naturaleza variable a través del tiempo y del espacio.

En esta tesis se presenta una metodología para obtener y evaluar políticas de operación en sistemas de recursos hídricos. Estas políticas de operación van dirigidas a la toma de decisiones al inicio de cada campaña agrícola sobre el volumen de demanda que se va a garantizar durante la misma.

Para ello se hace énfasis en el análisis de situaciones con poca disponibilidad hídrica, buscando modos de gestión que logren minimizar el déficit anual. Este déficit se establece a priori, en el inicio de la campaña y se distribuye a lo largo del ciclo agrícola, lo cual permite planificar un patrón de cultivos en esa campaña adecuado a la disponibilidad hídrica. De esta manera se evitan situaciones de déficit imprevistos durante el ciclo agrícola, que conducirían a pérdidas económicas importantes.

Las políticas de operación así diseñadas permiten a los usuarios tener una garantía muy alta de que el servicio está asegurado durante la próxima campaña y que la probabilidad de que se presente un déficit durante la campaña sea mínima.

Para la obtención de las políticas de operación es necesario utilizar varias herramientas de forma integrada, como son: los modelos de generación de series sintéticas (Modelo MASHWIN, [UPV, 2002], SERENA [Ochoa J.C, 2002] modelo de Svanidze modificado [Arganis J.M., 2004]), técnicas de análisis y caracterización de sequías (teoría de rachas, [Guerrero-Salazar y Yevjevich, 1975]), modelos de optimización (OptiGes, [Andreu, J. 1992]) y simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos (SimGes, [Andreu, J. *et al*, 1996]) o herramientas similares.

La integración de estos modelos dentro del proceso de generación de políticas de operación, da lugar a reglas de gestión prácticas y fáciles de asimilar por los distintos grupos de usuarios que intervienen en el sistema de recursos hídricos, ya que a través de indicadores como el volumen almacenado o volumen almacenado más una aportación, permiten establecer la necesidad de una restricción.

El método de generación de políticas de operación que se propone consta de cuatro procesos principales, que son: la determinación de los niveles de restricción óptimos para un sistema, la definición de la regla de operación en función de un indicador que active la restricción, el ajuste de los parámetros que definen la regla de operación mediante la simulación del sistema y, la evaluación de las reglas de gestión obtenidas. Cabe destacar, que durante el proceso de formulación de la política se hacen intervenir distintas series de aportaciones como la histórica, periodos de sequías históricas y series de caudales generadas y de sequías seleccionadas de éstas últimas.

El caso de aplicación seleccionado es el sistema “San-Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito”, localizado en el noroeste de México, el cual está formado de cuatro embalses y tres acuíferos que sirven para abastecer la demanda de tres distritos de riego, que en conjunto comprenden una área de 325,850 ha, con un volumen total concesionado de 3,185.28 hm³, del cual 2945.10 hm³ provienen de las aguas superficiales (CNA-IMTA, 2000) y corresponde al 92.45 por ciento, cifra que remarca la importancia de hacer un uso eficiente de las aguas superficiales del sistema, con la cual se abastece no sólo la demanda agrícola sino también la demanda urbana e industrial de las ciudades de Culiacán y Guamúchil y de poblaciones de la cuenca del río San Lorenzo, respetando los volúmenes máximos y mínimos de operación de las hidroeléctricas de la región.

Al aplicar la metodología propuesta se obtuvieron tres tipos de reglas de operación: 1) función del volumen almacenado al inicio del año agrícola, 2) función del volumen al inicio del ciclo y revisión a los 6 meses, ya que en un año se tienen 2 ciclos; otoño – invierno y primavera-verano y, 3) función del volumen almacenado más una aportación antecedente que da información de la posible presencia de una sequía. Ahora bien, si se simula el sistema ante varios escenarios se observa, entre otras cosas, que: 1) las restricciones sólo se aplican en épocas de sequía, 2) ante iguales condiciones de disponibilidad (volumen almacenado y series de aportaciones) para distintas formas de operar se disminuyen los déficit mensuales imprevistos y, 3) si las sequías se presentan a mitad o al final de periodo de análisis son más fáciles de gestionar que si se presentan al inicio.

Resum

L'aigua com a recurs finit i indispensable per a la supervivència de la humanitat i el desenvolupament de les civilitzacions, ha sigut, és i serà objecte de múltiples estudis. La variabilitat espacial i temporal, així com l'increment constant de la seua demanda ha provocat l'interés d'especialistes en enginyeria de recursos hídrics i branques afins que col·laboren de forma conjunta per a millorar l'aprofitament d'este bé a nivell global.

Un instrument fonamental per a la gestió integral del recurs hídric és la planificació hidrològica, on les regles d'operació o explotació de sistemes són algunes de les estratègies de què se servix el planificador per a millorar l'aprofitament dels recursos hídrics. L'objectiu d'estes regles és obtenir un millor aprofitament dels recursos d'una conca o sistema de conques, tractant de mitigar els efectes adversos de les sequeres hidrològiques i de les crescudes que inevitablement es presenten en tals sistemes, a causa del seu naturalesa variable a través del temps i de l'espai.

En esta tesi es presenta una metodologia per a obtenir i avaluar polítiques d'operació en sistemes de recursos hídrics. Estes polítiques d'operació van dirigides a la presa de decisions a l'inici de cada campanya agrícola sobre el volum de demanda que es va a garantir durant la mateixa.

Per a això el treball fa èmfasi en l'anàlisi de situacions amb poca disponibilitat hídrica, buscant modes de gestió que aconseguisquen minimitzar el dèficit anual, al mateix temps que este dèficit s'establix a *priori*, en l'inici de la campanya, es pot repartir al llarg del cicle agrícola. Açò permet planificar un patró de cultius en eixa campanya adequat a la disponibilitat hídrica. D'esta manera s'eviten situacions de dèficit imprevistos, durant el cicle agrícola, que conduïrien a pèrdues econòmiques importants.

Les polítiques d'operació així dissenyades permeten als usuaris tindre una molt alta garantia que el servici durant la pròxima campanya està assegurat i que la probabilitat que es presente un dèficit durant la campanya siga mínima.

Per a l'obtenció de les polítiques d'operació és necessari utilitzar diverses ferramentes de forma integrada, com són: els models de generació de sèries sintètiques (Model MASHWIN, [UPV, 2002], SERENA [Ochoa J.C, 2002] model de Svanidze modificat [Arganis J.M., 2004]), tècniques d'anàlisi i caracterització de sequeres (teoria de ratxes, [Guerrero-Salazar i Yevjevich, 1975]), models d'optimització (OptiGes, [Andreu, J. 1992]) i simulació de la gestió de sistemes de recursos hídrics (SimGes, [Andreu, J. l'al, 1996]) o ferramentes semblants.

La integració d'estos models dins del procés de generació de polítiques d'operació, dona lloc a regles de gestió pràctiques i fàcils d'assimilar pels distints grups d'usuaris que intervenen en el sistema de recursos hídrics, ja que a través d'indicadors com el volum emmagatzemat o volum emmagatzemat més una aportació, permeten establir la necessitat una restricció.

El mètode de generació de polítiques d'operació que es proposa consta de quatre processos principals que són: la determinació dels nivells de restricció òptims per a un sistema, la definició de la regla d'operació en funció d'un indicador que active la restricció, l'ajust dels paràmetres que definixen la regla d'operació per mitjà de la simulació del sistema i l'avaluació de les regles de gestió obtingudes. Cal destacar que durant el procés de la formulació de la política es fa intervindre distintes sèries d'aportacions com són la històrica, períodes de sequeres històrics i sèries de cabals generades i de sequeres seleccionades d'estes últimes.

El cas d'aplicació que es va seleccionar és el sistema "San-Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito", localitzat en el nord-oest de Mèxic. Està format de quatre embassaments i tres aqüífers que servixen per a abastir la demanda de tres districtes de reg, que en conjunt comprenen una àrea de 325,850 hi ha, amb un volum total concessionat de 3,185.28 hm³, del qual 2945.10 hm³ provenen de les aigües superficials (CNA-IMTA, 2000) i correspon al 92.45 per cent, xifra que remarca la importància de fer un ús eficient de les aigües superficials del sistema. A més de la demanda agrícola s'abastix la demanda urbana i industrial de les ciutats de Culiacán i Guamúchil i de poblacions de la conca del riu Sant Llorenç, respectant els volums màxims i mínims d'operació de les hidroelèctriques de la regió.

A l'aplicar la metodologia que es proposa s'obtenen tres tipus de regles d'operació: 1) funció del volum emmagatzemat a l'inici de l'any agrícola, 2) funció del volum a l'inici del cicle i revisió als 6 mesos, ja que en un any es tenen 2 cicles; tardor – hivern i primavera-estiu i 3) funció del volum emmagatzemat més una aportació antecedent que ens dóna informació de la possible presència d'una sequera. Si se simula el sistema davant de diversos escenaris s'observa entre altres coses que: 1) les restriccions només s'apliquen en èpoques de sequera, 2) davant de les mateixes condicions de disponibilitat (volum emmagatzemat i sèries d'aportacions) per a distintes formes d'operar es disminuïxen els dèficit mensuals imprevistos i 3) si les sequeres es presenten a mitat o al final de període d'anàlisi són més fàcils de gestionar que si es presenten a l'inici.

Summary

Water, as limited and necessary a resource for humanity's survival and the development of civilizations, has been and always will be the object of multiple studies. Space and seasonal variables, as well as constantly increasing demands have provoked the interest of engineers specializing in the field of water resource management. Collaboration on a global level, between engineers and other specialists, will improve the use of this increasingly scarce resource.

An integral instrument for the management of water resources systems is hydrological planning, where the strategic management and usage of these systems must be clearly defined. The main objective of this planning is to improve water systems management, and to establish specific guidelines for the utilization of water basins or systems of basins with the goal of mitigating droughts. Droughts and overflows are an inevitable factor in water resources systems, given the unpredictability of time and space on these systems.

In this thesis, a methodology to obtain and evaluate operating rules is presented. The governance of these operating rules is directed at policymakers and the goal is to provide information about how much water a given system is able to deliver to the end users, at the beginning of each agricultural campaign.

This thesis will focus on specific situations where little water is available, seeking methods for minimizing annual water deficits, while at the same time, managing the likelihood of water deficits throughout the lifecycle of an agricultural campaign. This planning will allow the establishment of cultivation patterns which consider the adequacy of water resources. Through better water management and planning, unforeseen shortages, which often have serious economic consequences, can be avoided.

This kind of operation rules, known as hedging rules, allow users a certain guarantee that service during the next campaign is assured and that the probability of water shortages is minimized.

In order to establish these rules and implement a cohesive policy, it is necessary to integrate several tools, such as: synthetic streamflows generating models (Model MASHWIN, [UPV, 2002], SERENA [Ochoa J.C, 2002] modified Svanidze's model [Arganis J.M., 2004]), techniques of analysis and characterization of droughts (theory of runs, [Guerrero-Salazar and Yevjevich, 1975]), optimization's models (OptiGes, [Andreu, J.1992]) and simulation models for management of water resources systems (SimGes, [Andreu, J. et al., 1996]) or similar models.

The integration of these models within the realm of policymaking, places importance on practical management rules which are easily assimilated by different groups of users. Since reliance on water resources permeates so many different aspects of life, indicators such as

the initial stored volume or stored volume plus a certain inflow quickly establish the necessity of a restriction.

The generation of rules consists of four main processes: determination of the best restriction levels for a system, the definition of a specific rule whose function is to activate the restriction, the adjustment of the parameters that define the rules considering the simulation of the system and the evaluation of the management rules. Furthermore, it is important that during the policymaking process many different factors be considered, which would include historical data, an analysis of periods of droughts and studies of flows and of selected droughts during these times.

The case study selected for this analysis is the system "San-Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito", located in the northwest of Mexico. It is formed of four reservoirs and three aquifers which supply three watering districts that encompass an area of 325,850 ha, with a total concession volume of 3,185.28 hm³, of which 2945.10 hm³ or 92.45% comes from surface waters (CNA-IMTA, 2000). This stresses the importance of making an efficient use of the surface waters of the system. Besides the agricultural demands, this system must also supply the urban and industrial centers of Culiacán and Guamúchil and the populations of the San Lorenzo river basin, considering the maximum and minimum hydroelectric volumes of this region.

When applying the methodology three types of operation rules are obtained: 1) function of the volume stored to the beginning of the agricultural year, 2) function of the volume to the beginning of the cycle with review every 6 months, since during each year, two cycles are observed; autumn-winter and spring-summer and; 3) function of the stored volume with an inflow for antecedent contribution which provides information of the possible presence of a drought. If one simulates the system under different scenarios, the following observations can be made: 1) restrictions are applied only in dry seasons, 2) given equal conditions of availability (stored volume and inflows) the incidences of shortages diminish the monthly unforeseen deficit and 3) if droughts occur during the middle or the end of period of analysis they are easier to manage than if they show up at the beginning.

Metodología para la generación y evaluación de políticas de operación en sistemas de recursos hídricos.

Aplicación a un sistema de México

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Resumen | vii |
| Resum | ix |
| Summary | xi |
| Índice de figuras | xviii |
| Índice de tablas | xxii |
| Lista de símbolos..... | xxiii |
| | |
| Introducción | 1 |
| 1 Estado del arte | 9 |
| 1.1 Métodos de análisis de los sistemas de recursos hídricos | 9 |
| 1.1.1 Programación lineal | 10 |
| 1.1.1.1 Programación lineal estocástica | 12 |
| 1.1.1.2 Redes de flujo | 12 |
| 1.1.2 Modelos de optimización multiobjetivo | 13 |
| 1.1.2.1 Soluciones no dominadas | 13 |
| 1.1.2.2 Determinación de una solución única | 14 |
| 1.1.3 Métodos heurísticos..... | 14 |
| 1.1.3.1 Algoritmos genéticos..... | 14 |
| 1.1.3.2 Redes neuronales artificiales | 15 |
| 1.1.4 Simulación..... | 16 |
| 1.1.5 Modelos informáticos generales para el análisis de los sistemas de recursos hídricos | 17 |
| 1.1.5.1 Modelos de simulación..... | 17 |
| 1.1.5.2 Modelos de optimización..... | 19 |
| 1.2 Modelos estocásticos de generación de series temporales | 20 |
| 1.2.1 Modelos autorregresivos..... | 21 |
| 1.2.1.1 Independencia temporal..... | 21 |
| 1.2.1.2 Prueba de normalidad | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.1.3 Autorregresivo de orden uno (AR1) | 23 |
| 1.2.1.4 Autorregresivo de orden dos (AR2) | 24 |
| 1.2.1.5 Modelo condensado de desagregación espacial..... | 25 |
| 1.2.1.6 Pruebas de bondad de ajuste | 26 |
| 1.2.2 Redes neuronales..... | 27 |
| 1.2.3 Svanidze Modificado (hidrogramas mezclados) | 29 |
| 1.3 Políticas de operación | 31 |
| 1.3.1 Definición de política de operación | 31 |
| 1.3.2 Política de operación normal | 31 |
| 1.3.3 Trabajos sobre conceptos, índices y métodos que ayudan a evaluar el desarrollo de un sistema de recursos hídricos | 32 |
| 1.3.4 Políticas de operación con restricción..... | 34 |
| 1.3.4.1 Políticas de operación lineales..... | 37 |
| 1.3.4.2 Políticas de operación discretas | 40 |
| 2 Generación y análisis de series temporales | 43 |
| 2.1 Criterios para determinar las series sintéticas a utilizar en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos | 44 |
| 2.1.1 Índice de parsimonia general | 44 |
| 2.1.2 Criterio de Akaike | 45 |
| 2.1.3 Análisis de la preservación de los estadísticos | 45 |
| 2.1.3.1 Media..... | 46 |
| 2.1.3.2 Varianza | 46 |
| 2.1.3.3 Sesgo | 46 |
| 2.1.3.4 Autocorrelación anual..... | 47 |
| 2.1.3.5 Correlación cruzada | 47 |
| 2.1.3.6 Autocorrelación mes a mes..... | 48 |
| 2.2 Identificación y caracterización de sequías | 49 |
| 2.2.1 Teoría de rachas o sucesiones | 49 |
| 2.2.2 Identificación y caracterización por aportaciones superficiales a cada presa | 51 |
| 2.2.3 Identificación y caracterización por aportaciones al sistema de recursos hídricos | 51 |
| 2.3 Determinar el número de series a generar | 52 |
| 2.4 Evaluación cualitativa y cuantitativa de las series generadas | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 3 Políticas de operación con restricción a la demanda..... | 55 |
| 3.1 Periodo de optimización | 57 |
| 3.2 Definición de los volúmenes objetivo..... | 57 |
| 3.3 Influencia de las condiciones iniciales | 58 |
| 3.4 Niveles de restricción..... | 59 |
| 3.4.1 Determinación de los niveles de restricción | 60 |
| 3.4.1.1 Verificación de la validez de los niveles de restricción | 60 |
| 3.4.1.2 Representación gráfica de los volúmenes de extracción o seltas contra indicador para establecer una restricción | 61 |
| 3.4.1.3 Utilización de sequías para ajustar los niveles mínimos de extracción..... | 62 |
| 3.4.1.4 Determinación del volumen de extracción mínimo garantizado ... | 62 |
| 3.5 Determinación de una regla de gestión | 63 |
| 3.5.1 Delineación de la regla de operación | 63 |
| 3.5.2 Ajuste de la regla de operación mediante simulación..... | 64 |
| 3.5.3 Tipos de reglas | 65 |
| 3.5.3.1 Función del almacenamiento | 65 |
| 3.5.3.2 Función del almacenamiento más aportación | 66 |
| 3.5.3.2.1 Aportación antecedente | 66 |
| 3.5.3.2.2 Aportación durante el periodo de análisis..... | 67 |
| 3.5.4 Comparación de los distintos tipos de políticas de operación con restricción a la demanda | 68 |
| 3.6 Evaluación de las políticas | 69 |
| 3.7 Periodos de anticipación..... | 70 |
| 4 Integración de la metodología. Aplicación al caso de estudio..... | 71 |
| 4.1 Breve descripción de la zona de estudio | 71 |
| 4.1.1 Localización | 72 |
| 4.1.2 Cuencas de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito..... | 73 |
| 4.1.2.1 Presas de almacenamiento..... | 74 |
| 4.1.2.1.1 Presa José López Portillo..... | 75 |
| 4.1.2.1.2 Presa Sanalona..... | 75 |
| 4.1.2.1.3 Presa Adolfo López Mateos | 75 |
| 4.1.2.1.4 Presa Eustaquio Buelna | 75 |
| 4.1.2.2 Acuíferos en la región | 76 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.2.2.1 Acuífero del río San Lorenzo | 76 |
| 4.1.2.2.2 Acuífero del río Culiacán | 76 |
| 4.1.2.2.3 Acuífero del río Mocerito..... | 77 |
| 4.1.3 Sistema de riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocerito . | 77 |
| 4.2 Recopilación de la información | 80 |
| 4.2.1 Fuentes de abastecimiento | 80 |
| 4.2.2 Usos del agua en la región | 83 |
| 4.2.3 Organismo operador | 85 |
| 4.3 Modelo conceptual..... | 85 |
| 4.4 Análisis de la serie histórica y de las series generadas..... | 86 |
| 4.4.1 Estadísticos de la serie histórica..... | 86 |
| 4.4.2 Modelos estocásticos | 89 |
| 4.4.2.1 Modelos autorregresivos | 90 |
| 4.4.2.2 Hidrogramas mezclados..... | 91 |
| 4.4.2.3 Evaluación de los estadísticos de las series generadas | 91 |
| 4.4.2.3.1 Aportaciones medias | 92 |
| 4.4.2.3.2 Desviación típica..... | 93 |
| 4.4.2.3.3 Sesgo o asimetría..... | 95 |
| 4.4.2.3.4 Matrices de coeficientes de correlación cruzada | 97 |
| 4.4.2.3.5 Correlaciones mensuales..... | 98 |
| 4.4.2.4 Comentarios y valoración de los métodos de generación | 99 |
| 4.4.3 Identificación y caracterización de las sequías | 101 |
| 4.4.3.1 Sequías históricas | 101 |
| 4.4.3.2 Valores medios de las características de las sequías | 102 |
| 4.4.3.2.1 Características de las sequías por presa..... | 102 |
| 4.4.3.2.2 Características de las sequías por sistema de recursos hídricos | 105 |
| 4.4.3.3 Evaluación de las características de las sequías de las series sintéticas | 110 |
| 4.4.4 Selección de las series a utilizar en los modelos de gestión..... | 111 |
| 4.5 Obtención de políticas de operación con restricción | 111 |
| 4.5.1 Uso del modelo de optimización para el caso de estudio... | 112 |
| 4.5.2 Periodo de optimización | 112 |
| 4.5.3 Volúmenes mensuales objetivo | 113 |
| 4.5.4 Influencia de la condición inicial | 114 |
| 4.5.5 Determinación de los niveles de restricción | 115 |
| 4.5.6 Determinación de una regla de gestión con restricción | 116 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.6.1 Delineación de la regla de operación..... | 117 |
| 4.5.6.2 Ajuste de las reglas de operación..... | 118 |
| 4.5.7 Resultados de los tipos de políticas de operación..... | 119 |
| 4.5.8 Comparación de las políticas de operación obtenidas..... | 121 |
| 4.6 Evaluación de las reglas de gestión..... | 127 |
| 4.6.1 Resultados de la evaluación utilizando series largas..... | 127 |
| 4.6.2 Evaluación con sequías equiprobables a las históricas del sistema..... | 129 |
| 4.6.2.1 Selección de las características de las sequías a analizar..... | 129 |
| 4.6.2.2 Resultados para los distintos rangos de magnitudes seleccionados..... | 130 |
| Conclusiones y líneas futuras de investigación..... | 131 |
| | |
| Referencias..... | 137 |
| | |
| Anexo Herramientas informáticas utilizadas..... | 149 |
| A.1 Modelos de generación de series sintéticas..... | 150 |
| A.1.1 MASHWIN..... | 150 |
| A.1.2 SERENA (Software para el Entrenamiento de REdes Neuronales Artificiales)..... | 150 |
| A.1.2.1 Módulo de entrenamiento..... | 151 |
| A.1.2.2 Modulo de generación..... | 151 |
| A.2 MODELOS DE GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS..... | 152 |
| A.2.1 OptiGes..... | 152 |
| A.2.1.1 OptiWin..... | 154 |
| A.2.2 SimGes..... | 155 |
| A.2.2.1 SimWin..... | 158 |
| A.2.3 Sismapre..... | 158 |

Índice de figuras

Capítulo 1

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Regla de operación normal. Fiering 1971 | 32 |
| Figura 1.2 Extracciones sin y con restricción | 35 |
| Figura 1.3 Reglas de operación de embalse para demanda garantizada y demandas secundarias. Loucks <i>et al</i> 1981(pp. 354) | 36 |
| Figura 1.4 Regla de operación con restricción, Bayazit <i>et al</i> (1990) | 37 |
| Figura 1.5 Regla de operación con restricción, lineal, Shih <i>et al</i> (1994) | 38 |
| Figura 1.6 Asignación anual en función del escurrimiento antecedente. Wagner <i>et al</i> (1996)..... | 38 |
| Figura 1.7 Asignación anual en función del almacenamiento + el escurrimiento del año antecedente, Wagner <i>et al</i> (1997) | 39 |
| Figura 1.8 a) Regla de operación Normal, b) Restricción óptima con el uso de funciones cuadráticas. Draper <i>et al</i> (2004) | 39 |
| Figura 1.9 Regla de operación con restricción, discreta. Shih <i>et al</i> (1995) | 40 |
| Figura 1.10 Regla de operación escalonada y variable mes a mes | 41 |
| Figura 1.11 a) Entrega según el nivel de almacenamiento en el sistema y b) Reparto entre las presas | 42 |

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Propiedades de las sequías de acuerdo a la teoría de rachas | 49 |
|--|----|

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Representación esquemática de la metodología para la obtención de reglas de operación con restricción a la demanda de forma anticipada..... | 56 |
| Figura 3.2 Representación gráfica de los volúmenes suministrados para distintos niveles de almacenamiento. Utilizando en la optimización tres niveles de restricción de la demanda. | 61 |
| Figura 3.3 Representación gráfica de disponibilidad versus volúmenes de extracción, se incluyen los resultados de dos sequías del sistema. | 62 |
| Figura 3.4 Delineación de una política de operación menos restrictiva a) y b)otra más restrictiva para un mismo conjunto de valores de disponibilidad vs. Extracción..... | 65 |
| Figura 3.5 Obtención de restricciones para valores probables de aportaciones..... | 68 |

Capítulo 4

Figura 4.1 Región III Pacífico Norte, subregiones y cuencas que la integran 72

Figura 4.2 Localización de cuencas, ríos, presas, distritos de riego y poblaciones más importantes. Fuente: Programa Hidráulico Región III 74

Figura 4.3 Política de Operación del Reglamento 79

Figura 4.4 Escurrimientos históricos registrados en el sitio de la presa José López Portillo 81

Figura 4.5 Escurrimientos históricos registrados en el sitio de la presa Sanalona ... 81

Figura 4.6 Escurrimientos históricos registrados en el sitio de la presa Adolfo López Mateos 82

Figura 4.7 Escurrimientos históricos registrados en el sitio de la presa Eustaquio Buena 82

Figura 4.8 Escurrimiento superficial integrado por las cuatro presas del sistema 83

Figura 4.9 Esquema del sistema San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocarito 86

Figura 4.10 Coeficientes de autocorrelación anual 89

Figura 4.11 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema. 92

Figura 4.12 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema 93

Figura 4.13 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de los hidrogramas mezclados, para las presas del sistema 93

Figura 4.14 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema. 94

Figura 4.15 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema 95

Figura 4.16 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de los hidrogramas mezclados, para las presas del sistema 95

Figura 4.17 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema 96

Figura 4.18 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema 96

Figura 4.19 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo de hidrogramas mezclados, para las presas del sistema 97

| | |
|---|-----|
| Figura 4.20 Comparación de las correlaciones mensuales de las aportaciones a las presas: a) José López Portillo, b) Sanalona, c) Adolfo López Mateos y d) Eustaquio Buelna, entre las series generadas con los tres métodos utilizados y la serie histórica | 99 |
| Figura 4.21 Sequías de la serie histórica | 101 |
| Figura 4.22 Comparación entre el número de sequías de las series históricas y el de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los tres métodos utilizados | 103 |
| Figura 4.23 Comparación entre la duración de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados | 104 |
| Figura 4.24 Comparación entre la intensidad de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados | 104 |
| Figura 4.25 Comparación entre la magnitud de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados | 105 |
| Figura 4.26 Comparación entre el número de sequías históricas y el de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 106 |
| Figura 4.27 Comparación entre la duración de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 106 |
| Figura 4.28 Comparación entre la intensidad de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 107 |
| Figura 4.29 Comparación entre la magnitud de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 107 |
| Figura 4.30 Comparación entre el número de meses con déficit de la serie histórica y el de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 108 |
| Figura 4.31 Comparación entre la duración en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 108 |
| Figura 4.32 Comparación entre la intensidad en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 109 |
| Figura 4.33 Comparación entre la magnitud en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados | 109 |
| Figura 4.34 Esquema del sistema SLCHM en OptiGes | 112 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.35 Volúmenes de almacenamiento mensual promedio, para distintos periodos de optimización..... | 113 |
| Figura 4.36 a) Volúmenes de extracción vs Vo_t b) Volúmenes de extracción vs Vo_t + aportaciones durante el año de análisis, serie histórica | 115 |
| Figura 4.37 a) Volúmenes de extracción vs Vo_t b) Volúmenes de extracción vs Vo_t + aportaciones durante el año de análisis, serie histórica + 2 sequías | 116 |
| Figura 4.38 Delineación de una política de operación en función del almacenamiento | 117 |
| Figura 4.39 Delineación de una regla de operación en función del almacenamiento + aportación antecedente | 117 |
| Figura 4.40 Opciones de delineación de una regla de operación..... | 118 |
| Figura 4.41 Sistema San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito en el modelo SimGes | 118 |
| Figura 4.42 Regla de operación semestral (Octubre – Marzo)..... | 119 |
| Figura 4.43 Regla de operación semestral (Abril – Septiembre)..... | 120 |
| Figura 4.44 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre | 120 |
| Figura 4.45 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre más aportación antecedente | 121 |
| Figura 4.46 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre más la aportación del año de análisis | 121 |
| Figura 4.47 Volúmenes anuales de la serie histórica para el periodo 1949-1998... | 123 |
| Figura 4.48 Coeficientes de restricción, aplicando la política del reglamento. | 124 |
| Figura 4.49 Coeficientes de restricción, aplicando la política escalonada. | 124 |
| Figura 4.50 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(Vo_t \text{ 1 oct})$ | 125 |
| Figura 4.51 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(Vo_t)$ para 2 ciclos. . | 125 |
| Figura 4.52 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(Vo_t + Q_{t-1})$ | 126 |
| Figura 4.53 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(Vo_t + Q_t)$ | 126 |
| Figura 4.54 Distribución porcentual de coeficientes de restricción..... | 129 |

Anexo

| | |
|---|-----|
| Figura A.1 Pantalla de OptiWin | 154 |
| Figura A.2 Regla de operación función del almacenamiento y del escurrimiento del año anterior | 159 |
| Figura A.3 Módulo uno del Sismapre (planteamiento del problema)..... | 159 |
| Figura A.4. Módulo dos del Sismapre (solución del problema)..... | 160 |
| Figura A.5. Módulo tres del Sismapre (resumen de resultados)..... | 160 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1 Capacidades de los vasos de almacenamiento..... | 74 |
| Tabla 4.2 Porcentaje de distribución de aguas | 78 |
| Tabla 4.3 Concesión de agua potable y otros usos | 78 |
| Tabla 4.4 Concesión de agua para riego..... | 78 |
| Tabla 4.5 Volúmenes de extracción y concesión para los tres distritos en hm ³ | 84 |
| Tabla 4.6 Volúmenes mensuales demanda urbana en hm ³ | 84 |
| Tabla 4.7 Volúmenes mensuales demanda industrial en hm ³ | 85 |
| Tabla 4.8 Estadísticos anuales de la serie histórica, valores en hm ³ | 87 |
| Tabla 4.9 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones JLP, valores en hm ³ | 87 |
| Tabla 4.10 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones SAN, valores en hm ³ | 87 |
| Tabla 4.11 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones ALM, valores en hm ³ | 88 |
| Tabla 4.12 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones EB, valores en hm ³ | 88 |
| Tabla 4.13 Valores de la raíz de la desviación media cuadrada relativa, <i>RRMSD</i> . Para los estadísticos de ordenes 1,2 y 3 y los tres métodos de generación de series | 100 |
| Tabla 4.14 Valores de la raíz de la desviación media cuadrada relativa para 50 series | 100 |
| Tabla 4.15 Evaluación del modelo de generación..... | 101 |
| Tabla 4.16 Valores de <i>RRMSD</i> para la caracterización anual por presas | 110 |
| Tabla 4.17 Valores de <i>RRMSD</i> para la caracterización anual del sistema | 110 |
| Tabla 4.18 Valores de <i>RRMSD</i> para la caracterización mensual del sistema | 110 |
| Tabla 4.19 Valoraciones de los modelos en la caracterización anual por presa | 111 |
| Tabla 4.20 Valoraciones de los modelos en la caracterización anual del sistema ... | 111 |
| Tabla 4.21 Valoraciones de los modelos en la caracterización mensual del sistema..... | 111 |
| Tabla 4.22 Volúmenes mensuales objetivo para las presas del sistema | 114 |
| Tabla 4.23 Comparación de las políticas de operación analizadas | 122 |
| Tabla 4.24 Evaluación de las políticas de operación analizadas | 128 |

Lista de símbolos

| | |
|--------------------------------------|--|
| a | Es un parámetro a calibrar en el modelo de redes neuronales, que puede tomar valores entre 0 y 1, siendo 0.3 un valor recomendado de partida. |
| $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ | Son matrices de parámetros que intervienen en la definición del modelo condensado de desagregación espacial. |
| α | Parámetro de la política de operación propuesta por Wagner <i>et al</i> (1996), relacionado con el volumen mínimo a entregar. |
| $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ | Parámetros de la política de operación propuesta por Wagner <i>et al</i> (1996), se refieren a las pendientes que dependen del nivel de disponibilidad en un embalse. |
| CR | Coefficiente de restricción |
| δ | Índice de parsimonia general |
| $\varepsilon(t)$ | Vector que consta de n ruidos blancos no correlacionados con media 0 y varianza 1. |
| E_t | Evaporación en el tiempo t |
| $f(V_{0t})$ | Regla de operación en función del almacenamiento inicial para el tiempo t |
| $f(V_{0t}+Q_t)$ | Regla de operación en función del almacenamiento inicial más una aportación, para el tiempo t . |
| $F(x)$ | Función de distribución de probabilidad acumulada |
| $FV_{\tau k}$ | Son las fracciones de los volúmenes de escurrimiento para el mes τ , el año v y la cuenca k , estas fracciones se utilizan en el modelo de Svanidze modificado. |
| Φ | Matriz de $n \times n$ elementos utilizada en la definición de los modelos autorregresivos, obtenida a partir del método de momentos. |
| g_τ | Es el coeficiente de asimetría de los caudales originales (sin normalizar) del mes τ |
| $\hat{\gamma}$ | Es un estimador del coeficiente de asimetría o sesgo |
| γ_τ | Es el coeficiente de asimetría de las series tipificadas para el mes τ . |
| K | Es el número de parámetros para el índice de parsimonia |
| Kp | Parámetro de restricción utilizado en la política de operación de Shih <i>et al</i> (1994) |
| L_i | Límite inferior de la función de activación utilizada en el modelo de redes neuronales artificiales, ANN |
| L_s | Límite superior de la función de activación utilizada en el modelo de ANN |

| | |
|----------------------|---|
| L INF y | |
| L SUP | Se refieren a los límites de Snedecor y Cochran (1967) para determinar si una serie cumple con el criterio de normalidad |
| m_{z^*} | Valor mínimo de una serie de caudales para una estación dada |
| M_{z^*} | Valor máximo de una serie de caudales para una estación dada |
| \mathbf{M}_0 | Matriz de covarianzas con desfase 0, para los modelos autorregresivos |
| \mathbf{M}_1 | Matriz de covarianzas con desfase 1, para los modelos autorregresivos |
| N | Número de datos |
| p | Es el orden en un modelo autorregresivo |
| Q_t | Caudal en el tiempo t |
| $Q_{v\tau}$ | Es el caudal para el año v y mes τ sin normalizar |
| \bar{Q}_τ | Es la media de los caudales correspondiente al mes τ |
| q | Se refiere al número de términos para evaluar la media móvil en un modelo autorregresivo |
| r_k | Es el coeficiente de autocorrelación de desfase k |
| SVT_v | Suma del volumen de escurrimiento total de todas las cuencas para el año v , modelo de Svanidze |
| S^2 | Es el estimador insesgado de la varianza. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es decir, S . |
| \mathbf{S}_{UW} | Matriz de covarianzas entre las estaciones U y W . Se utiliza en el modelo condensado de desagregación espacial. |
| σ_ε | Es el estimador por máxima verosimilitud de la variancia de los residuales, utilizada en el criterio de Akaike. |
| Θ | Matriz de $n \times n$ elementos utilizada en la definición de los modelos autorregresivos, obtenida a partir del método de momentos. |
| $u_{1-\alpha/2}$ | Es el cuantil $1 - \alpha/2$ de la distribución normal |
| Vo_t | Almacenamiento inicial en el sistema para cada ciclo de análisis |
| V_t | En las gráficas de las políticas de operación se refiere al volumen almacenado en el embalse o sistema en el tiempo t |
| $V_{\tau k}$ | El escurrimiento registrado en el mes τ del año v en la cuenca k |
| VT_{vk} | Es el volumen de escurrimiento total anual para el año v en la cuenca k |
| x_t | Son los datos de una serie (por ejemplo caudales) para el tiempo t |
| $X_{v\tau}$ | Es el caudal normalizado correspondiente al año v del mes τ . |
| \mathbf{X}_t | Es el vector de caudales normalizados y tipificados del mes t correspondiente a las estaciones principales en el modelo condensado de desagregación espacial. |

| | |
|---------------|---|
| \bar{X} | Es la media de una muestra de datos |
| $Y_{\nu\tau}$ | Son series normalizadas y tipificadas correspondientes al mes τ del año ν |
| Y_t | Es el vector de caudales del mes t correspondiente a las estaciones secundarias en el modelo condensado de desagregación espacial |
| Ψ'_j | Es un estadístico sintético que interviene en la formulación de la raíz de la desviación media cuadrada relativa |
| Ψ_j | Es un estadístico histórico que interviene en la formulación de la raíz de la desviación media cuadrada relativa |
| $Z(t)$ | Es un vector compuesto de n series diferentes e interdependientes con media 0 y varianza 1 |

Símbolos del Anexo

| | |
|-------------------------|--|
| α_{ij} | Es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d_{ij,t}$. Modelo OptiGes |
| β_{ij} | Es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d'_{ij,t}$ del nivel j de la demanda i en el mes t . Modelo OptiGes |
| CD_i | Es el costo ficticio asociado al déficit de caudal mínimo para el tramo de río i , modelo SimGes. |
| CDC y CTC | Valores constantes e iguales a 5 y 750, respectivamente. Modelo SimGes |
| CE_{ij} : | Es el costo ficticio asociado al volumen embalsado en la zona j , para el embalse i en el modelo SimGes. |
| CK | Es el costo ficticio asociado con el déficit de la zona de demanda, por defecto igual a 7500. Modelo SimGes |
| CQ_i | Es el costo ficticio asociado al caudal que circula por el tramo de río i , en el modelo SimGes |
| CV | Es el coste ficticio asociado al vertido, por defecto $CV = 2000$, en el modelo SimGes |
| $d_{ij,t}$ | es el déficit del nivel j del caudal mínimo de la conducción i en el mes t . Modelo OptiGes |
| Di | Es el déficit con respecto al caudal mínimo declarado o con respecto a la demanda total de la zona i en el mes en cuestión. En el modelo SimGes |
| DS_{it} | Es el déficit al suministro bruto mínimo calculado por el modelo SimGes donde t corresponde a la toma e i a la demanda. |
| $K1, K2,$ $K3, y K4$ | Son constantes en los modelos SimGes y OptiGes y toman valores diferentes en cada modelo, en los manuales de los modelos se encuentran los valores recomendados. |

| | |
|------------------------|---|
| $K\alpha$ y $K\beta$, | Son constantes que proporciona el usuario para el modelo OptiGes |
| Kd | Capacidad muerta en la política de operación de Wagner <i>et al</i> (1996) |
| KD : | Es un valor constante en el modelo SimGes, por defecto igual a 2000 |
| nc | Es el número de conducciones en el esquema de OptiGes, cada una de ellas con el caudal mínimo dividido en ni niveles. |
| nd | Es el número de demandas en el esquema del modelo OptiGes, cada una de ellas con la demanda dividida en ni niveles. |
| ndc | Es el número de demandas consuntivas en el modelo SimGes |
| ne | Es el número de embalses en el esquema del modelo OptiGes. |
| $nemb$: | Número de embalses en el modelo SimGes |
| ni | Es el número de niveles en que se divide el caudal mínimo de la conducción i , modelo OptiGes. |
| ni' | Es el número de niveles en que se divide la demanda i , modelo OptiGes. |
| NP_i | Es el número de prioridad asignado al embalse i ó al caudal mínimo en el tramo de río i , en el modelo SimGes |
| NP_{it} | Es el número de prioridad de la toma t de la demanda i , modelo SimGes |
| nto_i | Es el número de tomas de la demanda i en el modelo SimGes |
| $ntr1$ | Número de tramos de río tipo 1 en el modelo SimGes |
| pi | son las prioridades asignadas a cada caudal ecológico, en OptiGes |
| pi' y pi'' | Son las prioridades asignadas a cada demanda y cada embalse, respectivamente, en el modelo OptiGes . |
| P_i : | Son los vertidos o derrames del embalse i en el modelo SimGes |
| Q_i : | Es el caudal que circula por el tramo de río i . |
| RA | Extracción en la política de operación presentada por Wagner <i>et al</i> (1996) |
| $S_{1,t}$ | Almacenamiento en la presa, política de operación de Wagner <i>et al</i> (1996) |
| S_{it} | Es el suministro bruto a la toma t de la demanda i |
| T_E | Término que integra a los embalses del sistema en la suma a minimizar en SimGes. |
| T_{R1} a T_{R5} | Términos que involucran los tramos de ríos en la suma a minimizar por el modelo SimGes |
| T_{DC} | Término de demandas consuntivas en la suma a minimizar por el modelo SimGes |
| T_{DN} | Términos de demandas no consuntivas utilizados en la suma a minimizar por el modelo SimGes |
| T_{RA} | Términos de recargas artificiales utilizados en la suma a minimizar por SimGes |
| T_{BA} | Términos de bombeos adicionales utilizados en el modelo SimGes |
| V_{ij} : | Volumen al final de mes en cada zona j , para el embalse i en el modelo SimGes. |

Siglas y abreviaciones

| | |
|-----------|---|
| ALM | Presa Adolfo López Mateos |
| ANN | red neuronal artificial |
| AR1 | modelo autorregresivos de orden 1 |
| AR2 | modelo autorregresivos de orden 2 |
| ARMA | modelo autorregresivo de media móvil |
| C | Capacidad de almacenamiento de un embalse |
| CNA | Comisión Nacional del Agua, organismo encargado de la administración del agua en México |
| D | Demanda |
| DR | Distrito de riego |
| DV típica | Desviación típica |
| EB | Presas Eustaquio Buelna |
| IMTA | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua |
| GWP | Asociación mundial del agua |
| GIR | Gestión Integral de recursos hídricos |
| G | Garantía |
| JLP | Presas José López Portillo |
| HM | Hidrogramas mezclados o método de Svanidze modificado |
| MLP | Red perceptron multicapa es un tipo de red neuronal |
| RO | Regla de operación |
| RRMSD | Raíz de la desviación media cuadrada relativa |
| SRH | Sistema de recursos hídricos |
| SLCHM | San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocerito |
| Vol_minG | Volumen mínimo garantizado |
| TAC | Comité asesor técnico |

Introducción

El agua como recurso finito e indispensable para la supervivencia de la humanidad y el desarrollo de las civilizaciones, ha sido, es y será objeto de múltiples estudios. La variabilidad espacial y temporal, así como el incremento constante de su demanda ha provocado el interés de especialistas en ingeniería de recursos hídricos y ramas afines que colaboran de forma conjunta para mejorar el aprovechamiento de este bien a nivel global.

La necesidad de tomar decisiones y acciones de naturaleza integral, multidisciplinaria y participativa en materia del agua, dio origen al paradigma de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, GIRH, el cual ha sido adoptado en todos los encuentros y congresos sobre el agua en los últimos años, particularmente a partir de las conferencias internacionales llevadas a cabo en 1992, sobre agua y medio ambiente en Dublín y Río de Janeiro.

La Asociación Mundial para el Agua, GWP, en un intento de unificar perspectivas sobre el manejo del agua establece como definición para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, la siguiente: “es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”. (GWP y TAC¹, 2000)

¹ Technical Advisory committee

Un instrumento fundamental para la gestión integral del recurso hídrico es la Planificación hidrológica, ya que a nivel operacional ayuda a traducir los principios de la GIRH en acciones concretas. Estas acciones concretas se refieren, por ejemplo; al desarrollo de estrategias y sistemas de abastecimiento de agua organizados que permitan satisfacer las necesidades básicas de la población, garantizar su seguridad y la de sus propiedades, así como, generar las condiciones para mejorar y mantener el nivel de vida de los ciudadanos. Además en los últimos años se ha puesto énfasis en la protección al medio ambiente al desarrollar dichas estrategias.

Entre las estrategias de los sistemas de abastecimiento organizados se encuentran las reglas de operación o explotación de embalses o de sistemas de recursos hídricos que contemplen más de un embalse y/o acuíferos. Para desarrollar y analizar las reglas de gestión de un sistema de recursos hídricos complejo, es necesario contar con un modelo que puede ser definido como una concepción del mismo sistema, en el que se preserven las características esenciales para el fin que interesa, es decir, un modelo que sirva para diseñar o evaluar una regla de gestión.

Hasta ahora 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. Maass *et al* (1962), Loucks *et al* (1981), Wai-See Moy *et al* (1986), Jhih-Shyang Shih y Charles Revelle (1994), Sánchez Quispe, (1999) y J. T. Shiau y H. C. Lee (2005) 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.

Hay que destacar que el objetivo de las reglas de gestión es obtener un mejor aprovechamiento de los recursos de una cuenca o sistema de cuencas, tratando de mitigar los efectos adversos de las sequías hidrológicas y de las crecidas que inevitablemente se presentan en dichos sistemas, debido a su naturaleza variable a través del tiempo y del espacio.

Además, considerando que los principales usuarios del agua a nivel mundial son el riego agrícola, la industria, los usos domésticos y la generación de energía (UN, 1997), y que de ellos, el más importante es la agricultura con un 70% aproximadamente (Chaturvedi M.C., 2000; Niemczynowicz, J. 2000), se hace evidente la necesidad de desarrollar herramientas para administrar mejor los recursos hídricos, interviniendo en aquellos rubros que representan una demanda mayor. Por tal motivo, el presente trabajo está enfocado al análisis y generación de reglas de operación con restricciones a las demandas de uso agrícola, es decir, se evaluarán las reglas obtenidas con periodos en los que el sistema de explotación no

sea capaz de suministrar en su totalidad la demanda del mismo. Puesto que las pérdidas económicas por déficit no son lineales como ya lo mencionan desde 1962, Bower T. B. *et al*, resulta preferible tener varios déficit pequeños que uno grande.

Cabe destacar, que la determinación y análisis de estas reglas en sistemas de recursos hídricos complejos, son posibles gracias a la evolución de herramientas y sistemas informáticos, tales como, los modelos de optimización y gestión debido a que facilitan obtener procedimientos para el mejor aprovechamiento de un sistema de recursos hídricos.

Uno de los problemas a los que se enfrenta la optimización, simulación y evaluación de las reglas de operación, es la determinación de las series de caudales con los que se diseñarán dichas reglas. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos la longitud del registro histórico de caudales es muy corta y aún cuando ésta no lo fuera, las reglas de gestión se diseñan para operar en tiempo real y para plantear posibles escenarios futuros, por lo que el registro histórico no es suficiente.

Debido a lo anterior, y dado que hoy en día no existen sistemas de pronóstico a largo plazo y tampoco es posible pronosticar una sequía; es necesario recurrir a la generación estocástica de series sintéticas de caudales. En este trabajo, se analizan distintos métodos de generación de series temporales, con el fin de obtener un modelo de generación que reproduzca además de los estadísticos históricos de las series, los estadísticos de sequía.

Una vez que se ha definido una regla de gestión, ésta se analiza utilizando un modelo de simulación, con el fin de evaluar el comportamiento del sistema de recursos hídricos ante diversos escenarios planteados. En la presente tesis, las políticas de operación se validaron utilizando un grupo de series sintéticas de longitud igual a la histórica y otro de sequías que cumplen con las características representativas de la serie histórica. Los procesos llevados a cabo en la realización de este trabajo se integran en una metodología, que permite generar reglas de gestión anticipada de sequías y evaluar la fiabilidad de las mismas.

Motivación

En México la situación de disponibilidad de agua es preocupante; puesto que el 67% de la lluvia se presenta en tan sólo 4 meses, dos terceras partes del territorio son áridas y semiáridas, y en ellas se concentra la mayor parte de la población y actividad económica. Esto se traduce en que el 77% de la población vive en lugares donde se genera sólo el 28% del escurrimiento natural. Por otra parte, la presencia periódica de huracanes y sequías provoca severos daños en amplias y diversas

zonas del territorio mexicano, si a esto se le suma la continua contaminación que están sufriendo varios ríos y acuíferos debido a los patrones de consumo actuales de los distintos usuarios, las zonas de escasez se incrementan y las fuentes de abastecimiento no llegan a ser suficientes por lo que las demandas sufren restricciones. Así que, además de las acciones que actualmente se estén tomando, se debe seguir en la búsqueda de crear soluciones para mejorar el aprovechamiento y asegurar las demandas de las nuevas generaciones de usuarios.

En ese sentido se ha seleccionado como caso de estudio el sistema “San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocorito”, el cual abastece a uno de los distritos de riego más importantes de México por su extensión y productividad. El sistema está formado de cuatro embalses y tres acuíferos que sirven para abastecer la demanda de tres distritos de riego, que en su totalidad comprenden una área de 325,850 ha, con un volumen total concesionado de 3,185.28 hm³, del cual 2945.10 hm³ provienen de las aguas superficiales (CNA-IMTA, 2000) y corresponde al 92.45 por ciento, cifra que remarca la importancia de hacer un uso eficiente de las aguas superficiales del sistema.

Este sistema ha sido objeto de varios estudios, entre ellos: “el Modelo dinámico de la cuenca del Río Culiacán” (Villalobos A. *et al* 2004), llevado a cabo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. A partir de éste se desarrolló “Análisis del Sistema Culiacán-Humaya-Mocorito, utilizando la plataforma de simulación STELLA RESEARCH y SimGes” (García A., 2005). Esté último sirvió para familiarizarse con algunas de las herramientas desarrolladas por el grupo de recursos hídricos de la Universidad Politécnica de Valencia, aprovechar sus bondades, así como identificar algunos de los procesos mejorables con el fin de integrarlos en una metodología para el diseño y análisis de una regla de gestión con restricciones para mitigar los efectos de las sequías hidrológicas.

Objetivos

El objetivo principal de la tesis es: desarrollar una metodología útil y práctica para el diseño de las reglas de gestión de cuencas, con restricción a la demanda de forma anticipada, para ello es necesario plantear varios objetivos particulares, a saber:

- Analizar las metodologías en cuanto a la generación de series sintéticas para desarrollar un modelo adecuado al caso de estudio.
- Generar series sintéticas de longitud igual al registro histórico que reproduzcan además de los estadísticos básicos, los estadísticos de sequía y

con ello obtener varias sequías de diferentes duraciones, intensidades y magnitudes.

- Obtener reglas de gestión que además de minimizar el déficit acumulado, permitan que éste sea repartido en pequeños déficit durante el ciclo agrícola, de tal manera que se garantice su abastecimiento en todo el periodo, al establecer al inicio del ciclo el volumen a entregar.
- Incluir como criterio de decisión para aplicar una reducción de la “oferta” de agua para agricultura, no sólo el volumen almacenado al inicio del ciclo agrícola, sino además, el volumen de aportaciones antecedentes o aportaciones probables durante el periodo a analizar para definir la regla de operación.
- Validar las reglas de gestión obtenidas, usando las series sintéticas generadas, en especial, verificar su aplicabilidad, con las sequías sintéticas y determinar, si es posible, el periodo de anticipación para aplicar una restricción.

En virtud de que con las herramientas disponibles hasta ahora, no se puede predecir de manera fiable, la cantidad ni la distribución temporal de las aportaciones a un sistema de recursos hídricos a largo plazo (periodos mayores a 6 meses), y en esas circunstancias si hoy empezara una sequía, habría que preguntarse ¿hasta que punto estaría el sistema preparado para afrontarla?, ¿Cuál sería el periodo de anticipación para aplicar una restricción a un sistema de recursos hídricos ante una sequía?. Estas son algunas de las cuestiones que se quieren contestar a través del logro de los objetivos anteriores. Para ello se ha estructurado el trabajo de la siguiente manera:

Organización de la tesis

La tesis consta además de la introducción y las conclusiones de 4 capítulos y un anexo, los cuales se mencionan a continuación:

1) Denominado “Estado del Arte” es el resultado de una revisión de los trabajos realizados en relación con los métodos de análisis de sistemas de recursos hídricos, la generación de series sintéticas de caudales a través de modelos estocásticos, señalando las formulaciones a las que recurren tres modelos desarrollados previamente. Estos modelos son: los autorregresivos, por ser una de las herramientas más utilizadas en este tipo de análisis, un modelo que utiliza redes neuronales para la generación, por ser una de las herramientas que están a la

vanguardia en este tipo de análisis y el método de Svanidze modificado, por la utilidad que puede tener para este tipo de análisis. Finalmente se hace una revisión de los trabajos acerca de la obtención de reglas de operación de sistemas de recursos hídricos, prestando especial énfasis en aquellos trabajos que consideran una restricción a la demanda.

2) “Generación y análisis de series temporales”. Este capítulo se enfoca a las características que deben analizarse tanto en la serie histórica de aportaciones como en las sintéticas. Se presentan los estimadores de los estadísticos que deben revisarse para caracterizar las series, de tal manera que puedan utilizarse tanto en la generación como en la evaluación de las políticas de operación. Para el caso en el que se utilice más de un modelo de generación de series se dan pautas a seguir para seleccionar el modelo.

3) “Políticas de operación con restricción a la demanda”. Se describen los procedimientos necesarios para formular una regla de operación de sistemas de recursos hídricos que además de maximizar los volúmenes de suministro agrícola minimice el impacto de los déficits que se presenten debido a la presencia prolongada de periodos de baja disponibilidad hídrica. Para llevar a cabo el procedimiento propuesto es necesario el uso de modelos de generación de series sintéticas, técnicas de identificación y caracterización de sequías y modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos. La integración de estos modelos dentro de los pasos que se describen en este capítulo, da lugar a reglas de operación prácticas y fáciles de asimilar por los distintos grupos de usuarios que intervienen en la toma de decisiones del sistema de recursos hídricos, ya que a través de indicadores como el volumen almacenado o volumen almacenado más una aportación, permiten establecer la necesidad o no de una restricción.

4) “Integración de la metodología. Aplicación al caso de estudio”. En este apartado se presentan los resultados al emplear las metodologías planteadas en los apartados 2 y 3 al sistema “San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito”, localizado al noroeste de México. Para ello se recurrió a las herramientas que se describen en el anexo, “Herramientas informáticas utilizadas”. Se presentan resultados numéricos en los que se destaca la importancia de una adecuada operación de un sistema de recursos hídricos, pues para iguales condiciones iniciales y de aportaciones, si se varía la forma de operar el sistema, se puede reducir significativamente el número de veces en las que se presentan déficit catastróficos, es decir, el número de meses en los que se dejaría de entregar más de un 50 por ciento de un volumen asignado a una demanda agrícola al inicio de la temporada. Además partiendo de un volumen inicial puede determinarse la probabilidad de que sea necesario aplicar una restricción si se presentaran sequías de diferentes intervalos de magnitud.

A) Anexo “Herramientas informáticas utilizadas”. En este apartado se describen brevemente las herramientas utilizadas en la implementación de la metodología, entre ellas se encuentran modelos de generación de series sintéticas como son: el modelo MASHWIN, el modelo SeReNa, y los modelos de análisis de sistemas de recursos hídricos: OptiGes, SimGes y Sismapre.

Finalmente, cabe destacar que para llevar a cabo esta investigación fue necesaria la integración, en la aplicación de la metodología, de varios modelos, que por si solos han sido objeto de tesis doctorales, en el ámbito de la ingeniería de recursos hídricos. En esta investigación se logra conjuntar los esfuerzos de varios investigadores en esa búsqueda de mejores soluciones al manejo de los sistemas de recursos hídricos.

1 Estado del arte

En este apartado se revisan brevemente varios de los enfoques para el análisis de los sistemas de recursos hídricos, se mencionan algunas de las aportaciones en la línea de la hidrología operacional y se presentan las formulaciones de los métodos de generación de series que se utilizaron para la realización de esta tesis; finalmente, se hace una revisión de los trabajos sobre políticas de operación, prestando especial interés a aquellas que contemplan una restricción a la demanda en épocas de baja disponibilidad hídrica, debido a que son parte esencial del trabajo que se presenta.

1.1 Métodos de análisis de los sistemas de recursos hídricos

Existen varias revisiones de los modelos y métodos de análisis para el manejo de los sistemas de recursos hídricos; entre ellas destacan las realizadas por Yeh, W. (1985) y Labadie, J. W. (2004). En esta tesis se hace una breve descripción de los trabajos realizados para el análisis de los sistemas de recursos hídricos, sin llegar a profundizar en los procedimientos matemáticos, ya que no forman parte de los objetivos de la misma. Se pondrá especial interés en la evolución de los métodos de optimización que utilizan la programación lineal y sus variaciones, ya que las aplicaciones que se emplean en esta tesis hacen uso de este método de resolución.

El empleo de las técnicas de optimización en el área los sistemas de recursos hídricos complejos empieza a partir de la década de 1950, puesto que el análisis de los sistemas de cuencas es un ejemplo de los problemas que por su diversidad y

complejidad es necesario resolver a través de la simulación con el uso de las computadoras, (Manzer *et al.*, 1962).

1.1.1 Programación lineal

La aplicación de la programación lineal al manejo de los recursos hídricos se extiende desde problemas sencillos hasta la definición de la asignación del agua en sistemas complicados. Se utiliza en problemas de optimización en los que la función objetivo es una función lineal de las incógnitas y las restricciones son igualdades y desigualdades lineales (Andreu, J., 1992).

En 1953, el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de Norte América, inició sus experimentos de simulación de los embalses que se localizaban en la corriente principal del río Missouri. Simularon la operación de seis embalses para maximizar la generación eléctrica, respetando restricciones de navegación, control de avenidas y abastecimiento a riego; para ello utilizaron técnicas de cálculo diferencial y programación lineal. (Maass *et al*, 1962)

En 1962 Dorfman (citado por Yeh, 1985) demostró como se podía aplicar la programación lineal a 3 tipos de problemas. El primero y más sencillo no consideraba una regulación mayor a un año, en este caso cada año se consideraba como los otros, donde en todo el periodo por analizar sólo se tenía en cuenta el promedio de aportaciones de dos estaciones del año (seca y húmeda). El segundo, consideraba analizar periodos críticos en los que se podía necesitar de una regulación plurianual. Finalmente, en el tercer caso llegó a considerar aportaciones estocásticas.

En 1967, Meier y Beighthler propusieron una técnica para descomponer sistemas de embalses en paralelo, pero no llegaron a considerar asignación temporal sobre estaciones (Yeh W., 1985).

En 1966, Parikh introduce la idea de tomar en cuenta la descomposición espacial usando programación dinámica en los subsistemas bajo un conjunto de costos iniciales, para que las extracciones en un tiempo se asignaran espacialmente usando programación lineal, de tal manera, que estos valores se asignaran a los costes iniciales de los subsistemas. En 1970 Roefs y Bodin, sugieren una ampliación de esta metodología a la descomposición en el tiempo, pero tuvieron problemas computacionales al aplicarla a sistemas de 3 embalses.

Por otra parte, en 1967, Roefs y Bodin desarrollaron una técnica en la que combinan programación lineal y dinámica para la optimización de una cuenca de múltiples

embalses, el problema principal lo subdividieron y aplicaron programación dinámica a cada parte. Pero la programación de sueltas y producción de energía se resolvió con programación lineal.

En 1973, Windsor desarrolló una metodología empleando programación lineal recursiva para un sistema de control de avenidas. En este caso la resolución de la función objetivo se sincronizaba con las extracciones para minimizar el coste total de daños (citados por Yeh, W. 1985).

Para 1974 Becker y Yeh, también sugieren una metodología combinando programación lineal y dinámica para determinar la operación óptima, en tiempo real, del proyecto del valle central de California. En ella incorporan un grupo de restricciones a la función objetivo y con programación lineal minimizan la pérdida en energía potencial del agua embalsada que es resultado de una política en cada periodo. De tal manera, que el resultado de la programación lineal se usa en la optimización determinista un paso adelante de la programación dinámica de los múltiples periodos (citados por Yeh, W. 1985).

En ese mismo año, Takeuchi y Moreau combinan programación lineal con programación dinámica estocástica, en su modelo la función objetivo consta de dos partes. La pérdida económica inmediata dentro del mes y el valor esperado de los niveles finales del almacenamiento en los embalses. Esta función se estimaba al unir la programación lineal con un problema de programación dinámica estocástica (citados por Yeh, W. 1985).

Dagli y Miles en 1980, propusieron una solución a un problema de cuatro embalses en serie. En la función objetivo que formularon se planteaba maximizar la carga hidráulica total del sistema. Dado que la carga hidráulica es función del volumen de agua almacenado en cada embalse, entonces, la función objetivo y algunas restricciones tenían que ser linealizadas. El problema lineal se resolvió utilizando pronósticos de eventos futuros, que eran actualizado regularmente para tomar en cuenta la última información disponible (citados por Yeh W, 1985).

En 1989, Domínguez desarrolla una metodología en la que se restringen las probabilidades de que se presente una condición no deseada, como pueden ser déficit o derrames al resolver un problema con programación lineal, que tome en cuenta factores como la elasticidad de la demanda o déficit permitidos (citado por Arganis 2004).

1.1.1.1 Programación lineal estocástica

Cuando se toma en cuenta la incertidumbre de algunas variables como las entradas a un sistema, el proceso pasa de ser determinístico a estocástico.

En 1962, Manne demostró la aplicación de la programación lineal a un proceso de Markov, en un problema hipotético de un embalse para la operación, conocido un estado inicial de almacenamiento. Thomas y Watermeyer en ese mismo año ampliaron el trabajo de Manne, al tomar en cuenta además del almacenamiento, la aportación.

En 1968, Loucks desarrolló un modelo para un embalse sujeto a entradas netas aleatorias, correlacionadas. Las entradas netas para cada periodo se describían como una cadena de Markov de primer orden y las probabilidades de transición de las aportaciones se estimaron de los registros históricos, Loucks también señaló en ese año el problema de dimensionalidad que podían tener ese tipo de problemas en situaciones reales.

Houck y Cohon en 1978, asumieron la estructura de una cadena de Markov para las aportaciones y utilizaron la programación lineal secuencial para aproximarla a una solución no lineal en el diseño y política de operación de un sistema de embalses multipropósito (citados por Yeh W, 1985).

Hiew y otros en 1989, aplicaron la optimización estocástica implícita utilizando programación lineal al proyecto del octavo embalse de Gran Thomson en el norte del Colorado, usaron un registro histórico de 30 años de aportaciones mensuales y se aplicó regresión múltiple a los resultados del modelo de programación lineal para producir curvas guía de almacenamiento en un paso de tiempo adelante (citados por Yeh W, 1985).

En 1993 Crawley y Dandy, aplicaron programación separable al sistema de abastecimiento de múltiples embalses del sistema de abastecimiento metropolitano de Adelaida en Australia.

1.1.1.2 Redes de flujo

Se utilizan para el análisis de los sistemas de recursos hídricos ya que estos pueden ser representados de forma esquemática a través de una red de flujo, el problema a resolver es un caso especial de la programación lineal, en el que se puede asociar un coste al transporte de un flujo de un punto a otro. Este tipo de problemas puede resolverse con programación lineal, sin embargo, existe un algoritmo mucho más

eficiente denominado “out of kilter” (Bazaraa, Jarvis, 1977. Citado por Andreu, J. 1992).

Estudios comparativos hechos por Kuczera en 1993 y Ardekaaniaan y Moin en 1995, demostraron que el algoritmo de ascendencia de coordenadas doble, denominado RELAX, es más eficiente que el “out of kilter” (Labadie J. W., 2004).

1.1.2 Modelos de optimización multiobjetivo

Los problemas de optimización multiobjetivo constan de dos etapas; una que consiste en determinar un conjunto de soluciones no dominadas y otra, en determinar la solución única; esta última puede hacerse mediante la información previa de las preferencias del encargado de tomar decisiones.

Cohon y Marks (1975) y Goicoechea *et al* (1982) (citados por Andreu, J. 1992), clasificaron a las técnicas multiobjetivo en tres grupos, basados en sus posibilidades de utilización para ayudar al proceso de decisión, que son: a) técnicas para generación del conjunto de soluciones no dominadas; b) métodos continuos con una articulación o preferencias previas; c) métodos discretos con una articulación o preferencias progresivas.

1.1.2.1 Soluciones no dominadas

Los métodos más populares para la generación de soluciones no dominadas incluyen: 1) el método de los factores de peso, 2) el método de la restricción ϵ y 3) la programación lineal multiobjetivo (Ko *et al*, 1992).

1) El método de los factores de peso, propuesto originalmente por Zadeh (1963) asigna un factor de peso, según su importancia relativa, a cada función objetivo en una estructura aditiva que transforma el problema multiobjetivo original en un problema de un solo objetivo. Las soluciones sin dominio se generan al variar paramétricamente a los factores de peso y resolviendo los problemas de un objetivo. Este método se puede aplicar en problemas dinámicos y funciones objetivo no lineales; se recomienda para problemas que tengan como mucho tres objetivos.

2) El método de la restricción ϵ selecciona una función objetivo como el objetivo primario, y a los objetivos restantes se les incluye en el conjunto de restricciones que tienen sus niveles por alcanzar de tipo variable (Marglin, 1967).

3) Para problemas lineales o linealizables, se pueden aplicar algoritmos simplex especializados que pueden aplicarse al caso multiobjetivo para identificar los puntos

extremos de la superficie de la solución sin dominio. Estas soluciones se generan moviéndose entre puntos extremos adyacentes. La desventaja obvia de estos métodos es el requerimiento de la linealidad, pero no son muy adecuados a problemas dinámicos y de múltiples etapas.

1.1.2.2 Determinación de una solución única

Existen varios procedimientos que requieren una manifestación previa por parte del encargado de tomar decisiones, entre los que destacan: 1) la programación de metas, 2) la determinación de la función de utilidad 3) la estimación de pesos óptimos, 4) el método Electre y 5) el Método de los valores substitutivos de intercambio. Asimismo, procedimientos que confían en una manifestación progresiva de las preferencias del encargado de la toma de decisiones: 1) método paso a paso, 2) método de ponderación iterativo y 3) solución secuencial (Andreu, J., 1992).

1.1.3 Métodos heurísticos

Son métodos basados en reglas de azar, experiencia del modelador y analogías aplicadas a otros problemas. A diferencia de los algoritmos de optimización, los programas heurísticos no garantizan siquiera llegar a soluciones óptimas (Labadie, J.W., 2004). En este grupo se encuentran los algoritmos genéticos y las redes neuronales.

1.1.3.1 Algoritmos genéticos

Esta técnica se basa en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven, al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Un algoritmo genético produce grupos o poblaciones de soluciones cuyos descendientes muestran un incremento en el nivel de ajuste a una función, por ejemplo la función objetivo. Una desventaja de un algoritmo genético es la dificultad de tomar en cuenta restricciones de manera explícita, particularmente restricciones de desigualdad y mantener alternativas posibles en la solución (Labadie, J.W., 2004). Las restricciones se toman generalmente a través del uso de términos de penalización en la función objetivo. Labadie también menciona que estos métodos dan solución a problemas específicos. Existen varios trabajos que utilizan esta herramienta, para el análisis de sistemas de recursos hídricos, como son los de: Ilich (2001), Otero *et al* (1995), Sharif y Wardlaw (2000), Cai *et al* (2001), entre otros.

1.1.3.2 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales, ANNs por sus siglas en inglés, no se consideran como una técnica de optimización por sí mismas, pero son una herramienta alternativa de la optimización estocástica implícita, para el análisis de regresión múltiple, al determinar reglas de operación óptimas (Labadie, J.W., 2004).

Una red neuronal artificial (ANN) es un sistema de computación conformado por elementos simples, denominados neuronas o nodos, interconectados masivamente en paralelo y con organización jerárquica, que procesan información por medio de su estado dinámico, como respuesta a entradas externas (Hecht-Nielsen, 1988; Kohonen, 1988). Entre las principales ventajas que presentan las ANNs, pueden destacarse las siguientes: 1) Tienen capacidad de reconocer relaciones entre variables de entrada y salida, sin necesidad de explicitarles las leyes físicas que rigen su comportamiento (Tang *et al.*, 1991; Maier y Dandy, 2000; Salas *et al.*, 2000). 2) Se adaptan a nuevos escenarios y circunstancias de las variables modeladas, razón por la cual se las denomina adaptativas (Hilera y Martínez, 1995) y 3) Presentan un buen comportamiento, incluso en casos en que los datos tienen un cierto nivel de ruido o errores de medida (Stern, 1996; ASCE, 2000a).

Lachtermacher y Fuller, (1994) y Haykin, (1999) mencionan como desventajas de las redes neuronales las siguientes:

1. La ausencia de un esquema general y estricto que permita en cada problema establecer de forma directa la topología óptima de la ANN, el algoritmo de entrenamiento y el criterio de parada, es decir, el momento en que el entrenamiento debe detenerse y
2. La falta de base física de las relaciones matemáticas y de los pesos de la red.

Raman and Chandramouli (1996, citados por Labadie 2004) usaron ANNs para inferir reglas de operación óptimas condicionadas a un estado inicial de almacenamiento, demandas y entradas. En 2001 ampliaron su estudio a sistemas multiembalse.

Ochoa (2002) desarrolló un modelo estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión de sequías y señaló que con el modelo desarrollado basta una sola red para realizar generación multivariada, pero también que hace falta un mecanismo que conduzca a la topología óptima de forma directa, así que es necesario recurrir al mecanismo de prueba y error.

1.1.4 Simulación

La simulación es una técnica que permite conocer el comportamiento de un sistema de recursos hídricos, representado a través de un modelo, para un conjunto de condiciones específicas (Maass *et al*, 1962; Beard, 1972, Simonovic, 2000). Esta técnica permite dar respuesta a preguntas del tipo: ¿Qué pasaría si ...?, a través del establecimiento de múltiples escenarios. Así pues, la simulación ayuda a planificar la expansión de los sistemas de recursos hídricos y a determinar su gestión más conveniente, previendo posibles impactos de cualquier plan o política de operación. López (1993) y Loucks (2000).

Los modelos de simulación pueden clasificarse como específicos o de propósito general, dependiendo de la capacidad para ser aplicados a un sistema de recursos hídricos. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de modelos particulares, los modelos genéricos se comentarán en el siguiente apartado.

Antes de la introducción de la computadora IBM 650 en 1954, no había trabajos sobre simulaciones de grandes desarrollos de cuencas en computadoras y quizá el primero fue la simulación del plan del valle del Nilo en 1955 realizada por Morrice y Allan, este trabajo involucró el análisis de 17 embalses y la simulación de su comportamiento en un periodo de 48 años, el objetivo fue maximizar el volumen de agua para riego a partir de la combinación de los embalses. (H.A.W. Morrice and W.N. Allan, 1959, citado por Manzer, D. y Barnett, M., 1962).

Thomas y Fiering (1962) sugirieron la simulación de flujos sintéticos para mejorar la confiabilidad de los modelos. Cuatro años más tarde, Hufshmidt y Fiering (1966) proponen su uso en la planificación del sistema multipropósito del río Lehigh. En su estudio plantearon 35 alternativas y de ella se llegó a tres diseños que presentaban mejores resultados.

El modelo CRSS- Colorado River Simulation System se empezó a implementar en la década de los años 60, para simular la operación de los principales embalses del río colorado, con fines de abastecimiento, generación de energía eléctrica y regulación. Este modelo trabaja a escala mensual. (Schuster, 1987, citado por Ochoa 2002)

En 1974 empezó a construirse el modelo Tennessee Valley Authority, este modelo está orientado a la planificación y gestión de recursos a nivel semanal y diario, los principales objetivos de este sistema son: la navegación, la generación de energía y el control de avenidas (Shelton, 1979; citado por Ochoa 2002)

En 2001 se desarrolló el “Modelo dinámico de la cuenca del Río Culiacán”. Éste es un modelo de simulación que se desarrolló utilizando el software *Stella Research* e integra los recursos superficiales y subterráneos para abastecer las demandas agrícolas, urbanas e industriales. Las demandas urbanas e industriales se consideran variables, para ello se toman en cuenta las tasas de crecimiento previstas, según el plan de desarrollo de la región. Como entradas a las presas se usaron distribuciones de probabilidad de excedencia de los caudales mensuales históricos, con el fin de evaluar distintos escenarios de disponibilidad del recurso a futuro. (Villalobos *et al*, 2004).

1.1.5 Modelos informáticos generales para el análisis de los sistemas de recursos hídricos

Los programas que a continuación se presentan son o forman parte de herramientas potentes como los Sistemas Soporte de Decisión, que muchas veces comprenden varios módulos y sirven de gran ayuda para los tomadores de decisiones, puesto que le proporcionan al gestor datos relevantes en presentaciones que son fáciles de asimilar. Pero cabe destacar, que el tomador de decisiones debe conocer las cualidades y debilidades de cada uno de ellos, debido a que sólo son herramientas, que como su nombre lo indica, ayudan a la toma de decisiones.

1.1.5.1 Modelos de simulación

ARSP (Acres Reservoir Simulation Package) es un modelo de simulación general para sistemas de varias presas multipropósito. Utiliza una red de flujo para representar el sistema de recursos hídricos y funciona bajo la premisa de que se puede obtener la estrategia de operación óptima para una política de operación preestablecida, dados el estado inicial y estimaciones de las entradas del sistema (Sigvaldason, 1976, citado por Villalobos, 2003).

HEC-5 (Hydrologic Engineering Center - 5) es uno de los modelos más utilizados, fue diseñado para simular la operación secuencial utilizando una red formada por la interconexión de ríos y presas, con base en las demandas y restricciones proyectadas. En la simulación se puede utilizar cualquier intervalo de tiempo desde un minuto hasta un mes, además se pueden utilizar múltiples intervalos en una sola simulación. La operación de las presas puede ser simulada con diferentes objetivos: minimizar las inundaciones aguas abajo, evacuar el almacenamiento de la zona de control de avenidas tan pronto como sea posible, proporcionar gastos ecológicos y de recreación y, alcanzar los requerimientos de producción de energía, <http://www.hec.usace.army.mil/software/legacysoftware/hec5/documents/hec5user.pdf> (consultada el 8 de noviembre de 2007)

Mike BASIN es una herramienta que integra los recursos superficiales y subterráneos, así como la modelación de la calidad del agua. El concepto matemático de *Mike Basin* es encontrar una solución estacionaria para cada paso de tiempo, puede ser utilizado para encontrar valores “típicos” para la cantidad y la calidad del agua con cambios lentos (ciclos estacionales) de un sistema de recursos hídricos. Para resolver el problema de distribución del agua utiliza dos tipos de reglas de prioridad, local y global. Las reglas de prioridad locales implican que el problema de asignación siempre será resuelto para los nodos vecinos que estén conectados directamente. La prioridad global es implementada por una serie de reglas, se pueden definir diferentes tipos de reglas. Éstas afectan como mínimo al nodo en cuestión y de ser posible un segundo nodo, el punto de extracción del primero. Múltiples reglas pueden ser asociadas con un solo usuario, no necesariamente con un rango consecutivo de prioridades. Las reglas de operación son curvas de reserva introducidas por el usuario. (Villalobos 2003)

RIBASIM (River BASin SIMulation) permite evaluar aspectos relacionados con la operación de la infraestructura y manejo de la demanda. Puede también generar patrones de flujo, los cuales proporcionan las bases para análisis detallados de calidad del agua y sedimentación en tramos de ríos y presas. *RIBASIM* forma parte del Sistema Soporte de Decisión Delft, el cual integra una serie de herramientas hidrológicas. <http://www.wldelft.nl/soft/ribasim/> (consultada el 30 de mayo de 2007). Admite la integración de reglas de gestión con restricción. El paso de tiempo es mensual.

MODSIM es un programa desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado, que se basa en un algoritmo de solución de grafos basado en programación lineal (out-of-kilter). Las reglas de operación se introducen en forma de curvas, pudiendo definir hasta tres diferentes períodos (seco, medio y húmedo) en función de los volúmenes almacenados y de las aportaciones. Incorpora un procedimiento de entrada interactiva de datos y produce gráficos (USBR, 2000).

SimWin es un módulo de simulación detallado de la gestión de un sistema de recursos hídricos (cuenca o subcuenca), con paso de tiempo mensual. El usuario define los elementos que componen el sistema a representar, la vinculación de los elementos, las características de cada elemento y sus reglas de operación. Los elementos que admite el módulo son: nudos con o sin almacenamiento, conducciones de distinto tipo, centrales hidroeléctricas, demandas, acuíferos, aportaciones, indicadores de alarma, etc. El sistema optimiza mes a mes las decisiones, representando la relación entre el agua superficial y el agua subterránea (uso conjunto). En el anexo se describe más ampliamente este programa, ya que fue una herramienta para la realización de esta tesis y el manual del usuario se puede

consultar en la siguiente dirección: www.upv.es/aquatool (consultada el 30 de mayo de 2007).

1.1.5.2 Modelos de optimización

Los modelos de optimización se basan en concepciones más simplificadas del sistema, que los modelos de simulación, debido a la complejidad que representaría tomar en cuenta todas las variables que intervienen en un problema de optimización de un sistema de recursos hídricos, puesto que el costo computacional de los algoritmos de solución de dichos modelos es muy alto, a causa de que el número de variables aumenta exponencialmente al incrementar el periodo de análisis. Algunas de estas simplificaciones consisten, por ejemplo; en no poder considerar un esquema que tome en cuenta el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, esta situación no es exclusiva de los modelos de optimización, también existen algunos modelos de simulación que no incluyen el uso conjunto. Por otra parte, generalmente los modelos de optimización genéricos no permiten hacer modificaciones a la función objetivo o a sus funciones de restricción, por lo que hay que enmarcar el problema a analizar en alguno de los modelos existentes.

AQUARIUS es un modelo de ordenador para la asignación temporal y espacial del agua de una cuenca entre usos en competencia. El modelo es manejado por un criterio de eficiencia económica, el cual consiste en reasignar los flujos de los cauces hasta que el beneficio marginal neto sea igual en todos los usos del agua. Para lograr este objetivo, el modelo examina sistemáticamente, utilizando una técnica de optimización no lineal, la factibilidad de reasignar agua no utilizada o con un ligero valor para usos alternativos. El problema de asignación del agua tiene una función objetivo no lineal. La técnica de solución utiliza el caso especial del problema general de programación no lineal, que ocurre cuando la función objetivo es reducida a una forma cuadrática y todas las restricciones son lineales. El método aproxima la función objetivo no lineal original por una forma cuadrática utilizando expansión de series de Taylor y resuelve el problema usando programación cuadrática, (Díaz y Brown, 1997).

HEC-PRM (Hydrologic Engineering Center - Prescriptive Reservoir Model) éste a diferencia de los otros modelos *HEC*, no es de libre acceso. Es un modelo de redes de flujo para examinar la operación en términos económicos de grandes sistemas de recursos hídricos. El modelo maximiza los beneficios económicos, de la asignación del agua sujeto a restricciones físicas y económicas. Incluye recursos de aguas superficiales y subterráneas, infraestructuras de almacenamiento y transporte, así como, los usos agrícola, urbano y medio ambiental. Es importante hacer notar, que no se encontró documentación completa de este modelo y solamente se pueden

encontrar breves descripciones o comentarios, en informes de algunos modelos que lo utilizan, como CALVIN.

[www.waterplan.water.ca.gov/AandE/Pages/Modeling/modelinginventory\(11.15.01\).pdf](http://www.waterplan.water.ca.gov/AandE/Pages/Modeling/modelinginventory(11.15.01).pdf). (Consultada el 15 de noviembre de 2001)

OptiWin (Andreu, 1992) es un módulo de optimización de la gestión de un sistema de recursos hídricos (cuena o subcuena), con paso de tiempo mensual. Este módulo es menos detallado que el módulo *SimWin* y no admite modelar acuíferos. A través de un grafo el usuario define el sistema y adicionalmente el intervalo de tiempo a optimizar. El programa construye una red de flujo conservativa, en la que se minimiza una función objetivo con el algoritmo *out-of-kilter*. Al igual que el *SimWin* éste se describe más ampliamente en el anexo "Herramientas informáticas utilizadas" y el manual se puede consultar en la misma página que el *SimWin*, ya que son parte del SSD, denominado *AQUATOOL*: www.upv.es/aquatool. (Consultada el 30 de mayo del 2007).

1.2 Modelos estocásticos de generación de series temporales

Una de las herramientas clave para el análisis de los sistemas de recursos hídricos y para diseño de políticas de operación, es la síntesis de caudales, pues junto con la simulación permiten analizar y evaluar el comportamiento del sistema ante diversos escenarios, por ello existen varios trabajos relacionados con el tema, muchos de los cuales han dado lugar al desarrollo de metodologías para la generación de caudales. Estas metodologías buscan inferir o reproducir el comportamiento de los ríos en cuanto a volúmenes de entrada a los embalses, o volúmenes circulantes, que formen parte del sistema de recursos hídricos por analizar.

Así pues, la hidrología operacional, rama de la hidrología en la que se enmarcan los trabajos de generación de series temporales de caudales, tiene sus inicios a principios del siglo XX, como lo anotan dos de los pilares de esta área Harold A. Thomas Jr. y Myron B Fiering (1962), haciendo referencia a los trabajos de Hazen A. (1914) y Barnes F.B. (1927), además del estudio de Fiering en 1962, otros de los trabajos referentes son: Yevjevich (1963), Box y Jenkins (1970), Fiering *et al* (1971), Salas *et al* (1980), Bras *et al* (1985), etc. Con el advenimiento de las computadoras y sistemas informáticos han aumentado el número de estudios en esta área y se han desarrollado diversos programas para la modelación de series temporales.

Dentro de la modelación de series temporales existen aquellos modelos que introducen información relacionada con los fenómenos que intervienen en el proceso, dando pie a algunos modelos de predicción, sin embargo, dada la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso y la dinámica de los sistemas de

recursos hídricos caracterizada por complejos procesos estocásticos (Borges, 1979; Wurbs, 1973 Basson y van Rooyen 2001; citados por Ochoa, 2002), los modelos de generación que se utilizan en este trabajo son modelos estocásticos, en los que no intervienen variables exógenas.

Entre los modelos de generación de series temporales se seleccionaron los autorregresivos, por ser los que más se utilizan, un modelo que utiliza redes neuronales por ser una de las herramientas que están a la vanguardia en este tipo de análisis y; el método de Svanidze Modificado, por su utilidad en este tipo de análisis. Además de que los dos primeros forman parte de las herramientas informáticas desarrolladas por el grupo de recursos de la Universidad Politécnica de Valencia.

1.2.1 Modelos autorregresivos

Existe una gran variedad de modelos estocásticos de generación de series temporales, entre ellos, los que más se utilizan son los autorregresivos y sus variantes. De éstos, los que se describen a continuación son: AR1, AR2 y el modelo condensado de desagregación espacial de Lane (1979), las formulaciones que se presentan son para el caso multivariado, ya que la mayoría de los problemas reales de modelación de series de caudales para sistemas de recursos hídricos, constan de varias estaciones de aportaciones.

1.2.1.1 Independencia temporal

Al utilizar estos modelos, uno de los primeros pasos es revisar la existencia o no de la independencia anual de los eventos, en este caso de las aportaciones, mediante la función de autocorrelación, para ello es necesario calcular el coeficiente de correlación, la ecuación 1.1 es un estimador de este coeficiente:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{X})(x_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^2} \quad (1.1)$$

Donde:

- r_k Es el coeficiente de auto correlación de desfase k
- \bar{X} Es la media de la muestra
- N Número de datos de la serie
- x_t son los datos de la serie en el tiempo t

Aderson (1941, citado por Salas *et al* 1980, pp 49), propuso los siguientes límites para determinar si existe independencia temporal de las series:

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad (1.2)$$

$$r_k(99\%) = \frac{-1 \pm 2.326\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad (1.3)$$

Para los percentiles 95 y 99 de la muestra de datos.

1.2.1.2 Prueba de normalidad

Por otra parte, hay que destacar que los modelos estocásticos están basados en hipótesis de normalidad de las series de caudales, por lo que ésta debe revisarse; para lo cual existen varias pruebas estadísticas, entre ellas la de normalidad del sesgo.

La prueba de normalidad de sesgo está basada en el hecho de que el coeficiente de sesgo en una variable normal es 0. Un estimador del coeficiente de sesgo es (Salas *et al*, 1980):

$$\hat{\gamma} = \frac{N \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^2 \right]^{3/2}} \quad (1.4)$$

Donde:

$\hat{\gamma}$ Es asintóticamente normalmente distribuido con media 0 y varianza $6/N$, si viene de una distribución normal (Snedecor y Cochran, (1967 pp 86, citado por Salas *et al* (1980), pp 93) y el límite $(1-\alpha)$ en $\hat{\gamma}$ se define como:

$$\left[-u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}}, u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}} \right] \quad (1.5)$$

$u_{1-\alpha/2}$ Es el cuantil $1 - \alpha/2$ de la distribución normal

Así que, si el coeficiente de sesgo cae dentro de estos límites se acepta la hipótesis de normalidad; esta prueba es aceptable para $N > 150$. Para muestras más pequeñas consultar Salas *et al* (1980, p 93).

Si la serie no es normal entonces se recurre a normalizarla, para lo cual existen varias funciones, entre ellas: la logaritmo normal, doble logaritmo, raíz cuadrada, exponencial; y se vuelve a revisar la hipótesis.

1.2.1.3 Autorregresivo de orden uno (AR1)

El modelo autorregresivo de orden uno, propuesto por Matalas (1967, citado por Bras *et al* 1985), es el más utilizado en hidrología y tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{Z}(t) = \Phi \mathbf{Z}(t-1) + \Theta \varepsilon(t) \quad (1.6)$$

Donde:

$\mathbf{Z}^T(t) = [Z_1(t) \dots Z_n(t)]$, el vector $\mathbf{Z}(t)$ está compuesto de n series diferentes e interdependientes con media cero y varianza 1

$\varepsilon^T(t) = [\varepsilon_1(t) \dots \varepsilon_n(t)]$, el vector $\varepsilon(t)$ consta de n ruidos blancos no correlacionados con media 0 y varianza 1.

Φ y Θ son matrices de $n \times n$ parámetros que son obtenidas por el método de momentos y el procedimiento se encuentra en Bras *et al* (1985).

$\Phi = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1}$, $\Theta = \left[1 - \left(\frac{\mathbf{M}_1}{\mathbf{M}_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_z$, \mathbf{M}_1 y \mathbf{M}_0 son las matrices de covarianza con desfase 1 y 0 respectivamente

Si $\Theta \Theta^T = D$ y se asume que D es una matriz gramiana de Θ , se puede demostrar que D es una matriz positiva o semidefinida positiva y si se definen los elementos de D como d_{ij} , estos se pueden determinar mediante el siguiente algoritmo (Bras *et al*, 1985):

$$\theta_{n1} = d_{1n} / \sqrt{d_{11}} \quad (1.7)$$

en general al multiplicar la i ésima fila de Θ por su traspuesta se tiene:

$$\sum_{m=1}^i \theta_{im}^2 = d_{ii} \quad (1.8)$$

Despejando θ_{ii} :

$$\theta_{ii} = \left(d_{ii} - \sum_{m=1}^{i-1} \theta_{im}^2 \right)^{1/2} \quad (1.9)$$

Se asume que la cantidad en paréntesis es positiva, así que dado el primer elemento de la columna i , θ_{ij} , los parámetros restantes son:

$$\theta_{ij} = \frac{d_{ii} - \sum_{m=1}^{i-1} \theta_{im} \theta_{jm}}{\theta_{ii}} \text{ para } j > i \text{ y } \theta_{ij} \neq 0 \quad (1.10)$$

Este procedimiento fue sugerido por Young y Pisano en 1968 (Citado por Bras, R. L *et al* 1985). Es computacionalmente rápido y seguro para pequeñas matrices, pero cuando se trata de grandes matrices la precisión decrece; para estos casos es mejor el procedimiento utilizando eigen valores y eigen vectores, (Bras *et al*, 1985, pp. 93-99)

El comparar el correlograma muestral con la función de correlación teórica facilita la identificación del orden del modelo, que en este caso es (Ochoa, 2002):

$$\mathbf{M}_k = \Phi_1 \mathbf{M}_{k-1} \text{ para } k > 0 \quad (1.11)$$

1.2.1.4 Autorregresivo de orden dos (AR2)

El modelo AR2 tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{Z}(t) = \Phi_1 \mathbf{Z}(t-1) + \Phi_2 \mathbf{Z}(t-2) + \Theta \varepsilon(t) \quad (1.12)$$

Las matrices Φ_1 , Φ_2 y Θ se pueden resolver a través de las ecuaciones 1.13, 1.14 y 1.15 por el método de momentos (Salas *et al.*, 1980, pp 354) y están dadas en términos de las matrices de correlación cruzada correspondientes a los desfases 0,1 y 2.

$$\Phi_1 = (\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{M}_1^T) (\mathbf{M}_0 - \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{M}_1^T)^{-1} \quad (1.13)$$

$$\Phi_2 = (\mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{M}_1) (\mathbf{M}_0 - \mathbf{M}_1^T \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{M}_1)^{-1} \quad (1.14)$$

$$\Theta \Theta^T = \mathbf{M}_0 - (\Phi_1 \mathbf{M}_0^T + \Phi_2 \mathbf{M}_2^T) \quad (1.15)$$

Donde la ecuación 1.15 se resuelve mediante el algoritmo expuesto anteriormente y el modelo de la función teórica multivariada se expresa de siguiente forma:

$$\mathbf{M}_k = \Phi_1 \mathbf{M}_{k-1} + \Phi_2 \mathbf{M}_{k-2} \quad (1.16)$$

1.2.1.5 Modelo condensado de desagregación espacial

En este modelo se generan series de caudales en uno o varios grupos de series de estaciones secundarias, a partir de otro grupo de estaciones principales, los caudales de estas últimas series se pueden calcular con modelos autorregresivos. La utilidad de estos modelos se presenta cuando se tiene una gran cantidad de estaciones, que al modelarlas conjuntamente necesitan de una gran cantidad de parámetros. También se aprecia esta utilidad cuando alguna de las estaciones presente valores de otro grado de magnitud, de tal manera, que al incluirla como principal afecte la estructura entre estas estaciones. Lane (1979) propuso un modelo condensado de desagregación espacial, cuya formulación es la siguiente:

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{A} \mathbf{X}_t + \mathbf{B} \boldsymbol{\varepsilon}_t + \mathbf{C} \mathbf{Y}_{t-1} \quad (1.17)$$

Donde:

\mathbf{X}_t Es el vector de caudales normalizados y tipificados del mes t correspondiente a las estaciones principales

\mathbf{Y}_t Es el vector de caudales del mes t correspondiente a las estaciones secundarias

- ε_t Es el vector de componentes aleatorias distribuidas con media 0 y varianza 1
A, B, C Son las matrices de parámetros

El modelo está diseñado para reproducir las covarianzas de desfase $k=0$ y $k=1$ entre las estaciones secundarias y, las de desfase 0 entre las estaciones principales y secundarias. El procedimiento para obtener las matrices de parámetros es similar para el caso de desagregación temporal propuesto por Lane y Frevert (1990, citado por Ochoa 2002):

$$\mathbf{A} = [\mathbf{S}_{XX} - \mathbf{S}_{YY}(1)\mathbf{S}_{YY}^{-1}\mathbf{S}_{XY}^T(1)] [\mathbf{S}_{XX} - \mathbf{S}_{XY}(1)\mathbf{S}_{YY}^{-1}\mathbf{S}_{XY}^T(1)]^{-1} \quad (1.18)$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{S}_{YY}(1) - \mathbf{A}\mathbf{S}_{YX}(1)]\mathbf{S}_{YY}^{-1} \quad (1.19)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{S}_{YY} - \mathbf{A}\mathbf{S}_{XY} - \mathbf{C}\mathbf{S}_{YY}^T(1) \quad (1.20)$$

En las ecuaciones 1.18 a 1.20, $\mathbf{S}_{UW}(1)$, es la matriz de covarianzas entre la U y W , pudiendo ser X ó Y , donde la última tiene un desfase de 1 con respecto a la primera, es decir $k=1$; de tal manera, que el elemento de la i -ésima fila y j -ésima columna de las matrices de covarianza se calcula de acuerdo con:

$$\mathbf{S}_{X_t Y_{t-k}}(i, j) = Cov[X_t^{(i)} Y_{t-k}^{(j)}] = \frac{1}{N-1-k} \sum_{t=1+k}^{N_q} [X_t^{(i)} - \bar{X}^{(i)}] [Y_{t-k}^{(j)} - \bar{Y}^{(j)}] \quad (1.21)$$

$$\bar{X}^{(i)} = \frac{1}{N_q - k} \sum_{t=1+k}^{N_q} X_t^{(i)} \quad \bar{Y}^{(j)} = \frac{1}{N_q - k} \sum_{t=1+k}^{N_q} Y_{t-k}^{(j)}$$

(i) y (j) representan dos estaciones diferentes

La ecuación 1.20 se resuelve con el algoritmo formulado con las ecuaciones 1.7 a 1.10.

1.2.1.6 Pruebas de bondad de ajuste

Existen varias pruebas que se aplican a las series residuales, ε , en función de los caudales históricos y las matrices de parámetros a partir de la ecuación del modelo, AR1 ó AR2 (Ochoa, 2002). Estas pruebas son: Normalidad, independencia temporal y espacial, igualdad de la media a 0 y de la varianza a 1. Para los modelos de

desagregación debe revisarse que las correlaciones indirectas sean preservadas dentro de límites aceptables en los datos generados (Salas *et al*, 1980).

1.2.2 Redes neuronales

Ochoa (2002) propone utilizar una red perceptron multicapa, MLP, alimentada hacia adelante y entrenada mediante el algoritmo de retropropagación del error, para la formulación de un modelo de generación multivariada.

A continuación se presenta, a grandes rasgos, el procedimiento utilizado por Ochoa (2002) para la formulación del modelo.

1. Preprocesamiento de caudales. Este procedimiento incluye la normalización, estandarización y escalamiento de caudales.

En el caso de la normalización cuando se utiliza una función lognormal dada por Raman y Sunilkumar (1995), ecuación 1.22, propone utilizar c_τ variable mediante la ecuación 1.23.

$$X_{v\tau} = \log(Q_{v\tau} + c_\tau \bar{Q}_\tau) \quad (1.22)$$

$$c_\tau = \frac{a}{g_\tau^2} \quad (1.23)$$

Donde:

- $X_{v\tau}$ Es el caudal normalizado correspondiente al año v del mes τ
- $Q_{v\tau}$ Es el caudal en su escala original
- \bar{Q}_τ Es la media de los caudales correspondiente al mes τ
- a Es un parámetro adicional a calibrar que puede tomar valores entre 0 y 1, siendo 0.3 un valor recomendado de partida.
- g_τ Es el coeficiente de asimetría de los caudales originales del mes τ

Para disminuir más el sesgo, en la fase de normalización, utiliza la transformación de Wilson Hilferty, dada por la ecuación 1.24

$$W_{v\tau} = \frac{6}{\gamma_\tau} \left[\left(\frac{\gamma_\tau Y_{v\tau}^*}{2} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] + \frac{\gamma_\tau}{6} \quad (1.24)$$

Donde:

$$Y_{v\tau}^* = \begin{cases} \max(Y_{v\tau} - 2/\gamma_\tau), & \text{si } \gamma_\tau > 0 \\ \min(Y_{v\tau} - 2/\gamma_\tau), & \text{si } \gamma_\tau \leq 0 \end{cases}$$

$Y_{v\tau}$ son las series normalizadas y tipificadas correspondientes al mes τ del año ν

γ_τ es el coeficiente de asimetría de las series tipificadas

Para el escalamiento utiliza la ecuación 1.25 con el fin de que las series de caudales adopten una escala análoga al rango de las funciones de activación.

$$Z_t = \frac{(L_s - L_i)Z_t^* + (L_i M_{Z^*} - m_{Z^*})}{M_{Z^*} - m_{Z^*}} \quad (1.25)$$

Donde:

$$Z_\tau^* = \begin{cases} Y_{v\tau} & ; \text{si no hay transformación Wilson - Hilferty} \\ W_{v\tau} & ; \text{si hay transformación} \end{cases} ; t = 12(\nu - 1) + \tau$$

M_{Z^*} Valor máximo de la serie de caudales, Z_τ^* de una estación dada

m_{Z^*} Valor mínimo Z_τ^*

L_s Límite superior de la función de activación

L_i Límite inferior de la función de activación

El intervalo $[L_s, L_i]$ puede seleccionarse menor al rango de las funciones de activación, con el fin de generar caudales por fuera del rango de los valores empleados en el entrenamiento, Salas *et al* (2000) recomiendan $[0.2, 0.8]$.

- Después del preprocesamiento se sigue con la determinación de la topología inicial de la red. El número de neuronas de la capa de entrada es función del número de caudales antecedentes a predecir; el número de neuronas de la capa de salida es igual al número de caudales a predecir. Después de que se

tiene la topología inicial definida se ensamblan los patrones con los que se entrena la red neuronal; para el entrenamiento se emplean todos los patrones que puedan extraerse de las series de caudales y éstos se organizan en una matriz de patrones de entrenamiento. En Ochoa (2002, Pág. 91-93 y 97-99) se pueden consultar las formulaciones de la componente determinista y estocástica de la red neuronal.

3. Entrenamiento de la red. En esta fase se determina la topología óptima de la red y los pesos de sus conexiones sinápticas a través del algoritmo de retropropagación del error. La topología inicial se modifica aumentando el número de neuronas ocultas hasta que se cumpla el criterio de parada de entrenamiento, que consiste en comparar con un error cuadrático medio preestablecido.
4. Estimación de parámetros de la componente aleatoria. Se hace predicción con la red entrenada y los valores obtenidos se le sustraen a los observados, dando lugar a las series residuales neuronales observadas. Se verifica que éstas estén normalmente distribuidas, tengan media cero y sean independientes temporalmente. De ser así, se obtiene la matriz de parámetros de la componente aleatoria del modelo estocástico de red neuronal, en función de la matriz de covarianzas de las series residuales neuronales. Si estas series no cumplen las propiedades estadísticas antes señaladas, es probable que exista una topología que arroje un menor error cuadrático medio, que el que se consigue con la red obtenida en el entrenamiento. Otra razón, por la cual las series residuales neuronales pueden no ajustarse a las propiedades estadísticas indicadas, es la falta de normalización de las series de caudales empleadas en el entrenamiento de la red (Ochoa, 2002).

1.2.3 Svanidze Modificado (hidrogramas mezclados)

Descripción del método de Svanidze aplicado a la generación simultánea de los escurrimientos mensuales de varias cuencas.

Se define primero $V_{\tau\nu k}$ como el escurrimiento registrado en el mes τ del año ν en la cuenca k

A partir de los volúmenes mensuales, se calcula, para cada cuenca k , el volumen total anual $VT_{\nu k}$ y las fracciones mensuales correspondientes $FV_{\tau\nu k}$ con las ecuaciones

$$VT_{vk} = \sum_{\tau=1}^{12} V_{\tau vk} ; FV_{\tau vk} = \frac{V_{\tau vk}}{V_{vk}} \quad (1.26)$$

La modificación al método de Svanidze consiste en utilizar la suma del volumen total anual de todas las cuencas SVT_v y determinar, para cada año, la fracción FV_{vk} que le corresponde a cada cuenca :

$$SVT_v = \sum_{k=1}^l VT_{vk} ; FV_{vk} = \frac{VT_{vk}}{SVT_v} \quad (1.27)$$

Partiendo de estos datos históricos, se generan los valores mensuales simultáneos en las k cuencas para un número M deseado de años, mediante el siguiente procedimiento

1. Se obtienen M valores aleatorios del volumen anual para la suma de las cuencas SVT , con la función de distribución de probabilidades que mejor se ajusta a la muestra histórica correspondiente; dicha distribución se puede obtener con la ayuda del programa AX (Jiménez, 1996).
2. Se seleccionan, también de manera aleatoria, M años de la muestra histórica y los porcentajes FV_{vk} correspondientes a cada cuenca. Aquí, se supone que la fracción de todos años ocurrió con la misma probabilidad sin considerar el volumen total, y por lo tanto que la distribución de los datos era consecuente
3. El volumen total anual obtenido en el paso 1 se multiplica primero por las fracciones FV_{vk} obtenidas en el paso 2 para determinar los valores anuales de cada presa y enseguida por las fracciones mensuales $FV_{\tau vk}$ correspondientes al mismo año seleccionado en el paso 2, con lo que se obtienen los valores mensuales correspondientes a cada cuenca y cada año

Como la selección de los años y sus correspondientes fracciones se hace aleatoriamente, el método tiende a producir valores nulos de la autocorrelación entre los valores generados para el último mes de un año y el primero del siguiente, por lo que se recurre a trabajar con años "hidrológicos" que deben terminar en el mes cuya correlación con el siguiente sea menor, lo cual generalmente ocurre al pasar de la época seca a la húmeda, o al pasar de la época húmeda a la seca.

1.3 Políticas de operación

El análisis de un sistema de recursos hídricos se puede realizar con distintos objetivos, Anthony (1965) define 3 niveles de trabajo: la planificación estratégica, el control de la gestión y el control de la operación. En el primero, se diseña el propio sistema de recursos hídricos, SRH, lo que incluye las reglas y políticas de gestión generales para el sistema, en el segundo, se planifica la operación a corto plazo con base en la situación actual del sistema, y el tercero, se refiere a la operación en tiempo real. Las reglas de operación que se obtendrán de la aplicación de la metodología propuesta en esta tesis se enmarcan en los niveles 1 y 2.

1.3.1 Definición de política de operación

En términos simples una política de operación es una combinación de reglas para almacenar o utilizar el agua de los embalses o acuíferos de un sistema de recursos. Esta regla debe ayudar a tomar las siguientes decisiones al disponer del recurso: 1) repartirla entre los almacenamientos, 2) repartirla entre los usuarios, 3) distribuirla a lo largo del periodo de análisis y, 4) establecer de qué nivel de la presa se extraerá con el fin de tener la temperatura apropiada o calidad de la corriente, aguas abajo. (Bower T. B. *et al* 1962).

1.3.2 Política de operación normal

La regla de operación normal es presentada por Myron B. Fiering y Bárbara B. Jackson en 1971, figura 1.1. En ella se asume que la disponibilidad total al inicio del ciclo es conocida, por ejemplo un año. Además, se establece que si la disponibilidad es inferior a la demanda, entonces habrá déficit, mientras que si la disponibilidad es mayor a la demanda ésta se abastecerá y podrá haber almacenamiento, asimismo, cuando la demanda haya sido satisfecha y el almacenamiento esté lleno, entonces se tendrán derrames.

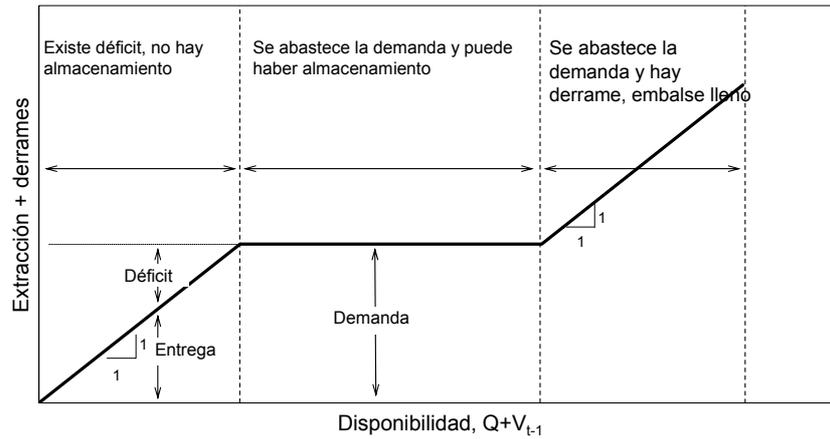


Figura 1.1 Regla de operación normal. Fiering 1971

Klemes en 1977 presenta los resultados de su trabajo sobre el valor de la información utilizada, caudales, para las políticas de operación óptima. Su investigación la realiza con caudales anuales y concluye que la política óptima tiende a ser la regla de operación normal. Más tarde en 1978, Stedinger critica el trabajo de Klemes, argumentado entre otras cosas, que utilizar una escala anual parece que es inadecuado para este tipo de análisis.

1.3.3 Trabajos sobre conceptos, índices y métodos que ayudan a evaluar el desarrollo de un sistema de recursos hídricos

La primera aproximación sistemática al problema de la garantía fue realizada por Kristky y Menkel en 1952 (citados por Klemes 1969), estos autores, identificaban a la garantía por medio de tres certezas características: certeza basada en la ocurrencia, en el tiempo y en la cantidad. La primera de ellas hacía referencia a la probabilidad de que no se produjeran fallos, la segunda a la duración de los periodos sin fallo y la tercera al volumen de agua suministrado (Estrada F., 1994).

Hashimoto *et al* (1982) estudian tres criterios de riesgo como son: la fiabilidad, flexibilidad y vulnerabilidad de un sistema de recursos hídricos para evaluar su desarrollo. Entre otras cosas concluyen que un sistema ampliamente fiable, entendiéndose como fiable a aquel sistema que tiene pocos fallos para cumplir con la demanda objetivo, está ligado a uno altamente vulnerable; porque no es normal que disponga de medidas de prevención o mitigación de daños.

Por otro lado, Wai-See Moy *et al* (1986) usan programación lineal entera mixta para el evaluar el funcionamiento de un embalse de abastecimiento de agua y llegan a la misma conclusión que Hashimoto *et al*, pero al incluir la flexibilidad o resiliencia, como algunos le llaman, ésta aumenta con la vulnerabilidad. Wai-See Moy *et al* mencionan que las relaciones entre los criterios de fiabilidad, flexibilidad y vulnerabilidad provienen de formulaciones hipotéticas, por lo que la inclusión de estos criterios en una regla de operación real aún quedaba pendiente.

Cancelliere *et al* (1998), realizaron una comparación con índices de sequías que ellos proponen y comparan la operación de un sistema con dos reglas, una normal y otra con restricción, ambas preestablecidas. Dentro de los resultados encontraron que los índices presentan mayor correlación al utilizar la regla normal que la restringida. No obstante, mencionan que las variaciones no son tan significativas como para afectar los índices propuestos. Entre las relaciones o índices que analizaron, se tiene: intensidad media del déficit versus frecuencia, intensidad media del déficit versus longitud de la sequía, intensidad media de déficit contra déficit máximo. Utilizaron 200 eventos secos determinados a partir de flujos sintéticos mensuales. Las restricciones se determinaron para una probabilidad de no excedencia del 30 por ciento de los flujos generados.

En Sánchez *et al* (2001) se propone un método de operación de sistemas basado en la estimación del riesgo, que parte de la generación estocástica de múltiples escenarios hidrológicos, que tomen en cuenta la situación presente del sistema, seguida de la simulación de la gestión del sistema para todos los escenarios, lo que da una muestra de múltiples resultados posibles de la gestión que pueden ser analizados por métodos estadísticos para deducir el riesgo de fallo del sistema durante los próximos meses. Este método de operación requiere el desarrollo previo de unas reglas de operación.

Con el fin de uniformizar conceptos para los fines de esta tesis se extraen de los trabajos antes mencionados y de diccionarios algunas definiciones útiles en relación con la evaluación del funcionamiento de un sistema de recursos hídricos:

Fallo: es una situación en la que un sistema de recursos hídricos no es capaz de abastecer satisfactoriamente una demanda.

Déficit: es la diferencia entre la demanda y el suministro.

Garantía: se define como la probabilidad o frecuencia de que un sistema se encuentre en una situación satisfactoria, siendo esta situación aquella en la que el suministro es suficiente para abastecer la demanda. Si la frecuencia relativa con la

que se estima una garantía es anual, entonces la garantía es anual; si esta frecuencia es mensual, entonces la frecuencia es mensual y su forma de estimarla es:

$$G = 1 - \frac{NF}{NI} \quad (1.28)$$

Donde: NF es el número de fallos en el periodo de análisis, si el paso de tiempo es anual, la garantía será anual y si es mensual la garantía será mensual.

NI es el número de intervalos en el periodo de análisis, si por ejemplo, el periodo de análisis es de 20 años y se está estimando una garantía mensual entonces, $NI=240$.

Las definiciones de garantía mensual y anual; hacen referencia a la frecuencia de fallos. Para tomar en cuenta la magnitud de los fallos en términos de garantía se utiliza la garantía volumétrica.

Garantía volumétrica: es la fracción de la demanda total que se satisface durante un periodo de tiempo.

Flexibilidad o resiliencia: es la capacidad que tiene un sistema de resistir y recuperarse de un fallo.

Vulnerabilidad: es la susceptibilidad que tiene un sistema de sufrir algún daño y se utiliza este concepto para hacer referencia a la repercusión de los fallos.

1.3.4 Políticas de operación con restricción

En épocas en las que la disponibilidad de los recursos disminuye debido a variaciones climáticas, se hace indispensable una política de operación que ayude a tomar decisiones de manera óptima y que tomen en cuenta dichas variaciones climáticas. En este apartado se comentan algunos de los trabajos relacionados con las reglas de operación lineales, poniendo énfasis en aquellas que toman en cuenta una restricción a la demanda.

El uso de las reglas de operación con restricción se remonta a los trabajos de Blair T, Bower, Maynard M. Hushmidt y William W. Reedy en 1962, quienes ya mencionan que económicamente es aceptable sufrir pequeños déficit en el suministro para

evitar posibles recortes severos, tanto en el abastecimiento como en la producción de energía, ya avanzado el ciclo de vaciado de la presa. También mencionan, que dado que los caudales presentan un comportamiento estocástico es mejor posponer las restricciones el mayor tiempo posible. El efecto de incluir restricciones a la demanda agrícola lo muestran a través de gráficos como los de la figura 1.2.

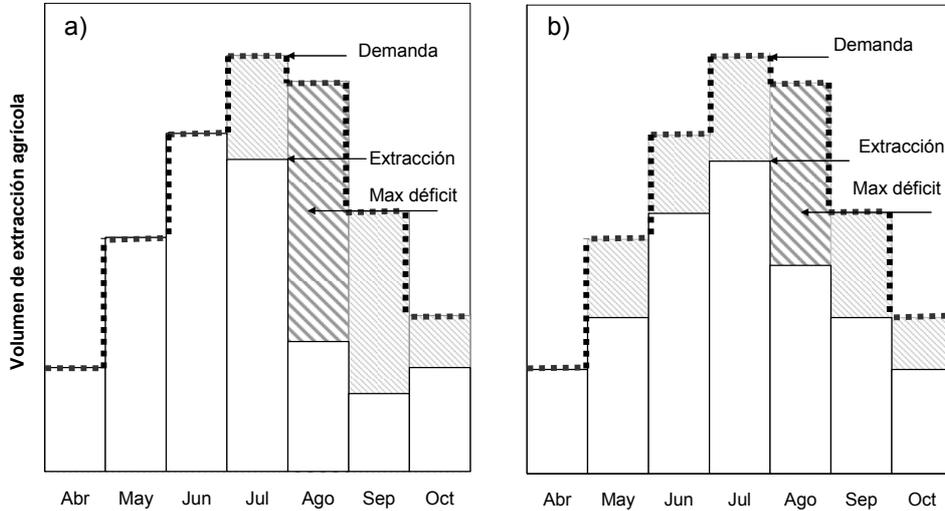


Figura 1.2 Extracciones sin y con restricción

Loucks *et al* (1981) mencionaron que existen varios tipos de reglas de operación, algunas que identifican los volúmenes de almacenamiento objetivo y otras que establecen zonas de almacenamiento que son asociadas a políticas de extracciones, una de estas últimas se observa en la figura 1.3. La zona A de la figura corresponde al volumen almacenado que debe haber en el embalse para extracciones garantizadas. La zona B permite abastecer la extracción segura y parte de las demandas secundarias. Si el embalse se encuentra en la zona C las demandas se abastecen en su totalidad, es decir, no hay restricción y la zona D corresponde a los niveles de resguardo de la presa, para el control de avenida.

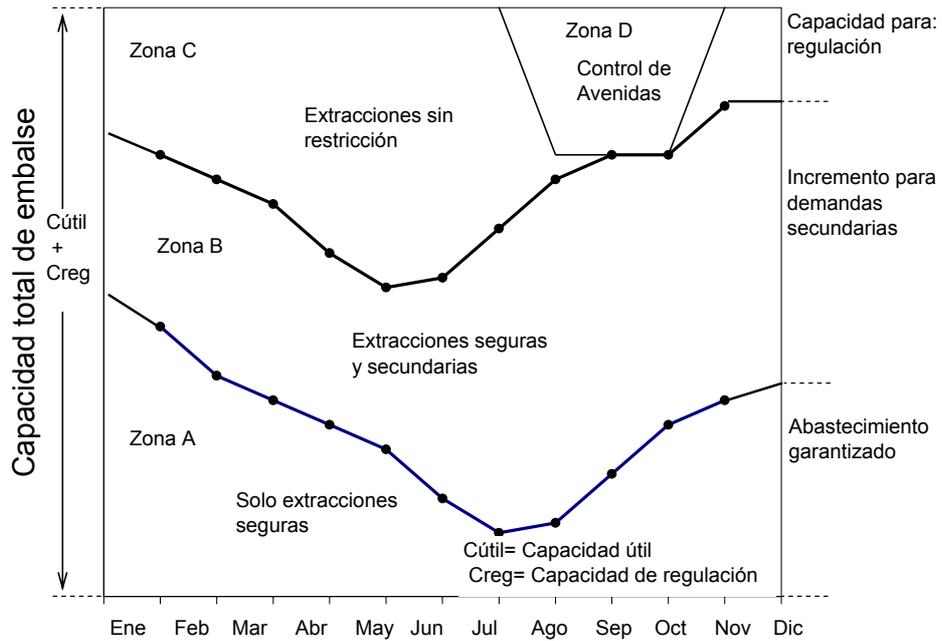


Figura 1.3 Reglas de operación de embalse para demanda garantizada y demandas secundarias. Loucks *et al* 1981(pp. 354)

M. Bayazit y N.E. Ünäl (1990) utilizaron el mismo ejemplo propuesto por Loucks *et al* (1981 pp., 140-152) y mas tarde por Hashimoto *et al* (1982) y concluyen entre otras ideas:

1. Que los valores de desarrollo del sistema están relacionados con qué tan pronto empiecen o terminen las restricciones, P1 y P2 respectivamente, figura 1.4 y que la fiabilidad y la flexibilidad se reducen significativamente al aumentar P2.
2. La restricción ayuda a reducir el déficit medio y la vulnerabilidad, cuando P1 es cercano al volumen objetivo y P2 es grande.
3. Cuando había poca agua y se aplicaba una restricción, el déficit medio y la vulnerabilidad se incrementaban, pero la desviación estándar de la vulnerabilidad decrecía significativamente, de tal manera que una política con restricción podría ser preferida para prevenir futuros déficits catastróficos.
4. Una política de operación realista no se encuentra lejos de la política de operación normal.

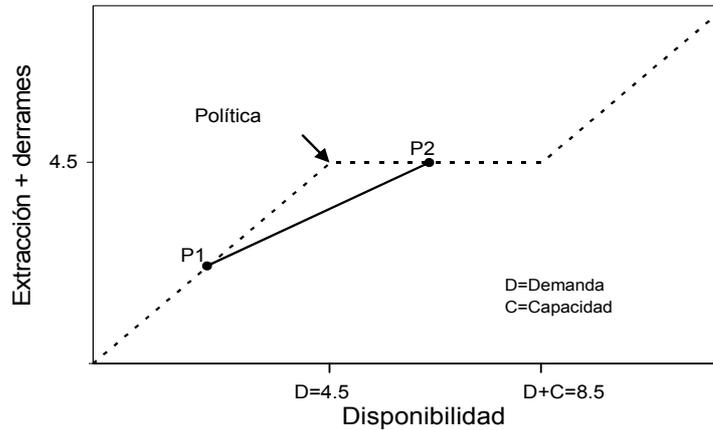


Figura 1.4 Regla de operación con restricción, Bayazit *et al* (1990)

1.3.4.1 Políticas de operación lineales

Jhih-Shyang Shih y Charles Revelle (1994) obtuvieron una regla con restricción como la mostrada en la figura 1.5; el valor de K_p , que es asignado cada mes p , así como el momento en el que se inicia la restricción se determinan al mismo tiempo. Cuando la disponibilidad es menor que K_p meses la demanda, entonces empieza la restricción, de otra manera se abastece toda la demanda. Para encontrar estos parámetros formulan un modelo matemático no lineal que transforman en lineal y lo resuelven con programación lineal entera mixta. El problema fue resuelto para un solo registro de 36 meses de longitud y un embalse. Además, convirtieron el problema a una forma discreta, de tal manera, que la regla de operación llega a ser escalonada, aunque no llegaron a evaluarla. El mismo problema lo resolvieron con 2 algoritmos distintos; el algoritmo *poli tope* y un algoritmo iterativo para resolver un problema de programación entera mixta. El primero, lo usaron con dos condiciones, no obstante los valores de K_p (restricción) varían para cada método. Desafortunadamente, de sus resultados no pudieron extraer conclusiones firmes, lo que si llegaron a establecer es que el algoritmo del *poli tope* nunca llegó a una solución tan buena como el algoritmo que usa la programación entera mixta.

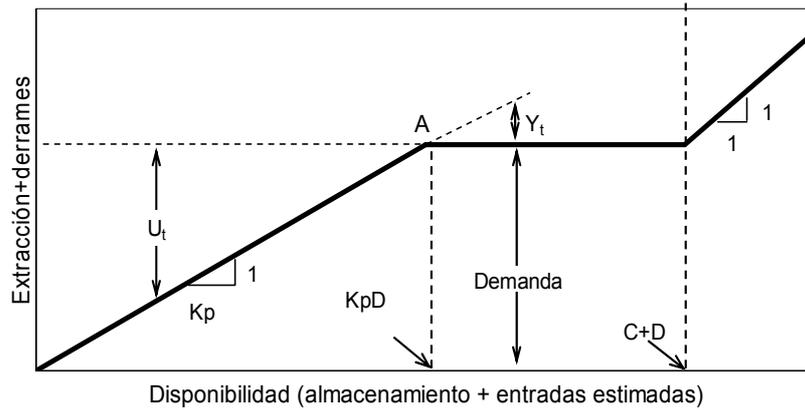


Figura 1.5 Regla de operación con restricción, lineal, Shih *et al* (1994)

Wagner *et al* (1994) formularon un modelo de optimización, cuya función objetivo maximiza la suma de extracciones anuales minimizando los déficit y derrames. En el cual, además de incluir las restricciones de capacidad mínima y máxima del almacenamiento y restricciones de continuidad, también se utilizan restricciones para garantizar que el volumen asignado de forma anual cumpla un patrón de distribución mensual. El modelo de optimización planteado da como resultado una política de operación como la mostrada en la figura 1.6. Donde α , β_1 , β_2 y β_3 son parámetros óptimos. De tal manera, que el volumen anual asignado se determina tomando como variable de decisión el volumen de escurrimiento del año antecedente. Este volumen anual se reparte mensualmente con el patrón de distribución de la demanda.

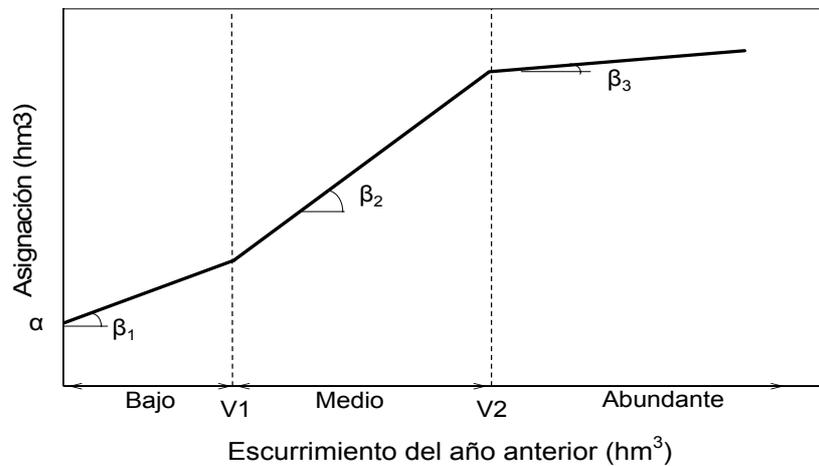


Figura 1.6 Asignación anual en función del escurrimiento antecedente. Wagner *et al* (1996)

Wagner y Rivera (1996) desarrollaron un sistema para el manejo de presas (denominado Sismapre) en el cual se “automatiza” el proceso necesario para obtener reglas de operación. Con este modelo se determinan los parámetros de la regla de operación de un embalse en función del volumen almacenado en el periodo de decisión (octubre), y del escurrimiento que ingresó al embalse en el período anual antecedente, figura 1.7. En este caso se combinan las aportaciones y las reservas como criterios de decisión o racionalización de la demanda.

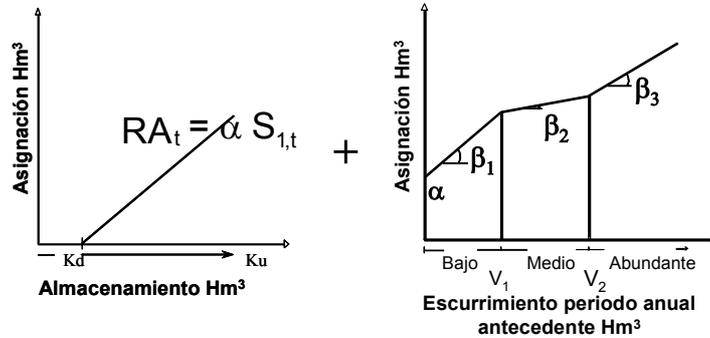


Figura 1.7 Asignación anual en función del almacenamiento + el escurrimiento del año antecedente, Wagner *et al* (1997)

Andrew J. Draper y Jay R. Lund (2004) determinaron que la regla de operación con restricción óptima proviene de la regla estándar y tiene la forma que se indica en la figura 1.8a. La parte curva de esta línea la determinan matemáticamente a través de funciones cuadráticas o cúbicas de la función beneficio, al utilizar el agua disponible inmediatamente o almacenarla para sus usos futuros. De tal manera que si se conocen estos beneficios se pueden determinar matemáticamente los valores $D^*(A)$ que se muestran en la figura 1.8b, lo cual daría el intervalo en el que se aplica la restricción.

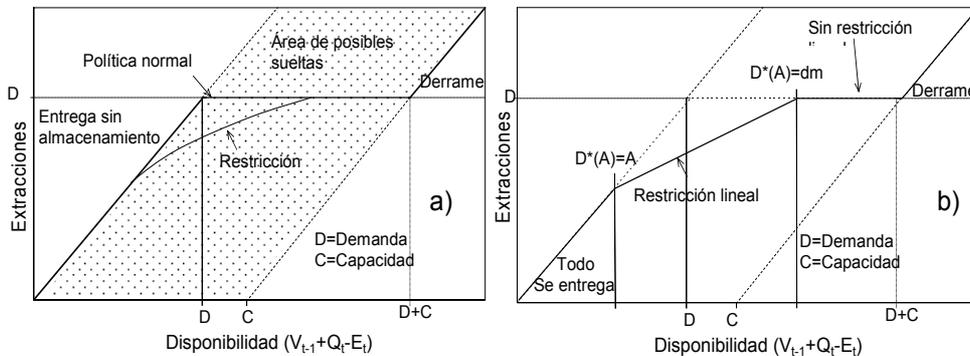


Figura 1.8 a) Regla de operación Normal, b) Restricción óptima con el uso de funciones cuadráticas. Draper *et al* (2004)

Shiau *et al* (2005) utilizaron programación multiobjetivo para obtener dos tipos de reglas de restricción; una que tome en cuenta la disponibilidad del recurso, entendida como el almacenamiento más el flujo estimado en el tiempo de análisis, para determinar la restricción, y la otra en la que el mecanismo detonador de implementar una restricción es un posible recorte potencial del recurso en el futuro “conocido”. Además dado que éste no se puede predecir, utilizaron los deciles de los caudales históricos mensuales como pronóstico y compararon estos resultados con los que tenían. Su metodología se aplicó al embalse Shihmen en Taiwán. Ellos tratan de minimizar además del déficit mensual, la longitud del periodo de restricción, sin embargo estas dos variables se contraponen al analizarlas por separado, así que para el embalse que analizan el periodo está cerca de los seis meses y el déficit mensual es mayor al minimizarlo por si solo. En conjunto dan rangos de magnitud de ambas variables, para el caso de estudio.

1.3.4.2 Políticas de operación discretas

Jhih-Shyang Shih y Charles Revelle en 1995 presentaron un artículo sobre una regla de operación con restricción discreta, figura 1.9; la proporción en que se restringe la demanda tiene que ver con la proporción del volumen de entradas que se estima. En esta regla utilizaron dos niveles de racionamiento por simplicidad, y el nivel de restricción máximo es dado por un organismo gubernamental. En el procedimiento que plantean buscan maximizar el número de meses sin restricción, para ello utilizan programación entera mixta, para obtener los volúmenes $V1p$, $V2p$ o $V3p$ que activan la restricción. Este procedimiento lo aplican al mismo caso que el presentado en el año 1994, para la regla de operación lineal.

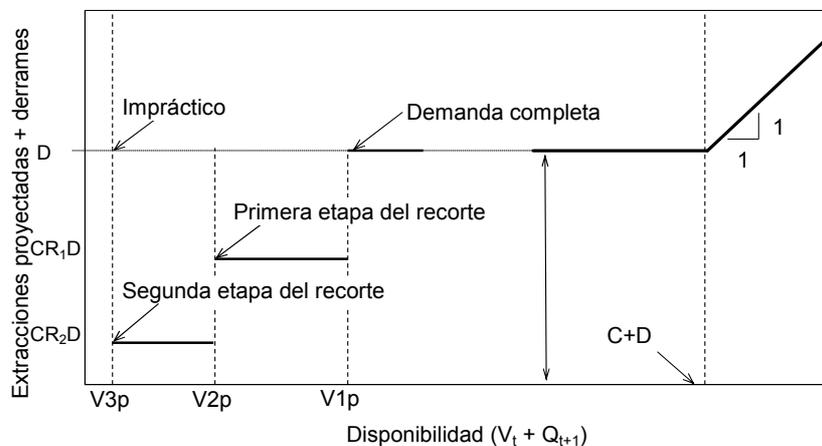


Figura 1.9 Regla de operación con restricción, discreta. Shih *et al* (1995)

Por otro lado, según Andreu *et al* (1993), en la práctica es más realista la definición de escalones en las restricciones, que consiste en la definición de intervalos de volumen embalsado en los que el valor de la restricción es el mismo.

T. R. Neelakantan y N. V. Pundarikanthan (1999) recurrieron a una red neuronal para optimizar una red de abastecimiento de agua utilizando una política de operación con restricción y usaron como indicador para iniciar la restricción, sólo el volumen inicial del almacenamiento. Los resultados que presentaron son para dos años y el paso de tiempo es mensual.

En Solera 2003, se presentó el caso de una regla de operación para el sistema del Trasvase Tajo-Segura. En la cabecera del Tajo existe un conjunto de embalses con regulación hiperanual (Entrepeñas y Buendía) que abastecen, en primer lugar, a la demanda de la cabecera del Tajo y en segunda instancia suministran "excedentes" al sistema del Trasvase Tajo-Segura. Para mantener la garantía en la cabecera del Tajo es necesario establecer límites en el suministro al trasvase. Estos límites se definen con una regla de operación escalonada y variable cada mes, Figura 1.10.

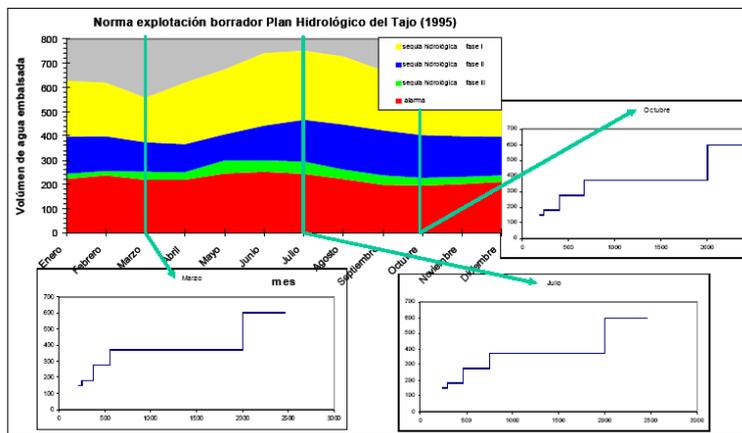


Figura 1.10 Regla de operación escalonada y variable mes a mes. Solera (2003).

Ming-Yen Tu *et al* (2003) desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta para analizar un sistema de recursos hídricos multipropósito y con varios embalses, en Taiwán, aplicando además de las curvas de zonado, políticas de operación con restricción. El problema se resuelve de forma discreta, donde las restricciones son impuestas a través de escalones, como se muestra en la figura 1.11a. Esta regla se aplica a cada una de las presas del sistema y en la figura 1.11b se presenta esquemáticamente la manera en que se reparte el agua entre los distintos usuarios. Como resultado de su análisis para los dos embalses más

importantes por la capacidad conjunta, que corresponden al 82% de la capacidad útil del sistema con 776.45 hm³, se tiene que si el almacenamiento de la suma de los dos se encuentra en la zona tres de la figura 1.10a, no hay restricción, pero si se encuentra en la zona dos la agricultura se reduce en un 25%, y en un 50 % si se encuentra en la zona uno. Para este análisis se utilizó un registro de 20 años longitud, con un paso de tiempo de 10 días.

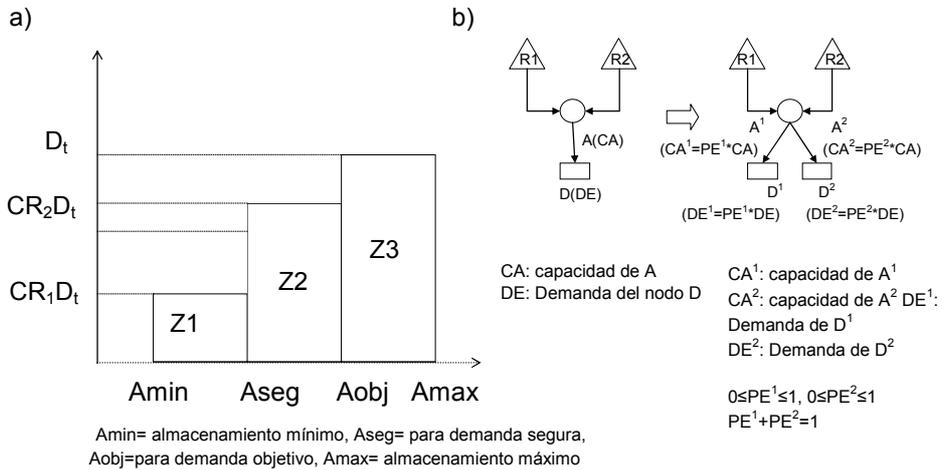


Figura 1.11 a) Entrega según el nivel de almacenamiento en el sistema y b) Reparto entre las presas. Ming-Yen Tu et al (2003).

2 Generación y análisis de series temporales

La generación de series en este trabajo está enfocada al diseño y evaluación de políticas de operación con restricción, en sistemas de recursos hídricos complejos con capacidad de almacenamiento para abastecer volúmenes mayores a las demandas impuestas en el sistema para un año medio, por lo que estas series deben ser capaces de caracterizar no sólo los estadísticos básicos del registro histórico, sino además, los estadísticos de eventos secos, donde los episodios secos van más allá de los periodos interanuales, o estacionales. Por otra parte, dado que generalmente la escala temporal de análisis de los sistemas de recursos hídricos es mensual, entonces es recomendable realizar el análisis de las series utilizando dos escalas, una anual y otra mensual.

En esta sección se mencionan algunos criterios que se utilizan para seleccionar un método de generación de series u otro diverso. Además se mencionan las características que deben analizarse de las series sintéticas para poder ser usadas posteriormente en la generación y evaluación de políticas de operación con restricción a la demanda de forma anticipada.

Para llegar a determinar una regla de operación es necesario el análisis y manipulación de la serie histórica y de series sintéticas, que son generadas a partir de la primera. Las series de caudales generadas deben reproducir, en la medida de lo posible, las características estadísticas y de sequías de las series históricas.

Dado que las series que se utilizarán para la obtención de las reglas de operación intervienen en varias etapas del proceso de elaboración de una política de operación, como pueden ser: el establecimiento de los niveles de restricción o la evaluación de las políticas de operación; entonces, de la calidad de las series utilizadas para su determinación dependerá en gran medida el buen desarrollo que puedan presentar las políticas de operación.

2.1 Criterios para determinar las series sintéticas a utilizar en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos

Entre los criterios para evaluar el tipo de modelo a utilizar se encuentran el índice de parsimonia general y el criterio de Akaike, estos criterios toman en cuenta que la longitud de las series sea suficiente para el número de parámetros a usar por los modelos de generación. Además y quizá más importante que estos criterios está el análisis de preservación de estadísticos de la serie histórica, así como el que se logre reproducir las características de las sequías que se han presentado en el sistema de recursos hídricos.

2.1.1 Índice de parsimonia general

En cuanto a la selección del modelo, ésta dependerá de criterios que tomen en cuenta la relación entre el número de parámetros del modelo y el número de datos disponibles, es decir, parsimonia de los modelos. Un índice de parsimonia general, según Salas *et al* (1980, pp 95), es el siguiente:

$$\delta = \frac{N}{K} \tag{2.1}$$

Donde:

N es el número de datos

K es el número de parámetros

Este índice no requiere de una generación a priori de la serie temporal para evaluar la parsimonia del modelo y debe tener un valor de al menos 15. No obstante lo anterior es común contar con modelos estocásticos que requieren de un gran número de parámetros, de tal manera que no cumplen con éste índice (Salas *et al* 1980). Otro criterio para evaluar la parsimonia de un modelo es el criterio de información de Akaike (Akaike, 1974, citado por Salas *et al* 1980, pp 97)

2.1.2 Criterio de Akaike

Para comparar entre dos modelos autorregresivos ARMA (p,q) , Akaike utiliza:

$$AIC(p, q) = N \ln \left(\hat{\sigma}_{\varepsilon} \right) + 2(p) \quad (2.2)$$

Donde:

N es el tamaño de la muestra

$\hat{\sigma}_{\varepsilon}$ es el estimador por máxima verosimilitud de la variancia de los residuales

p es orden del modelo autorregresivo

q se refiere al número términos para evaluar la media móvil

La lógica del indicador AIC se refiere a que si se agregan más parámetros libres al modelo, se consigue un mejor ajuste. Así pues, AIC tiene en cuenta ambos hechos en forma compensada: al ir añadiendo factores disminuye el valor del primer término en tanto que aumenta el del segundo.

El modelo más parsimonioso, será aquél que consiga simultáneamente un valor más bajo de la función de discrepancia, evaluada a través de la variancia residual, utilizando el menor número posible de parámetros libres. Para decidir cual es el mejor modelo, se calcula el índice AIC para modelos con 0, 1, 2 ...m parámetros y se elige aquel modelo en el que el criterio alcance su valor mínimo.

2.1.3 Análisis de la preservación de los estadísticos

Para evaluar el criterio de Akaike es necesario generar las series, así que la selección del modelo será más adecuada a través del análisis de las mismas, verificando que se preserven tantos estadísticos como sea posible. En el planteamiento de algunos modelos se lleva implícita la reproducción de algunos estadísticos, no obstante habrá que comprobar el comportamiento de los que no se toman en cuenta en el modelo seleccionado. Entre los estadísticos que se revisan se encuentran los siguientes: media, varianza, sesgo y el coeficiente de auto correlación. Esto se hace para cada una de las series de caudales del sistema a analizar y para la escala anual. También es conveniente revisar los coeficientes de correlación cruzada entre los caudales de las distintas series.

Para la escala mensual además de los anteriores se revisan las matrices de auto correlación de las series generadas y el coeficiente de correlación entre cada uno de los meses.

Los estimadores de los estadísticos que se presentan a continuación fueron extraídos de (Salas *et al*, 1980)

2.1.3.1 Media

El estimador de la media viene dado por la siguiente expresión,

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \quad (2.3)$$

Donde:

- \bar{X} Es la media de la muestra
- N Número de datos de la serie
- x_t son los datos de la serie en el tiempo t

2.1.3.2 Varianza

Para la varianza se usa el siguiente estimador,

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X}_t)^2 \quad (2.4)$$

Donde:

- S^2 es el estimador insesgado de la varianza, la desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es decir, s .

2.1.3.3 Sesgo

El estimador del sesgo o coeficiente de asimetría está dado por la ecuación 1.4, que se transcribe a continuación:

$$\hat{\gamma} = \frac{N \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^2 \right]^{3/2}}$$

Donde:

$\hat{\gamma}$ Es asintóticamente normalmente distribuido con media 0 y varianza $6/N$, si viene de una distribución normal (Snedecor y Cochran, (1967 p.86, citado por Salas *et al* (1980)) y el límite $(1-\alpha)$ en $\hat{\gamma}$ se define como:

$$\left[-u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}}, u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}} \right]$$

$u_{1-\alpha/2}$ Es el cuantil $1 - \alpha/2$ de la distribución normal

2.1.3.4 Autocorrelación anual

La autocorrelación anual que se determina con la ecuación 1.1 y que se transcribe a continuación es otro de los estadísticos importantes a determinar en las series sintéticas para comprobar la dependencia temporal de las series.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{X})(x_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{X})^2}$$

Donde:

r_k Es el coeficiente de auto correlación de desfase k
 \bar{X} Es la media de la muestra
 N Número de datos de la serie
 x_t son los datos de la serie en el tiempo t

2.1.3.5 Correlación cruzada

Las matrices de correlación cruzada con desfase $k=0$, se determinan a partir de las ecuaciones 2.5 y 2.6

$$\hat{M}_0 = \begin{bmatrix} r_0^{11} & r_0^{12} & \dots & r_0^{1n} \\ r_0^{21} & & & r_0^{21} \\ \vdots & & & \\ r_0^{n1} & & & r_0^{nn} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Donde:

$$r_0^{ij} = \frac{\sum_{t=1}^N (x_t^{(i)} - \bar{X}^{(i)}) (x_t^{(j)} - \bar{X}^{(j)})}{\left[\sum_{t=1}^N (x_t^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^2 \sum_{t=1}^N (x_t^{(j)} - \bar{X}^{(j)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

Donde:

(i) y (j) representan dos estaciones diferentes

La determinación de las matrices de correlación cruzada proporciona información acerca de la dependencia espacial entre las series, razón por la cual es necesaria la estimación de este parámetro para la serie histórica y las sintéticas.

2.1.3.6 Autocorrelación mes a mes

Otro de los parámetros interesantes a analizar es la auto correlación mes a mes, con el fin de verificar la dependencia, a esta escala de tiempo, para todos los años de la serie. Esto se hace separando para cada una de las aportaciones a las presas los meses consecutivos y verificando su auto correlación, así por ejemplo para octubre-noviembre:

$$r_1^i = \frac{\sum_{t=1}^N (x_t^{(i)} - \bar{X}^{(i)}) (x_t^{(i+1)} - \bar{X}^{(i+1)})}{\left[\sum_{t=1}^N (x_t^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^2 \sum_{t=1}^N (x_t^{(i+1)} - \bar{X}^{(i+1)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.7)$$

Para i=1 a 12, si el año agrícola inicia en octubre i=1 corresponde a octubre. N = número de años del registro.

2.2 Identificación y caracterización de sequías

El tipo de sequías que se caracterizan para la elaboración de las políticas de operación, en la presente tesis, son las hidrológicas. Las sequías hidrológicas son asociadas con los efectos de los períodos de déficit de escurrimiento sobre el abastecimiento de agua superficial o subterránea (caudales, niveles en embalse y lagos, aguas subterráneas) más que con déficit de precipitación (Dracup et. al. 1980, Klemes 1987, citados por Villalobos 2007).

Para identificar una sequía se hará uso de la teoría de rachas o sucesiones propuesta por Yevjevich (1967). Esta consiste en analizar las sequías con base en procesos espacio temporales que consideran la oferta y la demanda del recurso en una región. La diferencia entre las series cronológicas que representan la disponibilidad del recurso y las necesidades de su utilización permiten identificar las sequías.

A continuación se mencionan las propiedades de las sequías utilizando la teoría de rachas y posteriormente se menciona a qué series se le aplica dicha teoría para el análisis y ulterior utilización en los modelos de gestión de recursos hídricos.

2.2.1 Teoría de rachas o sucesiones

Guerrero-Salazar y Yevjevich, 1975, definen las propiedades de las sequías a través de sucesiones de periodos de déficit, figura 2.1.

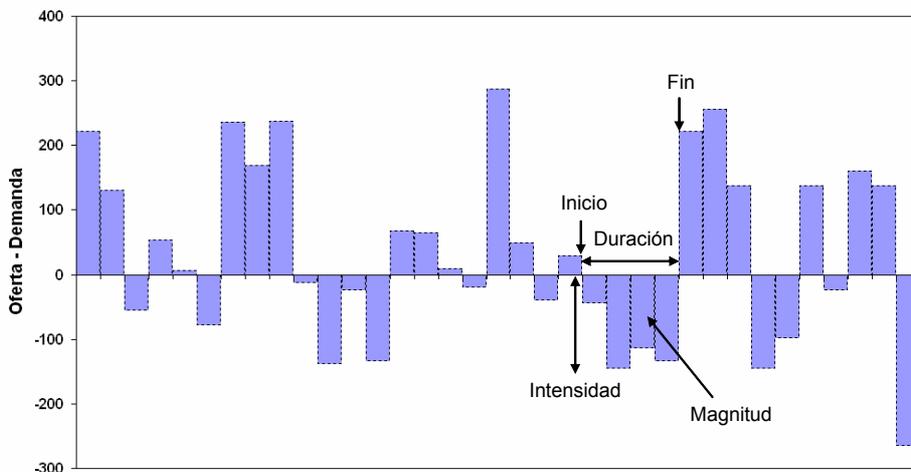


Figura 2.1 Propiedades de las sequías de acuerdo a la teoría de rachas

Si se considera que la serie cronológica en cuestión corresponde a la oferta de agua en un lugar y como el umbral, o valor de corte o truncamiento de esa serie, se considera la demanda, entonces las sucesiones negativas pueden asociarse directamente con las sequías de ese sistema en particular. Sobre esta base y considerando las definiciones de propiedades de las sucesiones, se definen las siguientes características cuantificables de las sequías:

Inicio el instante en que la condición de escasez de agua comienza a ser importante como para considerar que inicia la aparición de una sequía. En la serie de oferta menos demanda, corresponde directamente al instante de inicio de una sucesión negativa.

Término instante en el cual la escasez de agua es lo suficientemente pequeña como para que se pueda dar por terminada la sequía. En la teoría de las sucesiones corresponde al fin de una sucesión negativa.

Duración el tiempo que transcurre desde el inicio hasta el término de una sequía, o la longitud de la sucesión negativa.

Magnitud éste término en general hace referencia a la cantidad de agua faltante o al volumen de agua necesario para superar la sequía y es una medida del tamaño del evento. Se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada.

Intensidad es una medida de la severidad del evento. Algunos autores la calculan como la magnitud entre la duración de la sequía, y corresponde entonces a la intensidad promedio. En otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante la sequía. En algunos artículos aparece el término severidad para referirse tanto a la magnitud como a la intensidad o es empleado en un sentido más amplio para valorar el impacto de la sequía.

Extensión o área afectada debido a que las sequías siempre consideran un impacto regional; la extensión se refiere a la zona de una región en la cual se presenta el déficit.

Para aplicar esta herramienta, como se menciona anteriormente, es necesario definir un umbral a partir del cual se establezca que se está produciendo un déficit. Si el sistema de recursos hídricos que se analiza consta de una sola presa para el abastecimiento, este umbral corresponde a la demanda; para el caso de que el sistema esté conformado por varias presas, entonces será necesario analizar la ocurrencia del déficit para cada una de las aportaciones a las presas, de tal manera que deberán analizarse los estadísticos de las sequías de las series generadas tanto

para las presas que comprenden el sistema, de forma independiente, como para el sistema en su totalidad.

2.2.2 Identificación y caracterización por aportaciones superficiales a cada presa

Para el caso de un sistema de presas multipropósito, en el que más de una presa servirá para abastecer una demanda, se utilizan porcentajes del caudal medio mensual de aportación a cada presa como umbrales para identificar las sequías. Esto se hace para cada una de las presas del sistema. Si la demanda del sistema es cercana a la aportación media anual al mismo, entonces el umbral a utilizar será el caudal medio anual. Entre los parámetros que se pueden utilizar para determinar si las características de las series sintéticas son similares a las de las series históricas, se tiene: el número de sequías, la duración, intensidad y magnitud promedio para cada una de las series generadas; cuya longitud del registro será igual a la serie histórica.

Ahora bien, puesto que se utiliza como umbral un porcentaje del caudal medio anual de cada una de las aportaciones a las presas, las características de las sequías serán a escala anual.

2.2.3 Identificación y caracterización por aportaciones al sistema de recursos hídricos

Si existe más de un abastecimiento superficial para atender una demanda, entonces el umbral corresponde a la demanda, mientras que la disponibilidad del recurso estará integrada por la suma temporal de cada una de las aportaciones al sistema de recursos hídricos. Así, con esta información y aplicando la teoría de rachas es posible reconocer la ocurrencia de las sequías hidrológicas a las que históricamente se ha enfrentado el sistema de recursos hídricos y de la misma manera se trabaja con las series generadas y se comprueba que estas últimas reproduzcan los estadísticos básicos de las características de la serie histórica. De igual manera que para cada una de las presas, las características que se analizan son: número, duración, intensidad y magnitud de las sequías. Esta caracterización también será a escala anual.

Aunque la identificación de las sequías para el sistema se hace a escala anual, es interesante determinar las características del déficit mensual, puesto que el requerimiento del recurso obedece a una distribución mensual de la demanda anual.

Para el caso de la identificación de las sequías por presas no tiene sentido hacerlo mensualmente, pues es posible que en un mes en particular la demanda sea abastecida por uno o varios de los almacenamientos que conforman el sistema. No obstante, si se integran las aportaciones al sistema y si éste no tuviera restricciones por infraestructura para disponer de uno u otro embalse, el abastecimiento de la demanda, se podrá satisfacer, dada la ocurrencia temporal de las aportaciones. De esta manera se observa la presencia y magnitud del déficit, así como el número, duración e intensidad del mismo.

2.3 Determinar el número de series a generar

Según (Lettenmaier, 1993) y Yevjevich (1993) existen básicamente dos formas de generar series de caudales: una que consiste en obtener una serie de gran longitud y otra que consiste en obtener varias series de longitud igual a la serie histórica. Con el fin de comparar tanto los estadísticos básicos de las series como los estadísticos de sequía se propone generar varias series de longitud igual al de la histórica.

En cuanto al número de series a generar no se encontró alguna referencia al respecto, Sánchez *et al* (2001) proponen una metodología para la gestión de recursos con decisiones basadas en estimación del riesgo y analizan los estadísticos para varios grupos de series que van desde los 50 a los 5000. Cabe destacar que la longitud de las series generadas es de dos años.

En este trabajo se propone la generación de varias series de longitud igual a la histórica, de esta manera el número de series a generar se fija en función de la variabilidad que presenten los estadísticos con diferentes grupos de series y del número de sequías que se encuentren en cada serie, así como de las características de las mismas ya que para dar generalidad a la evaluación de las políticas de operación será necesario analizar el comportamiento del sistema ante al menos un grupo de 100 sequías que cumplan con las características de rangos de magnitud de las que se presenten en la serie histórica. Por ejemplo, si la serie histórica presenta 10 sequías cuyas magnitudes varían de X_1 a X_2 hm^3 por año, donde X_1 representa el límite inferior de la magnitud de las sequías históricas y X_2 el límite superior. En 50 series de longitud igual al de la serie histórica, se tendrán en promedio 500 sequías, que quizá para magnitudes cercanas al límite inferior de intervalo puedan ser suficientes este número de series, pero para magnitudes mayores sea necesario recurrir a más series.

2.4 Evaluación cualitativa y cuantitativa de las series generadas

Además de los estadísticos básicos a revisar es necesario comparar que al menos los estadísticos de orden 1 y 2 de las características de las sequías de las series sintéticas reproduzcan a los de la serie histórica, tanto a nivel de aportaciones a presas como al sistema de recursos hídricos. De tal manera, que las series que globalmente representen mejor los estadísticos antes mencionados serán las adecuadas para utilizarse en los modelos de optimización y simulación de sistemas de recursos hídricos para la determinación de las políticas de operación con restricción y su evaluación.

Una manera práctica de revisar si los estadísticos, básicos y de sequía, se preservan es a través de la representación gráfica de los mismos y su posterior inspección visual, para cotejar si los resultados del modelo son satisfactorios o no. Con objeto de cuantificar qué tan válidos son los resultados de un modelo frente a otro, existen varias medidas que cuantifican los errores o diferencias entre los estadísticos históricos y observados.

Para determinar de forma cuantitativa la diferencia entre las series generadas y las series históricas existen varias medidas, como son: la diferencia absoluta entre los estadísticos históricos y los estimados, el error estándar, el error cuadrático medio y la raíz de la desviación cuadrática media relativa. Fernández y Salas (1986) (citados por Ochoa 2002) mencionan que este índice es apropiado cuando se tiene un número importante de resultados por contrastar. Este índice se calcula a través de la ecuación 2.8

$$RRMSD = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_m} (\bar{\Psi}'_j - \Psi_j)^2 / N_m}}{\bar{\Psi}} \quad (2.8)$$

donde:

$$\bar{\Psi}'_j = \frac{1}{N_{sr}} \sum_{i=1}^{N_{sr}} \Psi'_{ji} \quad \bar{\Psi} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \Psi_j$$

Ψ'_j es el estadístico sintético

Ψ_j es el estadístico histórico

N_m es el número de meses del año

N_{sr} es el número de las series

$\bar{\Psi}$ es la media del estadístico

Después de que se ha calculado el *RRMSD* para cada uno de los estadísticos que se mencionan a lo largo de este capítulo se tendrá un conjunto de $N \times 3$ valores del *RRMSD*. En este caso N representa el número de estadísticos que se evalúan y 3 el número de métodos de generación que se analizaron. Además de los estadísticos, es conveniente analizar la estabilidad de los resultados al variar el número de series a analizar y calificar el modelo respecto a su variabilidad. Si al incrementar el número de series, los estadísticos de las series sintéticas se aproximan más a los de la serie histórica, esta variabilidad sería normal. Pero si al incrementarse el número de series, los estadísticos de las series generadas oscilan alrededor de los puntos medidos, sin mejorar los resultados, entonces será necesario penalizar la inestabilidad que presenta un método respecto a otro.

En la presente tesis, por ser un documento académico se han utilizado y comparado tres métodos de generación de series, para el caso de estudio. Sin embargo, en la práctica con un modelo que cumpla con las características que más adelante se señalan, será suficiente.

Los modelos que se utilizan son: el MASHWIN (UPV, 2002), el SeReNa (Ochoa, 2002) y el de Svanidze modificado (Arganis, 2004). Los dos primeros modelos están basados en los modelos autorregresivos de orden 1 y 2. Una descripción de estos modelos se puede consultar en el anexo "Herramientas informáticas utilizadas".

Con objeto de seleccionar el método de generación y con ello el grupo de series a utilizar en los modelos de gestión, será necesario calificar el desarrollo de cada uno de los métodos de generación ante los estadísticos que se analizan. Ahora bien, en virtud de que un valor de la *RRMSD* cercano a cero será deseable, entonces los modelos que arrojen resultados mayores de este índice serán sancionados asignándoles una valoración más alta. Dado que en este trabajo se analizan tres métodos de generación, se darán calificaciones de 1, 2 y 3; donde el valor de 1 se asigna al método que tenga el menor valor de la *RRMSD*. Esto se hará para cada uno de los estadísticos que se analicen, tanto para los estadísticos que se mencionan en la sección 2.1.3 como para las características de sequía que se consideren. Al final, si los estadísticos, que se busca que reproduzcan las series generadas, se considera que tienen la misma importancia, entonces, la calificación final del método será la suma de las valoraciones que se han asignado. En el caso de que se considere más importante reproducir un estadístico frente a otro, entonces, además de la valoración por método, habrá que definir un factor de peso para cada estadístico. En resumen, el método seleccionado será aquel cuya suma final de valoraciones sea la mínima.

3 Políticas de operación con restricción a la demanda

En este apartado se presenta la metodología propuesta para obtener políticas de operación con restricción a la demanda de forma anticipada. Este tipo de políticas tiene como objetivo el aprovechar al máximo los recursos de un sistema de embalses y/o acuíferos en épocas de baja disponibilidad hídrica. Las reglas de operación que se obtienen con la metodología maximizan el suministro agrícola, garantizando la demanda urbana e industrial.

Asimismo, una política de operación de un sistema de recursos hídricos asigna un volumen de agua a suministrar durante el periodo agrícola a través de un indicador de disponibilidad de agua, que puede ser un volumen embalsado al inicio del ciclo agrícola o la suma de éste último más una aportación. Así que se puede detectar la necesidad de establecer una racionalización del agua si el indicador que activa la restricción revela una disminución de los recursos hídricos. Una vez detectada esta condición se establece la restricción a la demanda al inicio del ciclo agrícola, con el fin de alertar a los agricultores para que puedan reajustar sus planes de riego, a efecto de disminuir el área a cultivar o para cambiar el plan de cultivos y así prevenir déficit importantes ya iniciado el ciclo agrícola, evitando que se produzcan pérdidas económicas debidas al daño que puedan sufrir los cultivos por falta de suministro.

Para poder aplicar esta metodología es necesario disponer de varias herramientas en forma integrada, como son: los modelos de generación de series sintéticas (Modelo MASHWIN, [UPV, 2002], SeReNa [Ochoa, 2002] modelo de Svanidze modificado [Arganis, 2004]), técnicas de análisis y caracterización de sequías (teoría

de rachas, [Guerrero-Salazar y Yevjevich, 1975]), modelos de optimización (OptiGes, [Andreu, 1992]) y simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos (SimGes, [Andreu *et al*, 1996]) o herramientas similares. Una descripción de estas herramientas se encuentra en el anexo “Herramientas informáticas utilizadas”.

En la figura 3.1 se presenta un esquema de la metodología que se propone. Como puede verse dentro de este proceso se recurre a información de caudales representados a través de la serie histórica y de series sintéticas generadas a partir de la histórica, así como de periodos secos identificados y caracterizados de la serie histórica y de las series sintéticas. El tipo de información seleccionada para cada uno de los procesos se representa con distintos tipos de líneas mientras que el flujo de los procesos para llegar a determinar y evaluar las reglas de operación se representa con flechas.

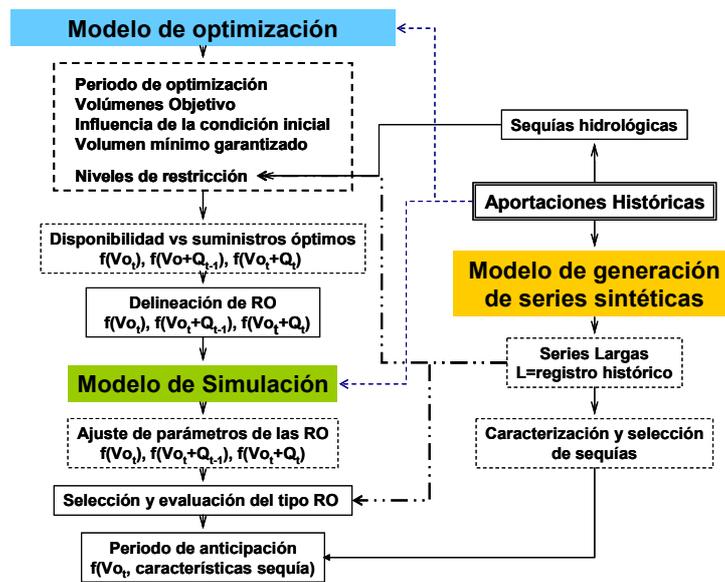


Figura 3.1 Representación esquemática de la metodología para la obtención de reglas de operación (RO) con restricción a la demanda de forma anticipada

A continuación se describe cada uno de los procesos necesarios para llegar a formular una política de operación con restricción.

3.1 Periodo de optimización

El periodo de optimización depende principalmente de la longitud del registro histórico y del objetivo para el que se utiliza el proceso de optimización. Con fines de planeación y diseño de sistemas de recursos hídricos se busca contar con longitudes mayores a 30 años, mismas que se usan como periodo de optimización, para emplear en el proceso de optimización en la demanda objetivo. Se prefieren longitudes largas de registros de caudales, debido a que mientras más largo sea el registro, es más probable que en él se encuentren distintos tipos de periodos en los que se puedan identificar rachas que vayan de muy secas a muy húmedas y viceversa, pasando por condiciones medias, es decir, habrá periodos en los que se pueda abastecer íntegramente la demanda y otros, en los que debido a la variabilidad climática no sea posible.

Ahora bien, en la determinación de las reglas de operación la optimización se puede hacer por tramos o periodos del registro histórico, de tal manera, que si se cuenta con un registro de 50 años el problema puede resolverse, por ejemplo, optimizando en un solo periodo todo el registro, lo que supone conocer de antemano la evolución de las aportaciones durante esos cincuenta años y con base en esa información, tomar decisiones o planificar la operación del sistema considerando ahora, lo que puede ocurrir en esos cincuenta años; también se puede dividir el registro en 50 años y optimizar año a año de forma secuencial, lo que nos llevaría a quedarse sin previsiones cuando se presentara una sequía o periodo seco cuya longitud fuera mayor a un año. Asimismo, se pueden tomar 25 periodos de 2 años, 10 de 5 ó 5 de 10, o las combinaciones que permita la longitud del registro.

La determinación del periodo de optimización dependerá de los usos que se quiera garantizar así como de la duración de las sequías y de la capacidad de regulación de la cuenca, por ejemplo, si se tiene que garantizar el abastecimiento urbano en una región al cien por ciento y se observa, que por la combinación de las aportaciones e infraestructuras no es posible hacerlo si se optimizan periodos de uno o dos años, entonces se debe recurrir a periodos mayores que permitan establecer volúmenes de reserva para esos usos durante los periodos de escasa disponibilidad. Es decir, mientras mayor sea la longitud de las sequías habrá necesidad de hacer más larga la anticipación y por tanto el periodo de optimización.

3.2 Definición de los volúmenes objetivo

Los volúmenes mensuales en los que es conveniente mantener a los embalses del sistema para lograr una operación óptima, son parte de los resultados que se obtienen al analizar distintos periodos de optimización, a tales volúmenes se les

denominará objetivo. La definición de éstos es similar a la zona C a la que se refieren Loucks *et al* (1981, pp. 354). Los volúmenes objetivo se obtienen después de determinar el periodo a utilizar en la optimización, ya que variarán dependiendo de la longitud del mismo, pues mientras mayor sea éste, es posible que alguna o varias presas deban mantenerse con mayor capacidad a lo largo del año o durante algunos meses en particular, para cumplir con los requisitos de abastecimiento de las diferentes demandas de los usuarios que integran el sistema. Así pues, estos volúmenes se determinan como el promedio de los volúmenes almacenados al final de cada uno de los meses, al realizarse la optimización.

Es oportuno mencionar que es deseable mantener a los embalses en los niveles o volúmenes objetivo, pero no es concluyente, ya que el abastecimiento agrícola tiene prioridad sobre el mantenimiento de los embalses en tales niveles.

3.3 Influencia de las condiciones iniciales

Los modelos de optimización, llegan a una solución que es óptima para las condiciones que inicialmente se establecen. En general, las condiciones que se fijan en un problema de análisis de sistemas de recursos hídricos son los volúmenes de almacenamiento iniciales en los embalses del sistema y las series de aportaciones.

En este apartado se presentan algunas consideraciones par analizar la influencia de las condiciones iniciales para un registro de longitud larga, como el de la serie histórica. La influencia del volumen inicial, V_{0t} , se verá más atenuada mientras más largo sea el registro a optimizar y dejará de tener importancia en el momento en el que los embalses se llenan. No obstante, es recomendable partir de situaciones promedio o cercanas a éste en el momento en que se inicia la optimización, estas condiciones medias se obtienen a través de una simulación del sistema sin establecer restricción alguna. Los volúmenes de almacenamiento promedio mensuales son un indicador para revisar la influencia de esta condición

Además de la observancia de la condición inicial respecto al volumen de almacenamiento, es interesante saber si al discretizar el registro el comportamiento del sistema es similar si se empieza la optimización en otro año diferente al del inicio del registro, para ello se puede desplazar la optimización en uno o varios años, aunque esto lleve a contar con una longitud de registro menor. Con este procedimiento se toma en cuenta la variación de la serie de aportaciones.

Es importante establecer la influencia de las condiciones iniciales ya que los indicadores que se van a utilizar para determinar la necesidad de establecer una restricción dependen de éstas.

3.4 Niveles de restricción

Cuando en el sistema de recursos hídricos se ha detectado que existen periodos en los que no es posible garantizar la demanda en su totalidad, es necesario aplicar restricciones a la demanda de manera anticipada, de tal forma que la cantidad de agua que se prevea disponer sea aprovechada al máximo y puesto que la función de pérdida económica asociada a un déficit en el suministro no es lineal, entonces es mejor tener pequeños déficit repartidos en varios intervalos de tiempo que uno agregado, ya que de esta forma se estará ofreciendo un servicio de mejor calidad, (Andrés, 1988; citado por Estrada 1994). De ahí, la necesidad de establecer restricciones a la demanda, con el fin de repartir el déficit, en ese sentido, existen diversos trabajos relacionados con el tema, como se menciona en el apartado 1.3.4.

Ahora bien, una regla de gestión debe diseñarse para que el tomador de decisiones pueda recurrir a ella cuando se enfrente a diversos escenarios de disponibilidad del recurso, en tal virtud la política de operación debe comprender todos los escenarios, considerando uno de racionalización, para cada nivel de disponibilidad inferior a aquél con el que se puede abastecer la demanda en su totalidad. Por ejemplo, si se analiza un periodo de 10 años y el ciclo agrícola es semestral, la disponibilidad del sistema tomará 20 valores.

La disponibilidad del recurso está compuesta por un volumen almacenado, ya sea por escurrimiento superficial y/o subterráneo y, por unas aportaciones esperadas dentro del periodo de gestión. Si se decide discretizar la variable disponibilidad y utilizarla como criterio de decisión en el establecimiento de restricciones a la demanda, es necesario definir el número y tamaño de los intervalos de volúmenes para los cuales se aplica una restricción. En principio no debería haber un número limitado de estos intervalos, no obstante en los trabajos consultados, este número se reduce a 3 ó 4 niveles de restricción o escalones. Esto puede deberse a la ventaja computacional que ello representa o a que los autores de tales trabajos consideran que es suficiente con este número, ya que finalmente lo que se busca es una regla de operación fácil de implementar. Ming-Yen Tu *et al* (2003) utilizan restricciones de 25 y 50% de la demanda. Jhih-Shyang Shih y Charles Revelle (1995) proponen una regla de operación con restricción discreta, que cuenta con dos niveles de restricción y uno de ellos es fijado por un organismo gubernamental, basado en una restricción máxima histórica. Otra de las cuestiones a responder es: ¿cómo se reparten esos niveles de restricción o escalones?, o ¿cuál es el momento en el que se deba tomar una restricción u otra?, a través de los procedimientos descritos en los siguientes apartados se dará respuesta a algunas de las cuestiones planteadas.

3.4.1 Determinación de los niveles de restricción

Si se dispone de un modelo de recursos hídricos de propósito general, como OptiGes (Andreu, 1992), que cuente con 3 o más niveles de restricción a la demanda, los niveles o escalones se determinan de la siguiente manera:

1. Se utiliza como volumen de almacenamiento inicial (V_{0t}) para la optimización, el volumen objetivo del mes anterior al que se toma la restricción o un porcentaje del mismo.
2. Se define el nivel o escalón correspondiente al porcentaje de restricción máxima para las condiciones de volumen embalsado y serie de aportaciones. En este caso, se inicia con restricciones máximas, por ejemplo 80 % de restricción de la demanda y se verifica que no existan fallos superiores a este nivel de restricción; si existen, la restricción debe incrementarse, si no puede relajarse. Así, el primer escalón será aquél para el que no existan fallos superiores a la restricción impuesta.
3. Se utiliza el escalón obtenido en el punto anterior en la optimización para la determinación de los otros niveles de restricción, los cuales se obtienen simultáneamente, para ello se recurre a un proceso iterativo de optimizaciones en los que se busca que el menor número de fallos se tenga para las restricciones más severas y el mayor número de fallos ocurra para las restricciones menores.

En la determinación de los niveles de restricción debe buscarse la máxima garantía volumétrica y el menor número de fallos en niveles 1 ó 2, es decir restricciones severas, por otra parte, dado que OptiGes es un programa de paso mensual y no mantiene las restricciones más allá de este periodo, entonces debe buscarse que de presentarse un déficit, éste sea el mínimo y sea uniforme durante un ciclo agrícola. Por ahora se logra mediante múltiples simulaciones.

3.4.1.1 Verificación de la validez de los niveles de restricción

La determinación de los niveles de restricción obtenidos con el procedimiento descrito en el apartado 3.4.1 se logra a través de la utilización del registro histórico, es decir, para una secuencia de entradas al sistema. Para verificar que los escalones seleccionados sean los óptimos y maximicen la operación del sistema ante diversos escenarios, no sólo los ya conocidos, es necesario comprobar la validez de la selección a través del uso de series sintéticas igualmente probables, de longitud igual al registro histórico. Es conveniente que los registros con los que se

corrobore la selección de los niveles de restricción sea igual al del histórico, ya que además de que estas series reproducirán los estadísticos, contendrán sequías de características similares a la histórica.

Para ello se utiliza nuevamente el programa de optimización con los niveles de restricción y volúmenes embalsados preestablecidos y se realiza la optimización con varias series sintéticas comprobando que las garantías de los suministros sean equivalentes a los obtenidos con las series histórica. En el caso de que la garantía volumétrica disminuya se probará con otros niveles de restricción.

3.4.1.2 Representación gráfica de los volúmenes de extracción o sueltas contra indicador para establecer una restricción

Después de tener establecidos los niveles de restricción, se representan en un gráfico, frente a algún indicador que sirva al gestor del sistema para establecer si se aplica alguna restricción. Estos indicadores generalmente son las disponibilidades del recurso, que estarán formadas por volúmenes de agua almacenados más aportaciones al sistema. Las aportaciones pueden ser datos históricos si se toman en cuenta situaciones pasadas o aportaciones probables si se trata de pronósticos. Al representar estos valores también hay que considerar en qué escala de tiempo se representan, ésta puede ser mensual, semestral, anual o la duración de un ciclo agrícola en la región en que se encuentra el sistema. Es recomendable que esta escala de tiempo sea al menos de longitud igual a un ciclo agrícola. En la figura 3.2 se presenta un ejemplo de la representación de los volúmenes de extracción más los derrames que se presentan para una serie al utilizar 3 niveles de restricción.

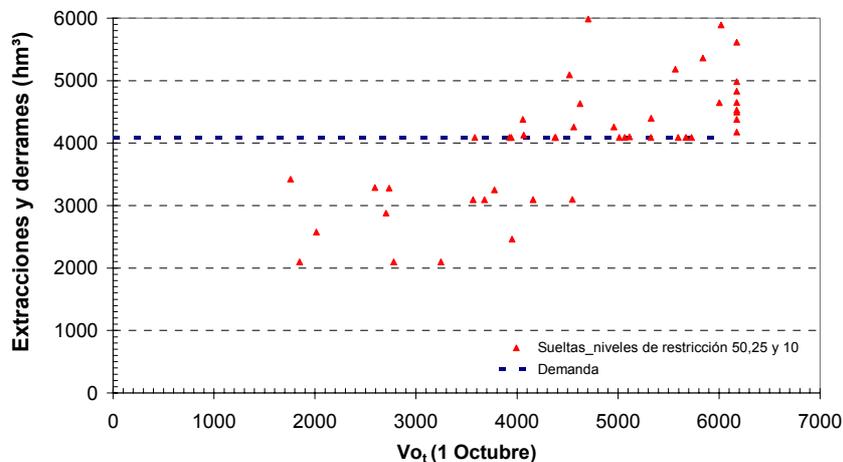


Figura 3.2 Representación gráfica de los volúmenes suministrados para distintos niveles de almacenamiento. Utilizando en la optimización tres niveles de restricción de la demanda.

3.4.1.3 Utilización de sequías para ajustar los niveles mínimos de extracción

Es posible que al optimizar el registro histórico no se llegue a cubrir esos niveles de restricción repartidos homogéneamente dentro de la función de disponibilidad versus extracción, en ese caso, se pueden seleccionar las sequías del registro histórico para poder determinar de una manera más fiable la rama inferior de la curva de la función de disponibilidad-extracción.

Una vez que se han seleccionado las sequías se recurre al proceso de optimización, donde se definirán nuevamente los escalones correspondientes a utilizar para esos periodos secos. Ya definidos los escalones, se representan los resultados en la misma gráfica en que se han representado los que se obtienen del epígrafe anterior.

En la figura 3.3 se representan los volúmenes extraídos en función de un indicador que toma en cuenta una aportación antecedente, con las mismas restricciones que se presentan para el ejemplo de la figura 3.2 y se incluyen los resultados de optimizar, por separado, dos periodos secos.

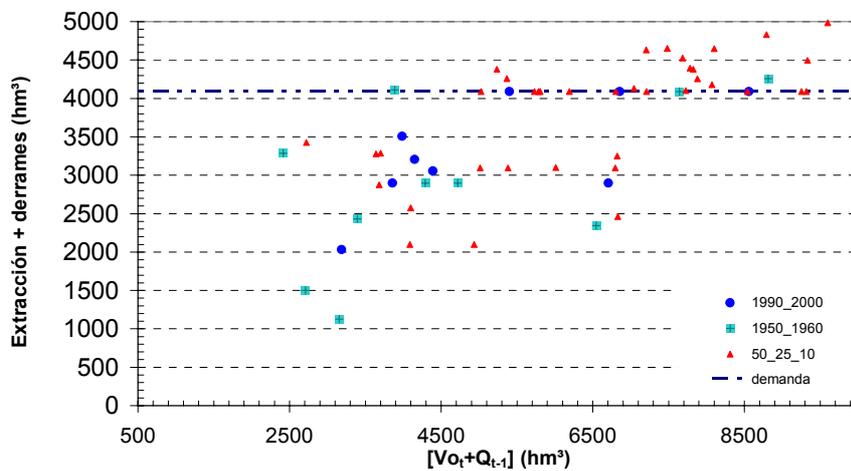


Figura 3.3 Representación gráfica de disponibilidad versus volúmenes de extracción, se incluyen los resultados de dos sequías del sistema.

3.4.1.4 Determinación del volumen de extracción mínimo garantizado

Para completar el proceso de definición de una regla de operación es necesario establecer el punto de inicio de la misma. Esto se logra determinando el volumen de extracción mínimo garantizado del sistema. La determinación de éste servirá para establecer la cantidad del recurso que se puede asignar a cultivos perennes y

corresponde a aquél volumen de agua que puede ser entregado por el sistema sin fallo alguno.

Nuevamente, el volumen se determina para un estado inicial del sistema y para una serie de aportaciones al sistema y será diferente si las condiciones cambian, por tanto es necesario verificar su cumplimiento mediante simulación. En la determinación del volumen garantizado para el caso de aplicación se utilizó el programa Sismapre (Wagner *et al* 1996), una breve descripción del mismo se puede consultar en el Anexo “Herramientas informáticas utilizadas”.

3.5 Determinación de una regla de gestión

En virtud de que en una regla de operación escalonada, con un número limitado y pequeño de niveles de restricción, existe un rango de valores de disponibilidad asociados a un solo valor de suministro, esta situación puede provocar confusión entre los usuarios y generar conflictos entre éstos y el organismo operador, ya que puede presentarse el caso en que para dos valores de disponibilidad relativamente diferentes se asigne el mismo volumen de agua. Este problema es la consecuencia de que en las políticas escalonadas no exista una relación única entre disponibilidad y suministro. Una propuesta para dar solución a este problema es la determinación de políticas de operación lineales y continuas, con base en los resultados de un modelo de optimización en el que se consideran restricciones a la demanda de forma escalonada.

En las reglas de operación lineales existe una relación única entre disponibilidad y suministro. Esto facilita la adopción de la regla de gestión por los usuarios, ya que esperarán que a mayor disponibilidad del recurso, disponer de un mayor volumen de agua para sus cultivos en cada ciclo agrícola y, a menor disponibilidad del recurso, menor volumen de agua para sus cultivos. Donde el volumen máximo a suministrar será igual a la demanda objetivo o a los derechos sobre el recurso que se tengan en el padrón de usuarios.

3.5.1 Delineación de la regla de operación

La representación gráfica de los volúmenes almacenados contra los extraídos, resultado de la optimización, para el registro histórico y para los periodos secos seleccionados de la serie de aportaciones histórica, junto con la determinación del volumen mínimo garantizado, sirve para delinear una regla de operación continua.

Esta regla de operación debe implementarse en un modelo de simulación para comprobar que los parámetros seleccionados, como son; pendientes y puntos de

inflexión de la regla de operación sean los más adecuados y en el caso de ser mejorables, ajustar estos parámetros con ayuda de un programa de simulación. Ya que dicho modelo estará mucho más detallado que otro de optimización, y por ende representará mejor al sistema real.

3.5.2 Ajuste de la regla de operación mediante simulación

Puesto que la calibración de los niveles de restricción se obtiene a través del uso de modelos de optimización, los cuales incluyen simplificaciones del sistema de recursos hídricos real, es necesario revisar la eficiencia de la regla de operación del sistema, mediante un modelo de simulación, ya que con éste tipo de modelos generalmente se puede representar de manera más fiable un sistema de recursos hídricos.

Asimismo, en las reglas de operación que se obtienen a través del procedimiento propuesto se distinguen cuatro zonas de operación, en función de la disponibilidad del sistema, a saber:

1. Suministro garantizado a usos prioritarios: abastecimiento urbano y cultivos perennes, etc.,
2. Restricción a uso agrícola: no es posible abastecer la demanda de riego en su totalidad y se establece una restricción,
3. Suministro garantizado a todos los usos: se abastece la demanda de los usos prioritarios, así como la demanda objetivo de riego, y,
4. Demandas satisfechas y derrames: se abastece la demanda completa y además se producen vertidos.

La definición de estas zonas se realiza mediante la observación del cambio en la tendencia de los valores disponibilidad-extracción, obtenidos de la optimización, esto permite establecer una primera aproximación de las pendientes de las líneas que conforman la política de operación, así como los valores de disponibilidad que establecen el inicio y fin de cada una de las zonas. En las figuras 3.4a y 3.4b se observa que para un mismo grupo de valores de disponibilidad versus extracción es posible llegar a establecer dos reglas de gestión, mediante el ajuste de los parámetros, tales como los valores de disponibilidad correspondientes al inicio y fin de alguna de las zonas de operación, en este caso la zona dos. La figura 3.4a representa una política menos restrictiva, mientras que la 3.4b otra más conservadora.

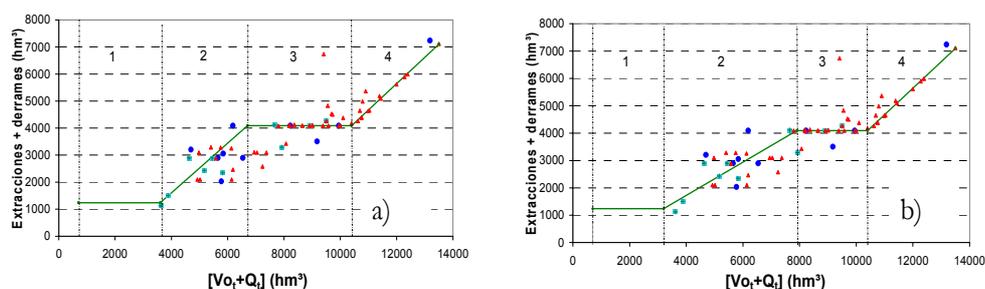


Figura 3.4 Delineación de una política de operación menos restrictiva a) y otra más restrictiva para un mismo conjunto de valores de disponibilidad vs. Extracción.

Otro de los parámetros que hay que ajustar es el volumen mínimo garantizado, si con la simulación no se logra garantizar plenamente este volumen, entonces hay que disminuir el nivel de suministro, en caso contrario, hay que probar si es posible incrementar este valor.

Para determinar cuál es la regla de operación que produce mejores resultados, o cuáles son los parámetros más adecuados, es necesario realizar varias simulaciones con la serie histórica y modificando los parámetros antes mencionados, revisar los resultados de la simulación, verificando que la garantía volumétrica sea la máxima y que el número de déficit sea el mínimo posible, buscando eliminar los déficit cuya magnitud en porcentaje de la demanda mensual supere un X % de la misma y que déficit importantes no se presenten en forma consecutiva.

3.5.3 Tipos de reglas

Para determinar la regla de gestión hay que especificar el periodo de aplicación que tendrá, que puede ser de un mes, un año, seis meses o la duración de un ciclo agrícola. Además, hay que tener presente el indicador o variable de decisión que hace que se aplique una restricción o no, éste puede ser el volumen almacenado en el sistema en el momento en que se tome la decisión, o el volumen más una aportación. De tal manera, que pueden explorarse varias reglas dependiendo del tipo de indicador o criterios de decisión a utilizar, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

3.5.3.1 Función del almacenamiento

Uno de los indicadores más comunes a utilizar es el volumen almacenado al inicio del ciclo agrícola. Así, para determinar la regla de operación en función del volumen almacenado se representan los resultados de la optimización correspondientes a los volúmenes suministrados, para cada uno de los volúmenes almacenados que se

tenían al inicio del periodo de análisis. De esta forma, si el periodo analizado o en el que se aplica la restricción, es anual, el volumen suministrado es el agregado anual y si el periodo es de seis meses, entonces, este agregado será semestral y el volumen embalsado corresponderá al volumen que se tiene en el sistema al inicio del semestre en cuestión.

3.5.3.2 Función del almacenamiento más aportación

Cada región tiene un clima asociado, por ejemplo, en México se espera que en primavera inicien las lluvias y que éstas sean más intensas y regulares en verano (Conde, 2006). Las aportaciones son una manifestación de la temporada de lluvias, por tanto, se puede utilizar la información que ofrecen las aportaciones de las épocas de lluvia, como información adicional al volumen almacenado al inicio del ciclo agrícola, para determinar si es posible disponer de más o menos recursos de los que se tienen almacenados, ya que dicha información es un indicador del posible inicio o término de una sequía.

3.5.3.2.1 Aportación antecedente

Existen varios trabajos que reportan la utilidad de contar con información antecedente como indicador en la detección de sequías, Villalobos (2007) demuestra la importancia de contar con un sistema de seguimiento de sequías, pues si se detecta oportunamente una sequía meteorológica, la cual se manifiesta como un déficit de precipitación respecto a un umbral, tendrá que transcurrir un periodo antes de que esta sequía pueda desencadenar otro tipo de sequía, el cual podría asociarse con el periodo de anticipación en la operación de un sistema, puesto que un déficit en precipitación primero se manifestará como un déficit de humedad de suelo, sequía edáfica, y posteriormente en aportaciones, sequía hidrológica, y finalmente en volúmenes almacenados en embalses, sequía operativa. Utilizando la información de los diferentes tipos de sequía en combinación con la capacidad de almacenamiento en un sistema podrá evitarse o por lo menos mitigar los efectos de una sequía operativa.

Ahora bien, si aún no se cuenta con un sistema de seguimiento, pero dado que ya se ha demostrado que la sequía es un evento que se desarrolla lentamente pudiendo abarcar varios años, es posible determinar un periodo agregado de aportaciones antecedentes con el fin de detectar si se está en una sequía y así aunque exista volumen disponible para abastecer la demanda objetivo, empezar a tomar medidas para mitigar los efectos de la sequía, dichos efectos pueden traducirse en un déficit de abastecimiento a la demanda, ya iniciado el ciclo agrícola. En climas donde el periodo de lluvias es muy concentrado, esta temporada puede ser un buen indicador. Una vez identificado el periodo de aportaciones agregadas,

que mejor represente un déficit de agua respecto al promedio de entradas al sistema, hay que corroborarlo representando en un gráfico XY los volúmenes disponibles en el sistema, compuesto por el volumen embalsado más el volumen agregado de aportaciones, contra los volúmenes a extraer, resultado de la optimización. Si del conjunto de puntos se puede inferir una regla de operación para el sistema, se ha seleccionado correctamente el periodo de agregación de aportaciones.

3.5.3.2.2 Aportación durante el periodo de análisis

También es posible definir una regla de operación que tome en cuenta las aportaciones durante el periodo de análisis. Para la serie histórica, dado que se conoce la secuencia de aportaciones, se pueden representar en un gráfico XY, los volúmenes disponibles compuestos por el volumen embalsado más el volumen de aportaciones del periodo a analizar, resultado del modelo de optimización, con el fin de establecer la relación entre los volúmenes entregados y las aportaciones registradas en dicho periodo y con ello definir una regla de operación que se pueda emplear si se cuenta con un pronóstico de aportación durante el periodo. Aunque la regla de operación tiene el inconveniente de haber sido obtenida con un pronóstico certero en cuanto a la cantidad de agua a entrar al sistema y hasta la fecha no es posible contar con tal pronóstico, puede utilizarse para hacer análisis prospectivos de los volúmenes por asignar a riego.

La regla de operación se define con la serie histórica y para su aplicación requerirá de pronósticos de variabilidad de aportaciones respecto al promedio de la serie histórica.

El procedimiento para aplicar la regla de operación sería el siguiente:

1. Al inicio del ciclo agrícola se cuenta con un porcentaje del volumen de agua disponible, para el año agrícola, este porcentaje del volumen es conocido y se refiere al volumen embalsado.
2. Por otro lado, si se quiere entregar la demanda al 100 % se determina la cantidad de agua necesaria para contar con un volumen disponible, que de acuerdo con la regla de operación permita abastecer esa cantidad, figura 3.5a.
3. Se obtiene la distribución de probabilidades de excedencia de las series generadas y se determina la probabilidad de que se iguale o exceda el volumen aportaciones anuales, necesario para abastecer la demanda objetivo, figura 3.5b.

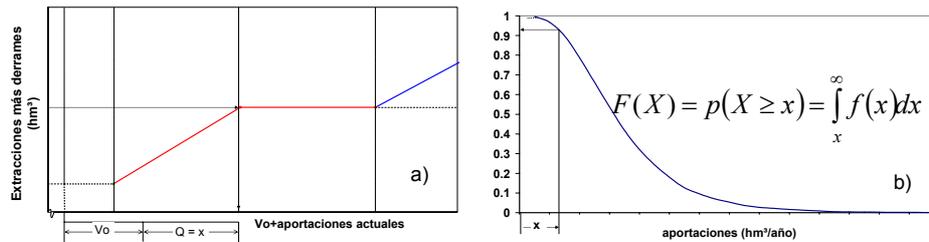


Figura 3.5 Obtención de restricciones para valores probables de aportaciones

4. Si la probabilidad de excedencia es grande y por ende, el riesgo de no contar con ese volumen es pequeño, entonces se puede asignar la demanda objetivo para riego.
5. Si el riesgo no es aceptable, entonces es necesario implementar una restricción. Esta restricción estará en función del riesgo que se asuma al estimar un volumen de aportaciones probables.

Este procedimiento también puede iniciar dada una probabilidad de que se presente al menos un volumen Q, que junto con el volumen almacenado en el sistema definen la disponibilidad para el ciclo agrícola; obtener a partir de la regla de operación el volumen de agua a asignar para riego durante ese ciclo y por ende la restricción correspondiente.

3.5.4 Comparación de los distintos tipos de políticas de operación con restricción a la demanda

En los apartados anteriores se han planteado distintos tipos de políticas de operación con restricción, éstos varían en función del indicador que se utilice para activar o no una restricción. Los indicadores son cuatro: a) el volumen almacenado al inicio del año agrícola, b) el volumen almacenado en combinación con una aportación antecedente, c) el volumen almacenado al inicio de cada ciclo, se consideran dos ciclos en el año agrícola y d) el volumen almacenado más la aportación durante el periodo de análisis.

Además del análisis de resultados de este tipo de políticas es conveniente revisar el comportamiento del sistema sin preestablecer restricción alguna, es decir, mes a mes se abastece la demanda íntegra, con el fin de contrastar la ventaja de establecer una restricción a la demanda si se detecta una disminución de los recursos a través de los indicadores que activan la restricción.

Para seleccionar el tipo de política que presente mejores resultados se simula el sistema con cada una de las reglas de operación, bajo las mismas condiciones iniciales de almacenamiento y la serie de aportaciones histórica. SimGes presenta un archivo de resultado de varias de las variables que intervienen en el modelo. Al procesar estos resultados se recomiendan los siguientes criterios para la comparación:

1. Número de fallos respecto a la demanda objetivo
2. Número de fallos respecto al volumen ofrecido al inicio del ciclo agrícola
3. Número de fallos cuya magnitud sea mayor a un X% de la demanda mensual
4. Número de fallos consecutivos cuya magnitud sea mayor a un X% de la demanda mensual
5. Volumen promedio anual de salidas del sistema (agua no utilizada)
6. Volumen promedio anual de evaporaciones
7. Garantía volumétrica del suministro
8. Distribución de probabilidad de los coeficientes de restricción a la demanda durante la simulación del sistema para un periodo igual al registro histórico, a partir de la serie histórica, en primer lugar, y posteriormente utilizando series sintéticas.

Finalmente, se selecciona la política de operación que haya mostrado el mejor desempeño de forma global, considerando todos los indicadores de la lista anterior, dando mayor peso a los indicadores relativos al menor número de déficit, cuyas magnitudes excedan un X% de la demanda mensual y que se presenten en más de un mes de manera consecutiva, es decir, al indicador relacionado con la ocurrencia de fallos consecutivos de dicha magnitud, buscando que la garantía volumétrica sea la mayor posible. Otro punto que hay que tomar en cuenta es la probabilidad de sufrir alguna restricción, en este caso, es deseable que la distribución porcentual de las restricciones esté sesgada hacia los valores de coeficientes de restricción menores.

3.6 Evaluación de las políticas

La evaluación de las políticas se realiza con las series sintéticas de longitud igual al registro histórico y con grupos de sequías extraídas de las series generadas. Es recomendable realizar la evaluación al menos con 50 grupos de series.

En el análisis de resultados los criterios que se utilizan para evaluar el comportamiento de las políticas se enlistan a continuación y excepto los dos últimos, los criterios se estiman como promedios anuales y se comparan con los de la serie histórica:

1. La evaporación del sistema
2. El suministro agrícola
3. El suministro urbano superficial
4. Las salidas del sistema
5. La garantía volumétrica en %
6. El número de meses con restricción (%)
7. El número de meses con fallo en (%)
8. La distribución porcentual de los coeficientes de restricción
9. La distribución porcentual de los fallos

Para este caso, los fallos se refieren a la existencia de déficit respecto a la asignación al inicio de la temporada.

Además de la evaluación de las políticas de operación con las series largas es necesario evaluar su desarrollo con sequías de diferentes magnitudes.

3.7 Periodos de anticipación

Cada sistema de recursos hídricos tendrá un periodo de anticipación diferente, en función de las características propias como: capacidad de almacenamiento, demandas, sequías a las que se pueda enfrentar y formas de operar el sistema. Una manera de determinar este periodo es simular el funcionamiento del sistema para distintos niveles de almacenamiento y para varios rangos de magnitud de las sequías. Por lo cual es importante contar con un grupo de sequías de magnitudes equivalentes a las que se han presentado en la serie histórica y de ser posible de mayor magnitud. Otro de los factores importantes es establecer un umbral de déficit y de racionalización que al sobrepasarse se considere que el sistema ha fallado. Por ejemplo; una sequía de uno o dos años, si se presenta cuando el sistema está lleno, es posible que no se perciba su efecto. Las sequías de duraciones más prolongadas y cuya magnitud vaya en aumento provocarán que el sistema note sus efectos a partir de los siguientes años, disminuyendo la garantía volumétrica y aumentando los periodos que requieren de una restricción.

Es recomendable utilizar los volúmenes objetivos correspondientes al final del mes anterior al inicio de la campaña o ciclo agrícola, para llevar a cabo las simulaciones ante sequías de distintas características y determinar así el periodo de anticipación del sistema.

4 Integración de la metodología. Aplicación al caso de estudio

Los trabajos realizados hasta la fecha sobre la determinación de políticas de operación con restricción a la demanda, en sistemas de recursos hídricos, generalmente han utilizado esquemas simplificados, entre ellos algunos problemas hipotéticos. En esta investigación se ha decidido utilizar un sistema de riego, localizado en el noroeste de México, que consta de cuatro embalses de almacenamiento, tres acuíferos y un conjunto de infraestructura para abastecer a uno de los distritos de riego más importantes de México, por la cantidad y variedad de productos que en él se cultivan.

4.1 Breve descripción de la zona de estudio

Las metodologías analizadas y generadas en este trabajo de investigación serán aplicadas al sistema de riego San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocarito, el cual está integrado por cuatro presas que constituyen los recursos superficiales, tres acuíferos que constituyen los recursos subterráneos, tres distritos de riego, poblaciones e industrias de la región, regulados mediante un organismo operativo. A continuación, se describirán los componentes que integran el sistema, iniciando con la ubicación del mismo.

4.1.1 Localización

La zona de estudio se encuentra localizada en la Región III Pacífico Norte, la cual se ubica geográficamente entre los paralelos 21° 38' y 28° 12' de latitud norte y los meridianos 103° 25' y 109° 28' de longitud oeste, ocupando una extensión de 156 mil 627 Km², que representa el 8% de la superficie de la República Mexicana.

De acuerdo con el Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2025 de la Región III Pacífico Norte, con fines de planeación, dicha región se dividió en 5 subregiones (CNA, 2000), figura 4.1:

- Subregión Norte (Cuencas de los Ríos El Fuerte y Sinaloa)
- Subregión Centro Norte (Cuencas de los Ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito)
- Subregión Centro Sur (Cuencas desde el Río Elota hasta el Río Cañas)
- Subregión Tuxpan (Cuencas de los Ríos Acaponeta y parte baja del San Pedro)

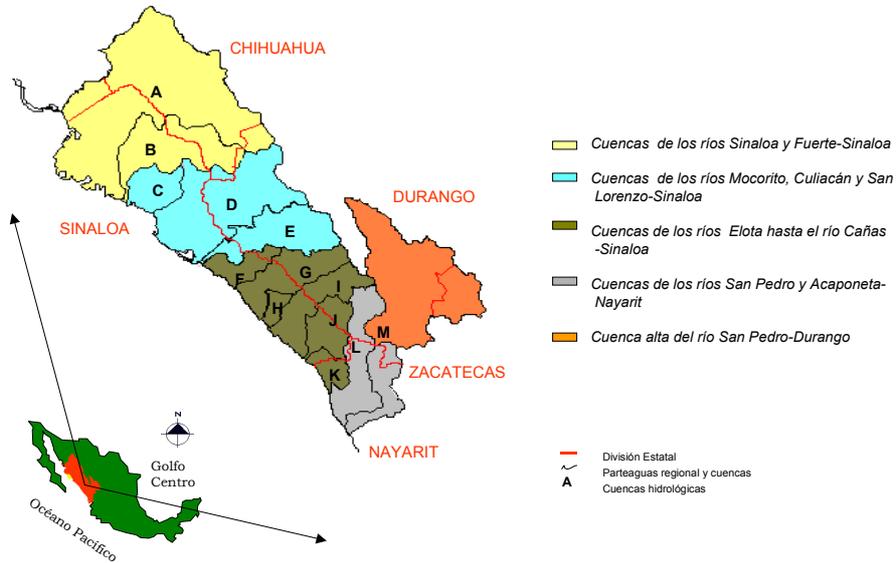


Figura 4.1 Región III Pacífico Norte (México), subregiones y cuencas que la integran

El área de estudio comprende las cuencas de la subregión Centro Norte.

4.1.2 Cuencas de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito

En la subregión Centro Norte se localiza el sistema de riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito, el cual es el principal consumidor de agua en dicha subregión. Las fuentes de abastecimiento aprovechables para la irrigación y suministro de agua son las aguas superficiales que escurren por el cauce del Río San Lorenzo y sus afluentes, las cuales son almacenadas en la presa José López Portillo; las que escurren por el Río Tamazula y sus afluentes, que son almacenadas en la presa Sanalona; las que escurren por el Río Humaya y sus afluentes, las cuales son almacenadas en la presa Adolfo López Mateos; y las que escurren en el cauce del Río Mocorito y sus afluentes, que se almacenan en la presa Eustaquio Buelna.

En la Figura 4.2 se presentan las cuencas, corrientes, vasos de almacenamiento y Distritos de Riego que integran el Sistema de Riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito. Así, como la ubicación de las principales poblaciones localizadas en la zona de estudio.

Cuenca del río Culiacán. La longitud total aproximada de su parteaguas es de 875 Km. y la cuenca total es de 22,056 km². Esta cuenca se forma por la confluencia de los ríos Tamazula (el cual nace a los 2,667 metros de altitud) y Humaya (nace a más de 3,100 msnm) que se unen en la ciudad de Culiacán; su curso es divagante, hasta el mar, con una longitud de 72 Km.; el cauce presenta poca profundidad. El tramo que recorre el Río Tamazula, desde la presa Sanalona hasta ciudad de Culiacán, resulta muy sinuoso, ya que en línea recta la distancia entre esos dos puntos es de 25 Km., pero medidos a lo largo de las sinuosidades del colector general, se convierten en 44 Km.

Cuenca del Río San Lorenzo. Su cauce mide, aproximadamente, 315 Km., hasta la desembocadura y el área total de la cuenca es de 9,522 km². Nace en la vertiente poniente de la Sierra Madre Occidental, en el estado de Durango, con origen en numerosas torrentes que localmente son conocidas como quebradas y que se inician en altitudes cercanas a los 3,000 msnm, como los cerros de Altares, Calvo Blanco y otros; su principal río formador es el llamado de “Los Remedios”, que recibe las aportaciones de los ríos San Gregorio, San Juan y de varios arroyos, como el de “El Tabaco”.

Cuenca del río Mocorito. Nace en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, en la porción llamada Sierra de Parras, en el estado de Sinaloa; su curso general, con una longitud de 95 Km., es de noreste a sureste y su desembocadura es en el Golfo de California. Sobre este río se ubica la presa Eustaquio Buelna. El río Mocorito corresponde al grupo de las corrientes menores dentro del conjunto de los

grandes ríos sinaloenses, ya que tiene apenas un recorrido total de 110 km. a lo largo del cauce principal y una cuenca total de 4,206 km².

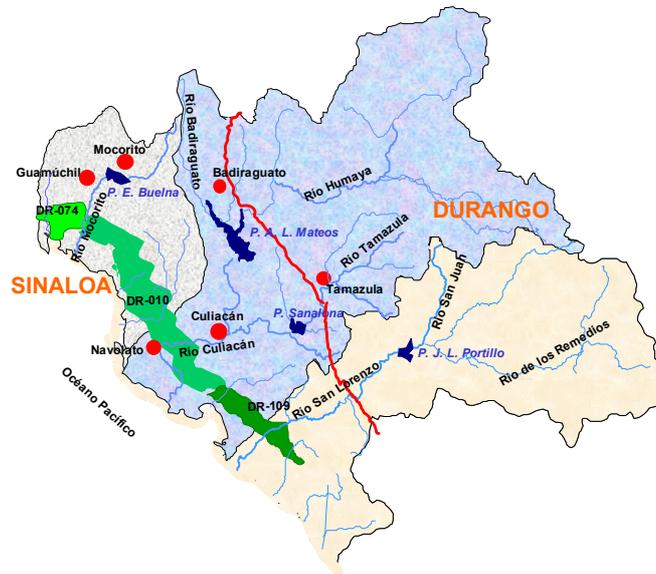


Figura 4.2 Localización de cuencas, ríos, presas, distritos de riego y poblaciones más importantes. Fuente: Programa Hidráulico Región III

4.1.2.1 Presas de almacenamiento

Las presas de almacenamiento que se encuentran en el sistema San Lorenzo – Cullacán – Humaya –Mocrorito son: José López Portillo, Sanalona, Adolfo López Mateos y Eustaquio Buelna. En la tabla 4.1 se presenta información relevante sobre las capacidades de estos embalses.

Tabla 4.1 Capacidades de los vasos de almacenamiento.

| Nombre | Capacidad hm ³ | | | |
|---------------------|---------------------------|---------|---------------------|---------|
| | Muerta | Útil | Control de avenidas | Total |
| José López Portillo | 76.6 | 2,173.4 | 1,150.0 | 3,400.0 |
| Sanalona | 39.0 | 700.9 | 315.9 | 1,055.8 |
| Adolfo López Mateos | 47.7 | 3,024.3 | 911.3 | 3,983.3 |
| Eustaquio Buelna | 17.7 | 95.0 | 190.1 | 302.8 |

Fuente: Gerencia de Distritos y Unidades de riego. CNA 2000

4.1.2.1.1 Presa José López Portillo

Se comenzó a operar en 1981 y tiene como objetivos el riego de las unidades III y VI, el control de avenidas y la generación de energía eléctrica con una capacidad instalada de generación de 90,000 Kw. La presa contiene las siguientes estructuras: cortina de materiales graduados con corazón de material impermeable compactado, obra de toma para riego y generación de energía además cuenta con vertedor de excedencias.

4.1.2.1.2 Presa Sanalona

Inició su operación en 1947, siendo sus objetivos el riego de las unidades I y II del DR-010, control de avenidas y generación de energía eléctrica en la planta General Salvador Alvarado, que cuenta con dos unidades de 7,000 Kw. de capacidad cada una. Las estructuras de la presa son: cortina de enrocamiento a talud, tres diques, obra de toma para generación, obra de toma para riego y vertedor de excedencias.

4.1.2.1.3 Presa Adolfo López Mateos

Entró en operación en 1964, con la finalidad de dar riego a las unidades IV y V del DR-010, controlar avenidas y generar energía eléctrica en la planta hidroeléctrica El Humaya compuesta por dos unidades con capacidad instalada de generación de 45,000 kW. Las estructuras que constituyen la presa son: cortina de materiales graduados, obra de toma para riego, vertedor de excedencias tipo abanico y dique.

4.1.2.1.4 Presa Eustaquio Buelna

Inició su operación en 1972 y se encuentra en las coordenadas 25° 29' 10" latitud norte y 108° 03' 53" longitud oeste de Greenwich, sobre el río Mocorito afluente del Guamúchil en el municipio de Salvador Alvarado, Sinaloa. Se utiliza para almacenar los escurrimientos del río Mocorito y sus afluentes y consolidar el riego de 12,168 ha y 24,500 ha nuevas a la derecha del río; así como proteger de inundaciones al poblado de Guamúchil. La obra está formada por una cortina principal de materiales graduados, con longitud de 2,200 m, altura máxima de 29 m y dos diques del mismo tipo; por una obra de toma en el Dique 1 a la izquierda, es un conducto de concreto reforzado, con gasto de diseño 40 m³/s; por el vertedor está localizado a la izquierda de la cortina, es de cresta recta tiene capacidad 2,170 m³/s y está controlado por cuatro compuertas radiales.

4.1.2.2 Acuíferos en la región

Las aguas subterráneas de la región las integran los acuíferos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito, los que se describen a continuación:

4.1.2.2.1 Acuífero del río San Lorenzo

Se localiza en la cuenca del Río San Lorenzo y abarca una superficie de 2,110 km². Colinda al noreste con la Sierra Madre Occidental, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con la zona del Río Culiacán y con la laguna denominada Ensenada del Pabellón. Por su ubicación, este acuífero se cataloga como costero. En la parte baja se ubica el Valle de San Lorenzo, donde se encuentra el Distrito de Riego No. 010.

En el acuífero del Río San Lorenzo existen 167 aprovechamientos, de los cuales 144 son pozos y 23 norias; su recarga media anual es de 130.0 hm³, de los cuales se extraen 34.10 hm³, principalmente para uso agrícola, agua potable, usos pecuario e industrial y tiene una disponibilidad anual de 95.90 hm³.

4.1.2.2.2 Acuífero del río Culiacán

Se sitúa en la cuenca hidrológica del Río Culiacán, en la zona central del estado de Sinaloa. De forma irregular, este acuífero colinda al norte y al este con las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, al este con la zona del Río San Lorenzo, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con los cauces del Río Culiacán y del arroyo Pericos. Esta zona geohidrológica tiene una superficie de 2,720 km². En la parte baja del acuífero se ubica el Valle de Culiacán, donde se encuentra el Distrito de Riego 010.

En la zona del valle del Río Culiacán existen 389 aprovechamientos (152 pozos y 237 norias). La profundidad de las obras varía en un rango muy amplio, desde norias de poca profundidad hasta pozos de más de 250 m, predominando una profundidad promedio de 60 a 70 m. La recarga media anual es de 200 hm³ y proviene principalmente de la infiltración de los cauces de los arroyos, ríos y de los canales artificiales construidos para fines agrícolas. Conviene resaltar que parte de la infiltración regresa a la superficie a través del sistema de drenaje, por lo que no se le considera una recarga efectiva. Esta zona se beneficia también con el agua superficial que se almacena en las presas Adolfo López Mateos, Sanalona y José López Portillo. La extracción media para uso agrícola es de 67.98 hm³ al año. El agua se emplea esencialmente en el uso agrícola, seguido de los usos doméstico, industrial y pecuario.

4.1.2.2.3 Acuífero del río Mocorito

Se sitúa en la cuenca hidrográfica del Río Mocorito, en la porción occidental del estado de Sinaloa y en la Región Hidrológica No 10; colinda al norte con la ciudad de Guamúchil y con la presa Eustaquio Buelna, al noroeste por el valle del Río Sinaloa, al noreste con la parte baja de la Sierra Madre Occidental, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con el arroyo San Rafael, ocupando una superficie de 1,180 km². En la parte baja del acuífero se ubica el Valle de Mocorito, donde se localizan los distritos de riego 010, en la margen izquierda, y el 074 en la margen derecha.

Dentro del área se encuentran 50 aprovechamientos, entre pozos y norias, con profundidades que oscilan entre los 5 y 250 m., con un promedio de 70 m. Los gastos promedios de los pozos son de 70 a 80 l/s y los diámetros utilizados en las tuberías de descarga varían entre los 20 y 30 cm. (8" y 12"). El volumen de extracción media anual para uso agrícola es de 22.38 hm³. La recarga anual es de 100 hm³, provenientes de las infiltraciones de los flancos de la sierra y de la parte alta de la planicie, así como de la infiltración vertical de la lluvia, por los retornos de riego y por la infiltración del cauce del Río Mocorito. El agua extraída se utiliza en la agricultura, para uso doméstico, pecuario e industrial.

4.1.3 Sistema de riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito

El Sistema de Riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito, de acuerdo con el Artículo 5 de su Reglamento de Operación, fue constituido por la interconexión del Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya con el Distrito de riego 074 Río Mocorito y con el Distrito de Riego 109 Río San Lorenzo.

El área de riego total de dichos distritos es de 325,850 ha., de las cuales 69,399 corresponden al DR-109, 212,141 al DR-010 y 44,310 al DR-074. Con un volumen total concesionado de 3,185.28 hm³, del cual 2945.10 hm³ provienen de las aguas superficiales y corresponde al 92.45 por ciento, cuya cifra remarca la importancia de hacer un uso eficiente de las aguas superficiales del sistema.

El reglamento de operación del Sistema San Lorenzo - Culiacán - Humaya - Mocorito, firmado en julio de 2000, considera como uno de sus objetivos, el emitir reglas y disposiciones para llevar a cabo la administración, operación, conservación, mantenimiento, rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura y, los derechos y cambios en el uso de las aguas concesionadas; así como el suministro para riego (CNA-IMTA, 2000a). Del reglamento se extrae: la distribución a los usuarios, los volúmenes concesionados y la política de operación.

Tabla 4.2 Porcentaje de distribución de aguas

| DISTRITO | PORCENTAJE DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS | |
|-----------------|-------------------------------------|--------------|
| | SUPERFICIALES | SUBTERRÁNEAS |
| Culiacán-Humaya | 65.10 | 65.10 |
| Río Mocerito | 13.60 | 13.60 |
| Río San Lorenzo | 21.30 | 21.30 |

Fuente: Reglamento, CNA 2000

Tabla 4.3 Concesión de agua potable y otros usos

| PUNTO DE CONTROL | CONCESIÓN PARA AGUA POTABLE Y OTROS USOS (hm ³) |
|---------------------------|---|
| Presa José López Portillo | 110.6 |
| Presa Sanalona | 232.8 |
| Presa Adolfo López Mateos | 146.6 |
| Presa Eustaquio Buelna | 18.3 |

Fuente: Reglamento, CNA 2000

Tabla 4.4 Concesión de agua para riego

| DISTRITO | MÓDULO | SUPERFICIE FÍSICA (ha) | CONCESIÓN DE AGUA PARA RIEGO (hm ³) | | |
|-----------------|--------|------------------------|---|-------------|----------|
| | | | Superficial | Subterránea | Total |
| Culiacán-Humaya | I-1 | 9,036 | 81.70 | 6.66 | 88.36 |
| | I-2 | 7,038 | 63.60 | 5.19 | 68.79 |
| | I-3 | 14,635 | 132.30 | 10.79 | 143.09 |
| | II-1 | 28,583 | 258.30 | 21.07 | 279.37 |
| | II-2 | 15,260 | 137.90 | 11.25 | 149.15 |
| | II-3 | 31,277 | 282.70 | 23.05 | 305.75 |
| | IV-1 | 15,863 | 143.40 | 11.69 | 155.09 |
| | IV-2 | 12,576 | 113.70 | 9.27 | 122.97 |
| | IV-3 | 9,475 | 85.60 | 6.98 | 92.58 |
| | IV-4 | 15,284 | 138.10 | 11.27 | 149.37 |
| | V-1 | 23,634 | 213.60 | 17.42 | 231.02 |
| | V-2 | 29,480 | 266.40 | 21.73 | 288.13 |
| SUBTOTAL | | 212,141 | 1,917.40 | 156.37 | 2073.77 |
| Río Mocerito | 74-1 | 25,539 | 230.80 | 18.82 | 249.62 |
| | 74-2 | 18,771 | 169.70 | 13.84 | 183.54 |
| SUBTOTAL | | 44,310 | 400.50 | 32.66 | 433.16 |
| Río San Lorenzo | III-1 | 20,835 | 188.30 | 15.36 | 203.66 |
| | III-2 | 10,344 | 93.50 | 7.62 | 101.12 |
| | VI-1 | 16,435 | 148.50 | 12.11 | 160.61 |
| | VI-2 | 21,785 | 196.90 | 16.06 | 212.96 |
| SUBTOTAL | | 69,399 | 627.20 | 51.15 | 678.35 |
| TOTAL | | 325,850 | 2,945.10 | 240.18 | 3,185.28 |

Fuente: Reglamento, CNA 2000

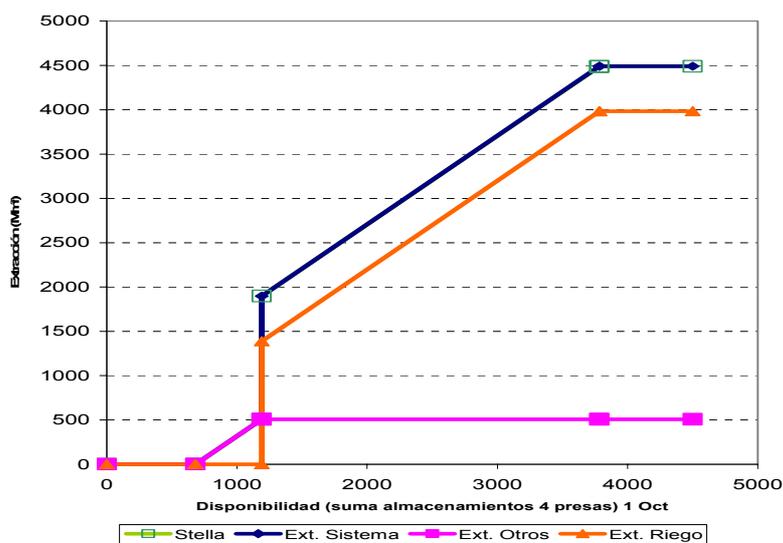


Figura 4.3 Política de Operación del Reglamento

Es importante señalar, que la decisión de cuanta agua se entregará a los usuarios se realiza cada inicio de año agrícola, es decir, cada primero de Octubre la CNA determina la disponibilidad de agua en función de los almacenamientos que se tengan en las presas hasta esa fecha, las aportaciones de corrientes superficiales que se espera tener durante ese año y los volúmenes de aguas subterráneas u otras fuentes de abastecimiento que se puedan aprovechar. Con base en ello los usuarios formulan sus planes de riegos y determinan que superficie, pueden abrir a cultivo (CNA-IMTA-CEDEX, 2000).

La política de operación del reglamento establece que si el primero de octubre no se tiene almacenado en el sistema al menos 1190 hm³, entonces no se destinará agua para riego. Este volumen se reserva para satisfacer las demandas de agua potable y otros usos y se considera suficiente para dos años consecutivos, aún cuando no hubiera aportaciones en este periodo.

Por otra parte, si se tiene más de 1190 hm³ y menos de 3784 hm³ se extraerá de las presas para agricultura el volumen que se tenga en el sistema +199 hm³ y si el sistema se encuentra por arriba de los 3784 hm³, se extraerá un máximo de 4491.9 para satisfacer la concesión que se tiene para los tres distritos que es de 2945.1 hm³

4.2 Recopilación de la información

Para la elaboración de este trabajo se requirió de cierta información básica, la cual ha sido clasificada en tres grupos: fuentes de abastecimiento, usos y organismo operador

4.2.1 Fuentes de abastecimiento

a) *Superficial;*

1. Registros históricos mensuales de las entradas a las presas.
2. Curvas elevación-áreas - capacidades de las presas.
3. Registros históricos de las láminas de evaporación mensual neta en los vasos.
4. Almacenamientos de las presas al 1º de octubre.
5. Capacidad muerta, útil y de regulación de las presas.

En cuanto a la información de aportaciones se cuenta con 52 años de registro histórico para la generación y los modelos de optimización. Los volúmenes anuales de aportación a las presas se presentan en las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. Aquí, se presentan los volúmenes anuales, sin embargo, para la generación de las series sintéticas y la alimentación de los modelos se utilizaron series mensuales.

En la figura 4.8 se presenta el volumen de aguas superficiales disponible en el sistema San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocerito, durante el periodo 1948-2000, representado por la suma de las aportaciones de los cuatro ríos.

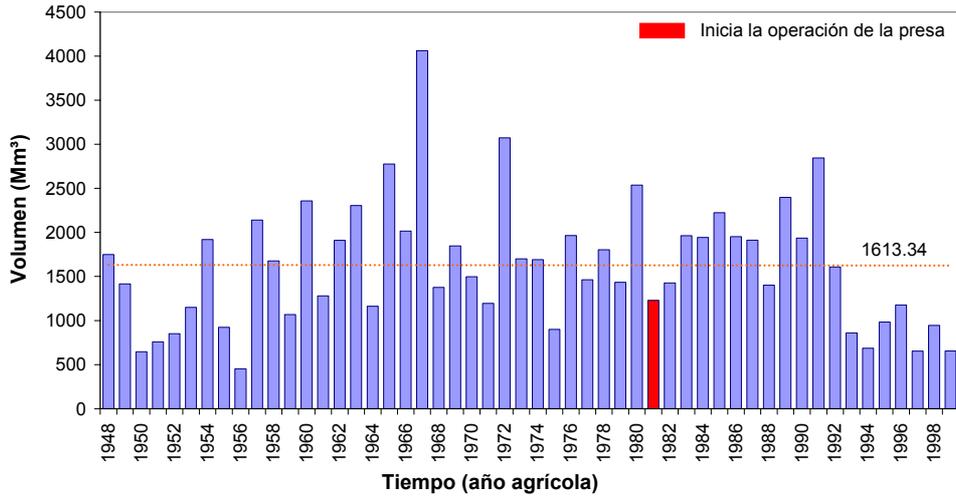


Figura 4.4 Escurremientos históricos registrados en el sitio de la presa José López Portillo

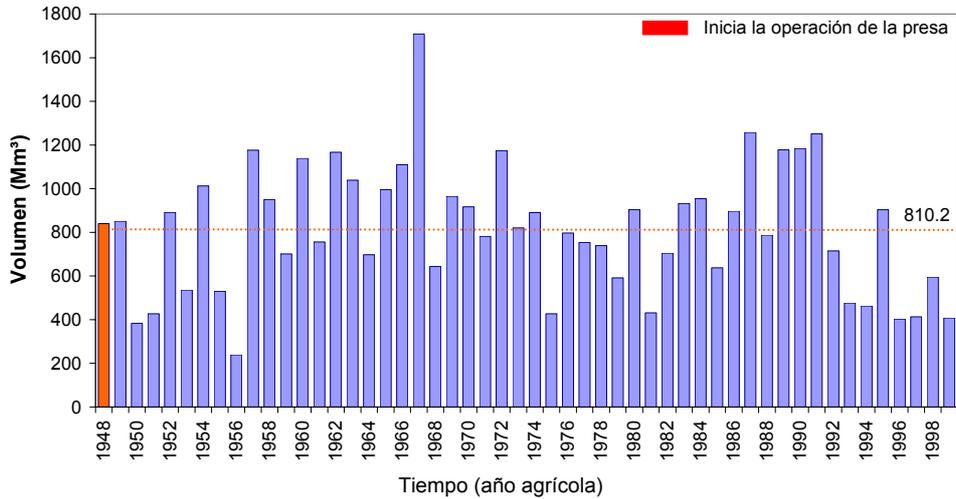


Figura 4.5 Escurremientos históricos registrados en el sitio de la presa Sanalona

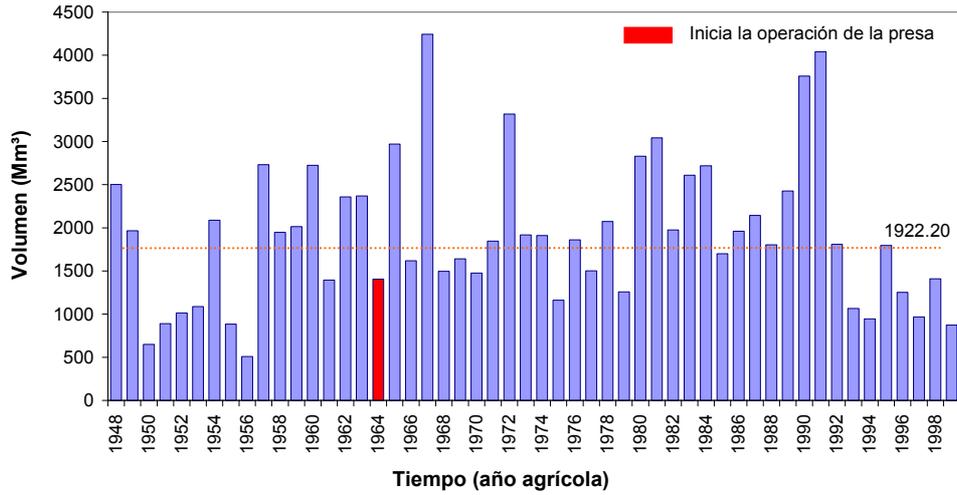


Figura 4.6 Escurreimientos históricos registrados en el sitio de la presa Adolfo López Mateos

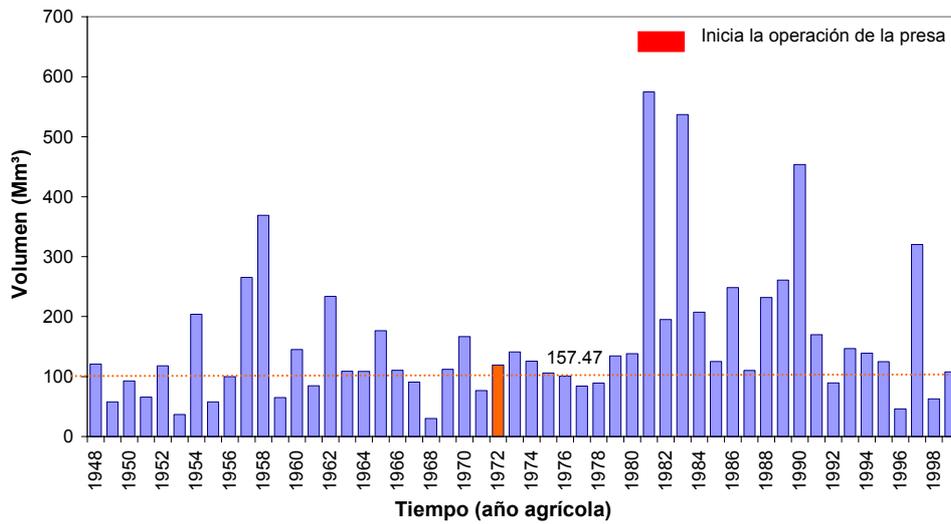


Figura 4.7 Escurreimientos históricos registrados en el sitio de la presa Eustaquio Buelna

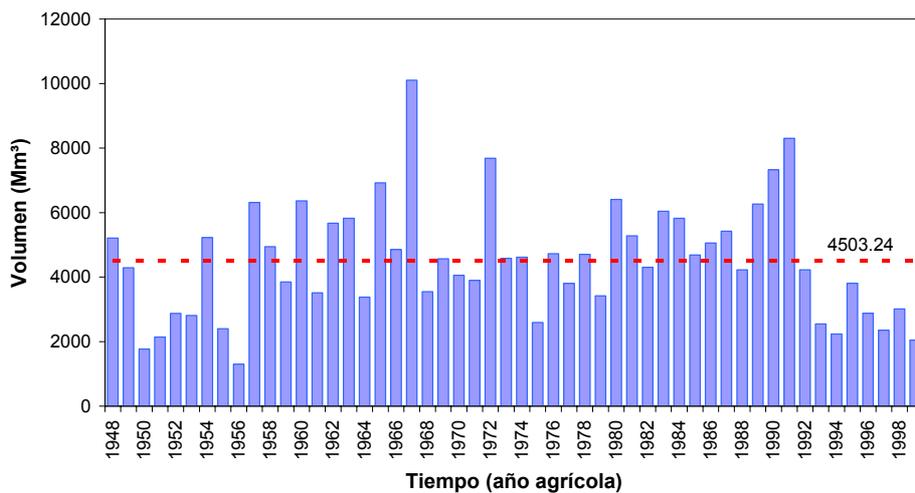


Figura 4.8 Escurrimiento superficial integrado por las cuatro presas del sistema

b) *Subterránea:*

1. Recarga media anual de los acuíferos.
2. Extracción media anual.
3. Volumen concesionado anual.
4. Disponibilidad media anual.

4.2.2 Usos del agua en la región

a) *Agrícola:*

1. Proporción de los volúmenes de agua superficial concesionada por distrito de riego.
2. Volúmenes de agua subterránea concesionada por distrito de riego.
3. Distribución temporal de la demanda, tabla 4.5.

Tabla 4.5 Volúmenes de extracción y concesión para los tres distritos en hm³

| | Extracción a las presas | | | Concesión | | |
|------------|-------------------------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| | DR 109 | DR 010 | DR 074 | DR 109 | DR 010 | DR 074 |
| Octubre | 47.51 | 74.16 | 8.72 | 35.11 | 54.80 | 6.44 |
| Noviembre | 67.87 | 184.61 | 23.51 | 50.15 | 136.43 | 17.37 |
| Diciembre | 70.41 | 222.73 | 36.18 | 52.04 | 164.60 | 26.74 |
| Enero | 77.20 | 195.50 | 67.17 | 57.05 | 144.48 | 49.64 |
| Febrero | 80.59 | 323.33 | 78.16 | 59.56 | 238.94 | 57.76 |
| Marzo | 78.90 | 341.48 | 74.16 | 58.31 | 252.35 | 54.80 |
| Abril | 86.53 | 239.58 | 67.93 | 63.95 | 177.05 | 50.20 |
| Mayo | 106.89 | 217.28 | 55.25 | 78.99 | 160.57 | 40.83 |
| Junio | 102.65 | 268.62 | 50.59 | 75.86 | 198.51 | 37.39 |
| Julio | 57.69 | 115.38 | 14.03 | 42.63 | 85.27 | 10.37 |
| Agosto | 36.48 | 237.77 | 30.33 | 26.96 | 175.71 | 22.42 |
| Septiembre | 35.63 | 172.43 | 35.64 | 26.33 | 127.42 | 26.34 |
| Total | 848.36 | 2592.87 | 541.67 | 626.94 | 1916.13 | 400.30 |

b) *Potable:*

1. Número de habitantes por cuenca y tipo de población (proyección para el horizonte de planeación)
2. Dotación por tipo de población y región.
3. Proporción del agua superficial utilizada para abastecer la demanda de agua potable, para cada cuenca.
4. Proporción de los volúmenes de agua subterránea para abastecer la demanda de agua potable.

Los volúmenes de demanda urbana mensual al inicio y final del periodo de simulación, se obtuvieron con información de dotaciones, coberturas y población del programa Hidráulico de gran visión 2001- 2003, (CNA, 2000). Los valores obtenidos para las tres cuencas se presentan en la tabla 4.6

Tabla 4.6 Volúmenes mensuales demanda urbana en hm³

| Cuenca | Demanda |
|-------------|---------|
| Culiacán | 12.5 |
| San Lorenzo | 0.18 |
| Mocorito | 1.38 |

c) *Industrial:*

1. Demanda de agua para industria.
2. Fuentes de abastecimiento.
3. Distribución temporal de la demanda.

Al igual que para las demandas urbanas, para determinar la demanda de agua industrial en las tres cuencas se utilizó la información del programa hidráulico de

gran visión 2001-2003, relativa al volumen de agua utilizado actualmente y a las tasas de crecimiento esperadas para la industria en el periodo de 20 años.

Tabla 4.7 Volúmenes mensuales demanda industrial en hm³

| Cuenca | Demanda |
|-------------|---------|
| Culiacán | 4.63 |
| San Lorenzo | 0.83 |

d) *Energía eléctrica*; niveles mínimos de las presas para generación de energía eléctrica.

4.2.3 Organismo operador

1. Prioridades para satisfacer las demandas.
2. Distribución mensual de la demanda.
3. Eficiencia de operación del sistema.
4. Capacidades de los canales de conducción.

La diferencia entre la extracción a las presas del sistema y la concesión, tabla 4.5, se debe a la eficiencia en el mismo, que es de 0.739.

4.3 Modelo conceptual

La formulación del modelo parte del conocimiento de los elementos que intervienen en el sistema, las interconexiones entre ellos y su operación en forma conjunta. La primera fase en la formulación consiste en identificar las fuentes de abastecimiento del recurso, así como a los principales usuarios para representarlos en el mismo.

Las dos fuentes principales de abastecimiento que existen en la región son las aguas superficiales y las subterráneas; dentro de las aguas superficiales se cuenta con las aportaciones de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito, regulados por las presas: José López Portillo, Sanalona, Adolfo López Mateos y Eustaquio Buelna y, dentro de las aguas subterráneas con los acuíferos: San Lorenzo, Culiacán y Mocorito.

Los principales usuarios de la región son los distritos de riego 109, 010 y 074, las poblaciones rurales y urbanas de la región, la industria, el ambiente y, la Comisión Federal de Electricidad, aunque este último no representa un uso consuntivo.

La segunda etapa de la formulación del modelo consistió en definir de qué manera interactúan los usuarios para poder compartir el recurso, así como la prioridad en la

utilización del mismo. La Comisión Nacional del Agua es la encargada de la operación del sistema, para ello cuenta con un reglamento de operación que está en vigencia desde julio del año 2000. Un esquema del modelo conceptual del sistema se presenta en la Figura 4.9, (Villalobos *et al*, 2002)

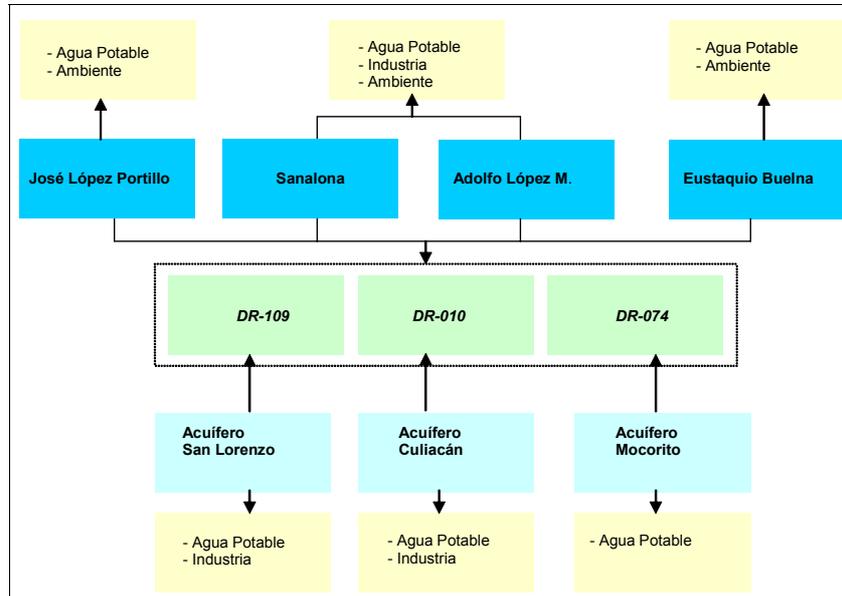


Figura 4.9 Esquema del sistema San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocerito

4.4 Análisis de la serie histórica y de las series generadas

En este apartado se presentan los resultados de los análisis estadísticos que se realizaron a las series históricas y sintéticas. En este trabajo se generaron distintos grupos de series a partir de los métodos descritos en el capítulo 2, así que se presentan los resultados de los estadísticos obtenidos aplicando las tres metodologías y se comparan con los de la serie histórica.

4.4.1 Estadísticos de la serie histórica

Los estadísticos que se presentan corresponden a las aportaciones a cada una de las presas: ALM corresponde a la presa Adolfo López Mateos, SAN a la presa Sanalona, JLP a José López Portillo y EB a Eustaquio Buelna. L INF y L SUP se refieren a los límites de Snedecor y Cochran (1967) para determinar si una serie cumple con el criterio de normalidad, obtenido a través del estimador del estadístico de tercer orden, sesgo. En la tabla 4.8 se presentan los estadísticos anuales de primero, segundo y tercer orden de las series de aportaciones históricas. Las tablas

4.9 a 4.12 presentan los estadísticos de las series mensuales para cada una de las presas del sistema.

Tabla 4.8 Estadísticos anuales de la serie histórica, valores en hm³

| ESTACIÓN | MEDIA | DV típica | SESGO | L INF | L SUP |
|----------|---------|-----------|-------|--------|-------|
| JLP | 1613.34 | 707.67 | 0.89 | -0.644 | 0.644 |
| SAN | 810.24 | 292.15 | 0.38 | -0.644 | 0.644 |
| ALM | 1891.59 | 826.71 | 0.88 | -0.644 | 0.644 |
| EB | 157.52 | 115.61 | 2.08 | -0.644 | 0.644 |

Tabla 4.9 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones JLP, valores en hm³

| MES | MEDIA | DV típica | SESGO | L INF | L SUP |
|-----|--------|-----------|-------|--------|-------|
| OCT | 157.83 | 136.03 | 1.49 | -0.644 | 0.644 |
| NOV | 60.12 | 76.55 | 4.63 | -0.644 | 0.644 |
| DIC | 97.26 | 135.77 | 3.08 | -0.644 | 0.644 |
| ENE | 120.77 | 157.89 | 2.31 | -0.644 | 0.644 |
| FEB | 54.22 | 72.68 | 2.87 | -0.644 | 0.644 |
| MAR | 40.49 | 56.86 | 3.50 | -0.644 | 0.644 |
| ABR | 26.52 | 42.12 | 5.19 | -0.644 | 0.644 |
| MAY | 17.82 | 19.18 | 1.39 | -0.644 | 0.644 |
| JUN | 31.38 | 26.78 | 1.97 | -0.644 | 0.644 |
| JUL | 218.75 | 136.90 | 1.36 | -0.644 | 0.644 |
| AGO | 392.26 | 232.43 | 1.28 | -0.644 | 0.644 |
| SEP | 395.92 | 281.92 | 1.44 | -0.644 | 0.644 |

Tabla 4.10 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones SAN, valores en hm³

| MES | MEDIA | DV típica | SESGO | L INF | L SUP |
|-----|--------|-----------|-------|--------|-------|
| OCT | 74.65 | 82.96 | 1.84 | -0.644 | 0.644 |
| NOV | 24.73 | 32.00 | 2.85 | -0.644 | 0.644 |
| DIC | 38.48 | 54.33 | 2.84 | -0.644 | 0.644 |
| ENE | 43.66 | 74.74 | 2.74 | -0.644 | 0.644 |
| FEB | 16.61 | 28.03 | 3.49 | -0.644 | 0.644 |
| MAR | 10.42 | 16.91 | 3.51 | -0.644 | 0.644 |
| ABR | 7.53 | 13.05 | 3.93 | -0.644 | 0.644 |
| MAY | 4.03 | 4.40 | 1.72 | -0.644 | 0.644 |
| JUN | 15.98 | 23.67 | 3.21 | -0.644 | 0.644 |
| JUL | 153.04 | 112.10 | 2.13 | -0.644 | 0.644 |
| AGO | 223.08 | 105.21 | 0.96 | -0.644 | 0.644 |
| SEP | 198.03 | 135.35 | 1.40 | -0.644 | 0.644 |

Tabla 4.11 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones ALM, valores en hm³

| MES | MEDIA | DV típica | SESGO | L INF | L SUP |
|-----|--------|-----------|-------|--------|-------|
| OCT | 161.94 | 173.86 | 1.73 | -0.644 | 0.644 |
| NOV | 70.19 | 98.22 | 3.67 | -0.644 | 0.644 |
| DIC | 128.93 | 197.93 | 3.40 | -0.644 | 0.644 |
| ENE | 180.23 | 285.38 | 2.20 | -0.644 | 0.644 |
| FEB | 79.09 | 126.17 | 2.71 | -0.644 | 0.644 |
| MAR | 47.41 | 79.57 | 3.45 | -0.644 | 0.644 |
| ABR | 24.10 | 48.52 | 6.42 | -0.644 | 0.644 |
| MAY | 17.32 | 14.79 | 0.89 | -0.644 | 0.644 |
| JUN | 39.62 | 45.99 | 3.33 | -0.644 | 0.644 |
| JUL | 289.11 | 180.96 | 1.68 | -0.644 | 0.644 |
| AGO | 440.64 | 226.00 | 0.87 | -0.644 | 0.644 |
| SEP | 413.03 | 302.74 | 1.59 | -0.644 | 0.644 |

Tabla 4.12 Estadísticos mensuales, serie de aportaciones EB, valores en hm³

| MES | MEDIA | DV típica | SESGO | L INF | L SUP |
|-----|-------|-----------|-------|--------|-------|
| OCT | 15.46 | 35.88 | 4.76 | -0.644 | 0.644 |
| NOV | 3.48 | 6.24 | 3.30 | -0.644 | 0.644 |
| DIC | 4.44 | 16.00 | 6.68 | -0.644 | 0.644 |
| ENE | 4.35 | 11.94 | 3.82 | -0.644 | 0.644 |
| FEB | 1.56 | 3.48 | 4.29 | -0.644 | 0.644 |
| MAR | 1.14 | 1.78 | 2.25 | -0.644 | 0.644 |
| ABR | 0.40 | 0.64 | 2.11 | -0.644 | 0.644 |
| MAY | 0.41 | 0.74 | 2.26 | -0.644 | 0.644 |
| JUN | 1.42 | 4.62 | 6.35 | -0.644 | 0.644 |
| JUL | 29.60 | 48.45 | 4.23 | -0.644 | 0.644 |
| AGO | 51.97 | 41.47 | 1.97 | -0.644 | 0.644 |
| SEP | 43.28 | 57.27 | 3.19 | -0.644 | 0.644 |

Para determinar la correlación espacial entre los ríos que conforman el sistema se determina la matriz de correlaciones que, se presenta a continuación:

Matriz de correlaciones cruzadas de orden cero.

| | ALM | SAN | JLP | EB |
|-----|------|------|------|------|
| ALM | 1.00 | 0.88 | 0.90 | 0.59 |
| SAN | 0.88 | 1.00 | 0.87 | 0.62 |
| JLP | 0.90 | 0.87 | 1.00 | 0.52 |
| EB | 0.59 | 0.62 | 0.52 | 1.00 |

En la figura 4.10 se muestra la autocorrelación anual de las series históricas de cada presa. Las líneas negras punteadas son los límites de Snedecor y Cochran (1967) para determinar si una serie cumple con el criterio de normalidad.

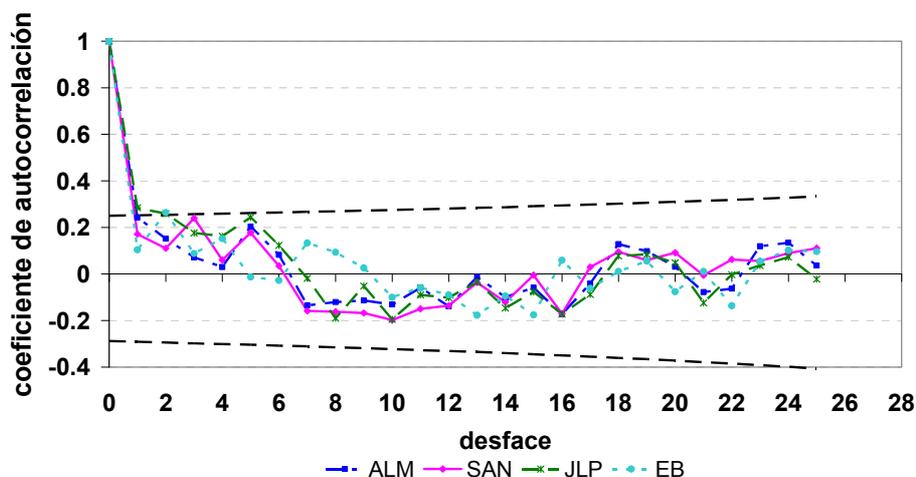


Figura 4.10 Coeficientes de autocorrelación anual.

De los resultados anteriores se puede destacar lo siguiente:

1. De la matriz de correlaciones cruzadas se observa que existe una fuerte correlación entre las aportaciones a las presas de mayor capacidad y menor correlación con Eustaquio Buelna.
2. De la figura 4.10, autocorrelación anual, se observa que para un límite de confianza del 95%, no existe dependencia en las series anuales históricas, sin embargo las series mensuales si presentan correlación en los primeros desfases, por este motivo se usaron los modelos autorregresivos en las series mensuales.
3. Las series históricas son sesgadas, por lo que para utilizar los modelos autorregresivos que están basados en la hipótesis de normalidad, es necesario normalizarlas.

4.4.2 Modelos estocásticos

Como se menciona en el capítulo 2, se utilizan tres herramientas para la generación de las series. Dos de ellas, el modelo MASHWIN y el modelo SeReNa se basan en modelos autorregresivos, que se fundamentan en hipótesis de normalidad que, como se ha demostrado la serie histórica no cumple, por lo que fue necesario hacer un preproceso a los datos para usar estas herramientas. Ambas herramientas

cuentan con el mismo módulo de preproceso de datos, así que éste fue el mismo en los dos modelos. En el caso del método de los hidrogramas mezclados no se recurre a la hipótesis de normalidad, el proceso de generación fue diferente y se describe en el título 4.4.2.2.

4.4.2.1 Modelos autorregresivos

Dado que no hay correlación anual se procedió a trabajar con las series mensuales. Las series de aportaciones mensuales históricas son sesgadas por lo que se procedió a normalizarlas. Se utilizaron cuatro funciones normalizadoras: la función raíz cuadrada, lognormal, doble logaritmo y una exponencial. Siendo la función lognormal la que mejores resultados presentó para la serie de datos históricos.

En el caso de las aportaciones a Eustaquio Buelna hay meses en los que aún usando otras funciones normalizadoras, no fue posible cumplir con los límites de Senedecor y Cochran, y los resultados de las series sintéticas no reprodujeron el comportamiento del río.

Por otro lado, la correlación de Mocorito, que es el río que aporta a la presa Eustaquio Buelna, con los otros tres ríos es baja y las aportaciones al embalse son de otro orden de magnitud. Por esta razón, aún cuando el sistema de presas es en paralelo, se decidió utilizar el modelo de desagregación espacial de Lane para preservar mejor la correlación entre los tres ríos más caudalosos. De tal manera, que se obtuvieron las aportaciones de Mocorito a partir de San Lorenzo, Tamazula y Humaya. Con ello se consiguió reproducir mejor los estadísticos de las aportaciones a los cuatro embalses.

Con la herramienta MASHWIN se pueden obtener tres modelos: AR1, AR2 y ARMA (1,1), los tres con o sin desagregación espacial y temporal. Para el caso de estudio se obtuvieron series con los tres modelos. Al comparar los correlogramas con los de la serie histórica, el que mejores resultados presentó fue el modelo autorregresivo de orden 2. Por ello los resultados que se presentan corresponden a este modelo.

En cuanto al análisis de los modelos con el índice general de parsimonia, con el modelo AR2 se tienen 27 parámetros y 5 para la desagregación espacial, además se requiere de 96 parámetros para la tipificación, que dan un total de 128. Si se cuenta con: $52 \times 12 \times 4 = 2496$ datos, entonces, el índice de parsimonia es de 19.5 valor suficiente para usar este tipo de modelos, según Salas *et al* 1980.

4.4.2.2 Hidrogramas mezclados

Para la aplicación de esta metodología al caso de estudio, primero se determinaron las correlaciones entre cada uno de los meses de la serie histórica, la correlación mínima se presentó entre los meses de mayo y junio. Así, que se agruparon las series anuales en años hidrológicos de junio a mayo. Posteriormente, se calculó el volumen total anual del sistema para cada año del registro histórico. Esta serie de datos anuales se ajustó a una función de distribución de probabilidad, para ello se utilizó el programa AX (Jiménez, E.M 1996).

La función de distribución de probabilidad que presenta mejores resultados fue una lognormal de dos parámetros, obtenidos mediante máxima verosimilitud. Los valores de estos parámetros son: $\alpha=8.3156$ y $\beta=0.447$, los cuales se utilizan para generar las series sintéticas.

La generación de las series sintéticas se realizó mediante el desarrollo de una rutina de programación en el lenguaje *Visual basic*. Para el manejo de los conjuntos de series generadas y la determinación de sus estadísticos fue necesario el desarrollo de otro programa, en el mismo lenguaje de programación.

Las series se generan en el mismo formato que requiere tanto el programa OptiGes como SimGes, para facilitar su inclusión en los programas.

La longitud de los registros de aportaciones de la serie histórica con la que se trabajo en el desarrollo de esta tesis es de 52 años. Para la implementación de este método fue necesaria la mutilación de dos años. El primero, porque se necesitaban agrupar volúmenes anuales de junio a mayo y el registro que se tenía iniciaba en octubre y el segundo año, se pierde porque una vez generadas las series se vuelven a reagrupar de octubre a septiembre, ya que octubre es el mes en que se toma la decisión de cuanta agua se destina a riego.

4.4.2.3 Evaluación de los estadísticos de las series generadas

Para dar respuesta al número de series a generar para utilizarlas en la definición y análisis de reglas de gestión con restricción a la demanda de forma anticipada se generaron y analizaron, posteriormente, grupos de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 y 5000 series, cada una con una longitud de 50 años, ya que aunque se contaba con 52 años de registro, al aplicar la metodología de los hidrogramas mezclados se perdieron dos años. Así, que para hacer comparables los tres métodos, todas las series generadas tienen una longitud de 600 meses.

A continuación, se presentan los estadísticos de primero, segundo y tercer orden de los caudales generados para cada una de las presas del sistema y para cada uno de los métodos. Las medias de las aportaciones mensuales de los distintos grupos de series se presentan en las figuras 4.11 a 4.13. En los mismos gráficos se presentan los promedios mensuales de la serie histórica. De igual manera, en las figuras 4.14 a 4.16 se presentan las desviaciones típicas y en las figuras 4.17 a 4.19 el coeficiente de asimetría o sesgo.

4.4.2.3.1 Aportaciones medias

En las figuras 4.11 a 4.13 se observa que la variación, entre los distintos grupos de series, para la estimación de la media es mínima. Sólo en el caso de utilizar el modelo de redes neuronales, si se utilizan 50 series hay variación entre este grupo y los siguientes. Por lo que se refiere a la reproducción del estadístico, el método que mejor lo reproduce es el AR2.

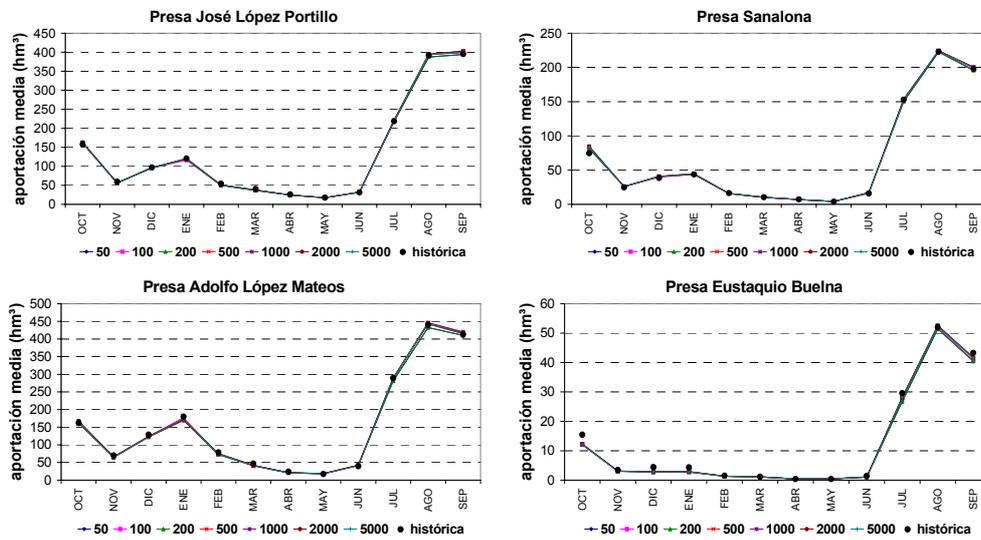


Figura 4.11 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema.

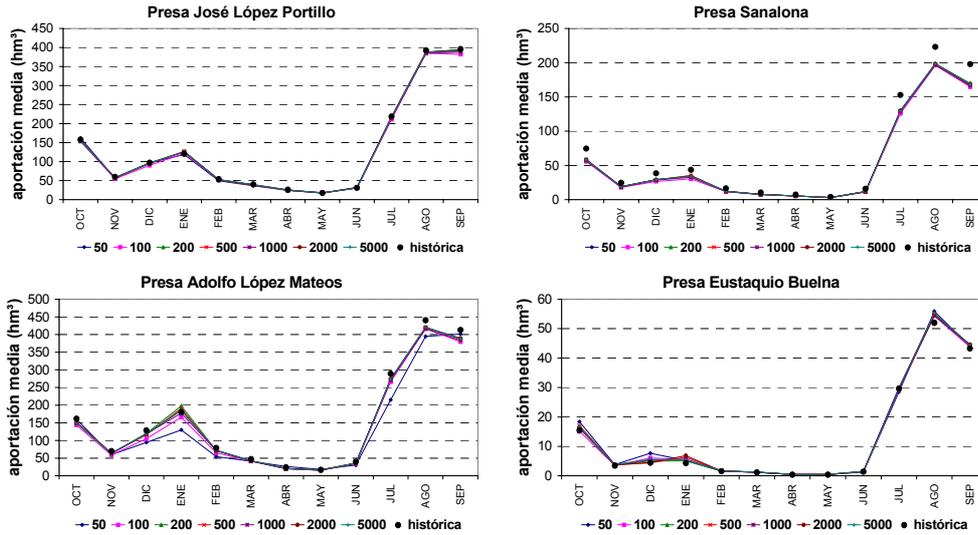


Figura 4.12 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema.

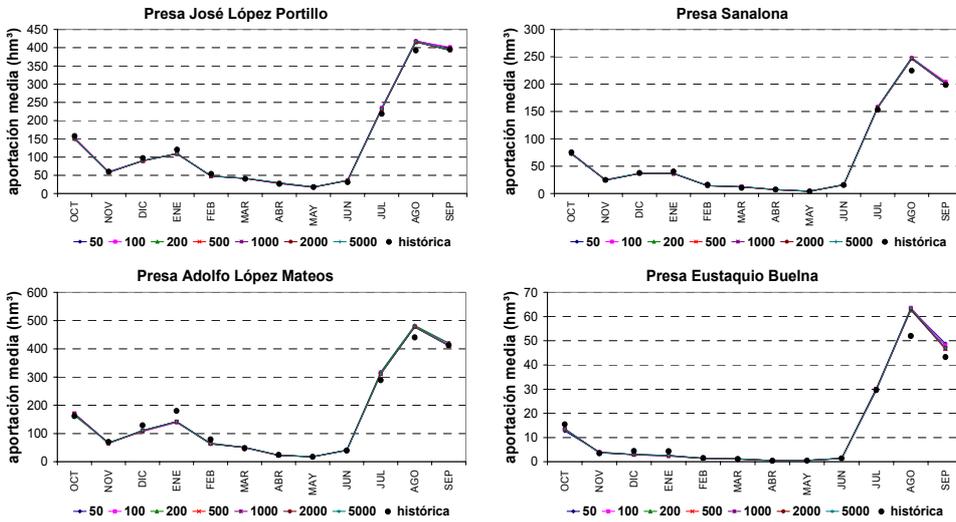


Figura 4.13 Comparación entre las aportaciones medias de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de los hidrogramas mezclados, para las presas del sistema.

4.4.2.3.2 Desviación típica

En las figuras 4.14 a 4.16 se observa que la reproducción de la desviación típica no es tan buena como la de la media. La dispersión en cuanto a los promedios de las desviaciones típicas, en los distintos grupos de series generadas con el modelo de

redes neuronales es mayor, por ejemplo, para la presa Adolfo López Mateos, la diferencia entre utilizar 50 ó 200 series es mayor a 300 hm³ para el mes de enero.

El modelo AR2 reproduce mejor las desviaciones típicas de las aportaciones a las presas José López Portillo y Adolfo López Mateos mientras que para las presas Sanalona y Eustaquio Buelna no llegan a reproducir satisfactoriamente este estadístico. Las variaciones mayores se tienen para el mes de octubre.

Las series generadas con los hidrogramas mezclados también presentan mayor variación que la media. En términos porcentuales, la mayor variación entre las series históricas y las sintéticas, se presenta para el mes de agosto en las presas Sanalona y Eustaquio Buelna.

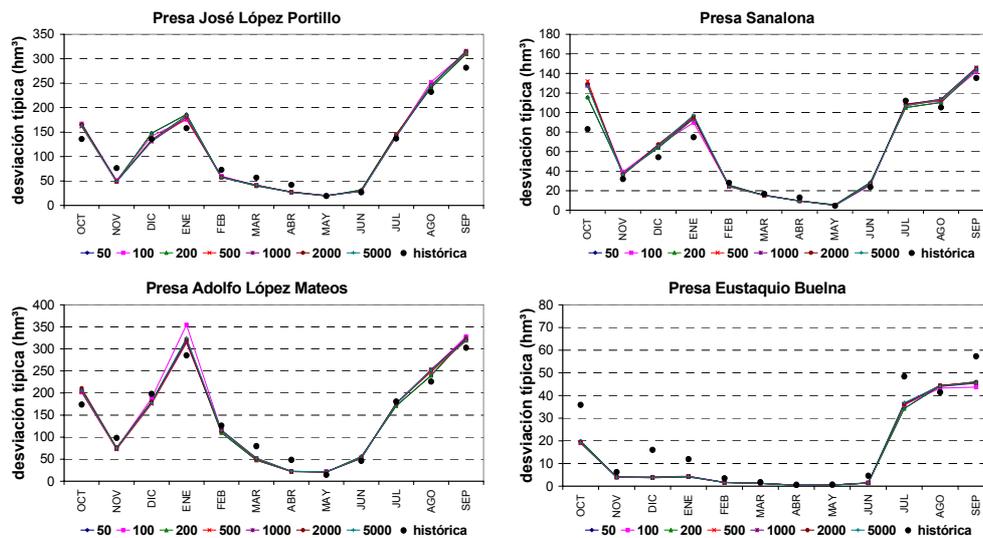


Figura 4.14 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema.

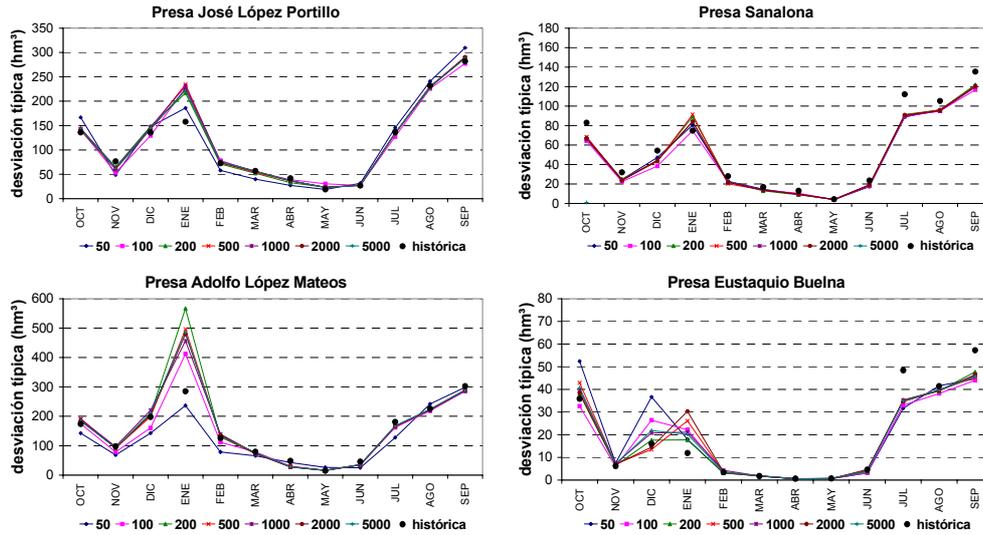


Figura 4.15 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema

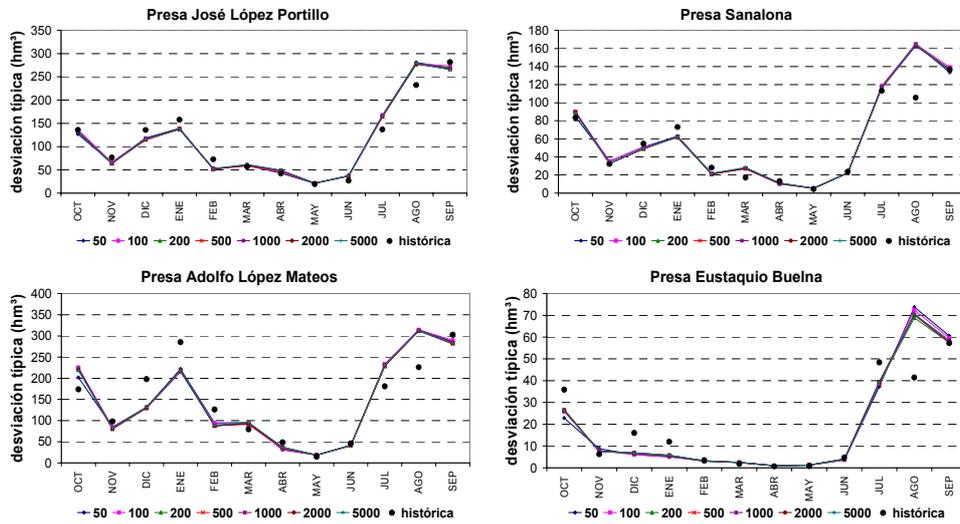


Figura 4.16 Comparación entre las desviaciones típicas de la serie histórica y las de las series generadas con el modelo de los hidrogramas mezclados, para las presas del sistema

4.4.2.3.3 Sesgo o asimetría

El coeficiente de asimetría es un estadístico que, como se observa en las figuras 4.17 a 4.19, no se pudo reproducir satisfactoriamente con ninguno de los métodos, sobre todo para los meses de noviembre y abril, en las presas de mayor capacidad y para los meses de diciembre y junio en la presa Eustaquio Buelna. De los tres

métodos el que presenta peores resultados es el AR2 y nuevamente el método que presenta mayor variación entre los distintos grupos de series es el de las redes neuronales. En general el método que presenta mejores resultados es el de los hidrogramas mezclados aunque el método de generación con la red neuronal presenta buenos resultados en varios meses de las presas de menor capacidad, Sanalona y Eusqtaquio Buelna.

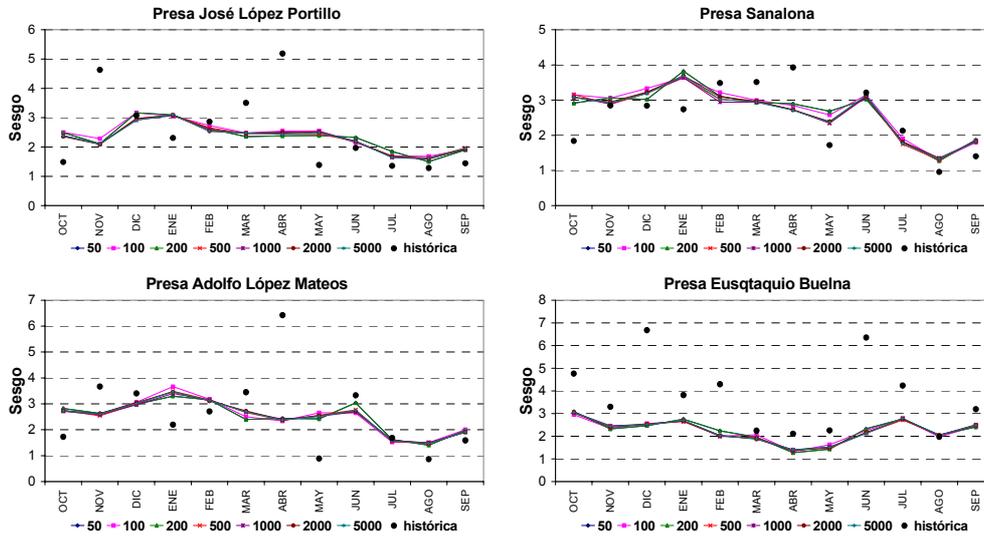


Figura 4.17 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo AR2, para cada una de las presas del sistema

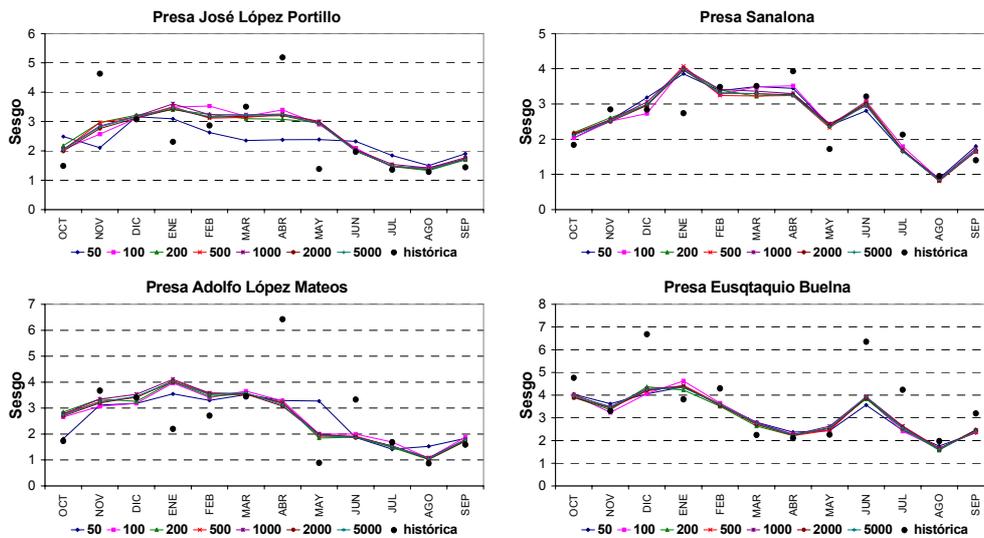


Figura 4.18 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo de ANN, para las presas del sistema

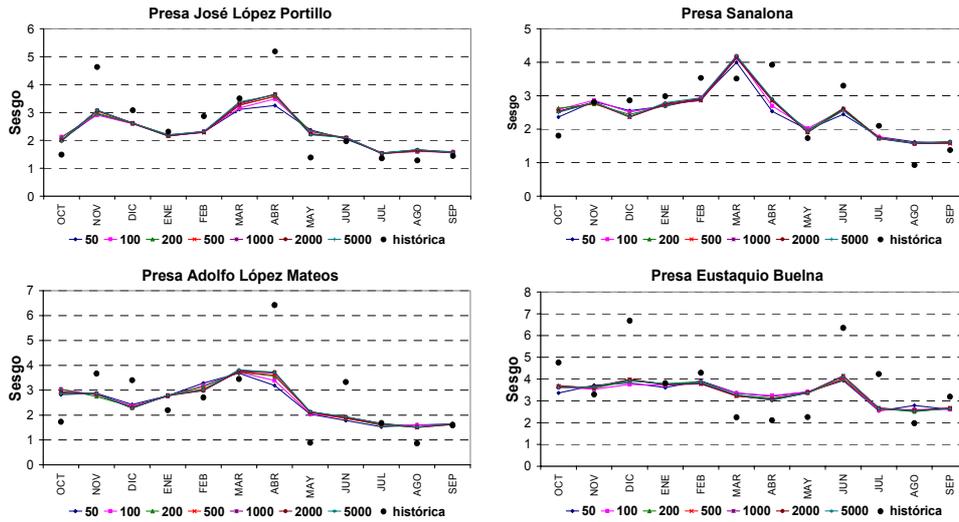


Figura 4.19 Comparación entre el sesgo de la serie histórica y el de las series generadas con el modelo de hidrogramas mezclados, para las presas del sistema

4.4.2.3.4 Matrices de coeficientes de correlación cruzada

A continuación se presentan las matrices de correlación cruzada, obtenidas con los tres métodos. Junto con ellas se presenta nuevamente la histórica, para que el lector pueda comparar más fácilmente los resultados.

| | ALM | SAN | JLP | EB |
|-----|------|------|------|------|
| ALM | 1.00 | 0.74 | 0.78 | 0.58 |
| SAN | 0.74 | 1.00 | 0.70 | 0.56 |
| JLP | 0.78 | 0.70 | 1.00 | 0.54 |
| EB | 0.58 | 0.56 | 0.54 | 1.00 |

a) AR2

| | ALM | SAN | JLP | EB |
|-----|------|------|------|------|
| ALM | 1.00 | 0.90 | 0.90 | 0.61 |
| SAN | 0.90 | 1.00 | 0.88 | 0.62 |
| JLP | 0.90 | 0.88 | 1.00 | 0.54 |
| EB | 0.61 | 0.62 | 0.54 | 1.00 |

c) hidrogramas mezclados

| | ALM | SAN | JLP | EB |
|-----|------|------|------|------|
| ALM | 1.00 | 0.68 | 0.69 | 0.51 |
| SAN | 0.68 | 1.00 | 0.70 | 0.52 |
| JLP | 0.69 | 0.70 | 1.00 | 0.51 |
| EB | 0.51 | 0.52 | 0.51 | 1.00 |

b) redes neuronales

| | ALM | SAN | JLP | EB |
|-----|------|------|------|------|
| ALM | 1.00 | 0.88 | 0.90 | 0.59 |
| SAN | 0.88 | 1.00 | 0.87 | 0.62 |
| JLP | 0.90 | 0.87 | 1.00 | 0.52 |
| EB | 0.59 | 0.62 | 0.52 | 1.00 |

d) serie histórica

De las matrices de correlación cruzada, se observa que las series generadas con el modelo AR2 y con el modelo que utiliza las redes neuronales, las correlaciones entre las aportaciones a las presas de mayor capacidad son menores a las históricas. A través de estos resultados se observa como las series al ser normalizadas sufren una transformación, por ello es que las series generadas no reproducen las correlaciones.

Para la evaluación de las correlaciones cruzadas de las series generadas respecto a las históricas se utilizó la desviación de la raíz cuadrática media relativa y el método que mejores resultados dio es el de los hidrogramas mezclados, mientras que el que presenta peores resultados es de las redes neuronales.

4.4.2.3.5 Correlaciones mensuales

Otro de los estadísticos importantes a analizar es la correlación entre los meses del año, pues a través de ella se puede inferir si se está reproduciendo la variabilidad entre los meses del año. En la figura 4.20 se presenta esta correlación para cada presa del sistema. En la misma se ha representado con líneas continuas los resultados de las series generadas a partir del modelo AR2 y del modelo de redes neuronales. Se observa como con ambos modelos casi no existe variación entre los valores de los coeficientes de correlación para todos los meses del año. El valor promedio de los coeficientes de correlación es cercano a 0.5 para el modelo autorregresivo y a 0.4 para el modelo de redes neuronales. Tanto los resultados obtenidos con el método de los hidrogramas mezclados como los resultados de la serie histórica se han representado con líneas discontinuas. Se observa que aunque los resultados con este método tampoco reproducen los coeficientes de correlación mes a mes, representan mejor la variabilidad interanual que se da en la serie histórica. La correlación mínima se presenta en el mes de mayo, que corresponde a la correlación entre los meses de mayo y junio, meses en los que se detectó en la serie histórica se presentaba la menor correlación, por lo que al generarse las series, con el método de los hidrogramas mezclados, corresponden a los meses de fin e inicio del ciclo agrícola.

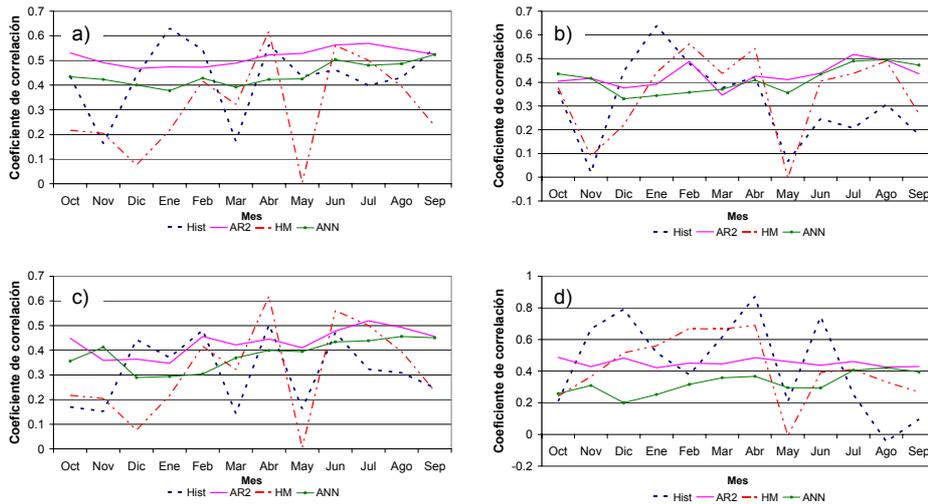


Figura 4.20 Comparación de las correlaciones mensuales de las aportaciones a las presas: a) José López Portillo, b) Sanalona, c) Adolfo López Mateos y d) Eustaquio Buelna, entre las series generadas con los tres métodos utilizados y la serie histórica

4.4.2.4 Comentarios y valoración de los métodos de generación

Se generaron series de 50 años de longitud con distintos métodos: un modelo autorregresivo de orden 2 que utiliza desagregación espacial, otro que utiliza redes neuronales para la generación de series y el modelo de Svanidze modificado o de los hidrogramas mezclados.

Se generaron grupos de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 y 5000 series de 50 años y se observa que para series largas (50 años), es suficiente con generar 50 series si se utiliza el método de los hidrogramas mezclados, o el modelo AR2, mientras que para el modelo con redes neuronales, debido a la dispersión que presentan los grupos de series hay que generar al menos 500 series para reproducir los estadísticos pues a partir de ese número los estadísticos presentan variaciones mínimas.

Además de la inspección visual de los primeros tres estadísticos es necesario cuantificar la variación entre los estadísticos de la serie histórica y los de las series generadas. Para ello se utiliza la raíz de la desviación media cuadrada relativa, *RRMSD*, (Fernández y Salas [1986], citados por Ochoa 2002). Los valores de esta medida, para los grupos de 50 y 5000 series, se presentan en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Valores de la raíz de la desviación media cuadrada relativa, *RRMSD*. Para los estadísticos de ordenes 1,2 y 3 y los tres métodos de generación de series

| Modelos | 50 series | | | 5000 series | | |
|---------|-----------|-----------|-------|-------------|-----------|-------|
| | Media | DV típica | Sesgo | Media | DV típica | Sesgo |
| AR2 | 0.039 | 0.193 | 0.487 | 0.031 | 0.199 | 0.492 |
| ANN | 0.192 | 0.243 | 0.395 | 0.104 | 0.373 | 0.356 |
| HM | 0.128 | 0.303 | 0.373 | 0.120 | 0.310 | 0.339 |

En la tabla 4.13 se observa que aunque la variación entre los estadísticos para 50 y 5000 series disminuye ligeramente para la media, en los tres métodos; no sucede lo mismo con la desviación típica y el sesgo. Los métodos AR2 e hidrogramas mezclados no presentan variación importante entre los estadísticos de los distintos grupos de series. Por otro lado, el método de las redes neuronales aunque mejora la estimación de la media para 5000 series, empeora los resultados de la desviación típica.

Debido a lo anterior, se presentarán los resultados de la estimación de la *RRMSD* para 50 series en los siguientes estadísticos: correlaciones cruzada y correlaciones mes a mes. En la tabla 4.14 se presentan estos estadísticos junto con los de la tabla 4.13.

En virtud de que el modelo que presenta mejores resultados, es aquél cuya *RRMSD* es menor; cada uno de los estadísticos analizados se ha calificado a los modelos, con puntuaciones de 1, 2 y 3. La valoración de 1 se da al modelo que presenta mejores resultados en un estadístico determinado y la calificación de 3 corresponde a aquél que arroja resultados más desfavorables. Además, en la tabla 4.15 se ha agregado una columna en la que además de los estadísticos se evalúa la inestabilidad de los estadísticos si se generan distintos grupos de series. Esta valoración se da a través de la inspección visual de los estadísticos. De esta manera el modelo que presenta mejores resultados será aquél cuya puntuación sea la mínima.

Tabla 4.14 Valores de la raíz de la desviación media cuadrada relativa para 50 series

| Modelos | 50 series | | | | |
|---------|-----------|-----------|-------|---------------|---------------|
| | Media | DV típica | Sesgo | Corr. Cruzada | Corr. Mensual |
| AR2 | 0.039 | 0.193 | 0.487 | 0.092 | 0.573 |
| ANN | 0.192 | 0.243 | 0.395 | 0.128 | 0.509 |
| HM | 0.128 | 0.303 | 0.373 | 0.012 | 0.473 |

Tabla 4.15 Evaluación del modelo de generación

| Modelos | 50 series. 1 Puntuación para el modelo que presenta mejores resultados | | | | | |
|---------|--|-----------|-------|---------------|---------------|------------------------|
| | Media | DV típica | Sesgo | Corr. Cruzada | Corr. Mensual | Variabilidad No.series |
| AR2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| ANN | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| HM | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |

4.4.3 Identificación y caracterización de las sequías

En este apartado se presentan los resultados de la caracterización de las sequías históricas y las de las series generadas con cada uno de los métodos utilizados. Para el caso de las series generadas se analizan los estadísticos de sequía por serie de aportaciones a las presas del sistema y para el sistema en conjunto.

4.4.3.1 Sequías históricas

En la figura 4.21 se han representado los volúmenes totales anuales de las aportaciones históricas del sistema para el periodo de 1949 a 1998, con la demanda anual actual, correspondiente al volumen concesionado para los usos de la región y que aparecen en el reglamento del sistema (CNA, 2000). De tal manera que si las demandas hubieran sido las actuales para ese conjunto de aportaciones, entonces se hubieran presentado 21 años en los que la demanda supera a la oferta. Estos veintiún años secos se traducen en 11 sequías cuyas duraciones varían de 1 a 7 años. Con este registro de aportaciones es que se comparan las características de las series sintéticas.

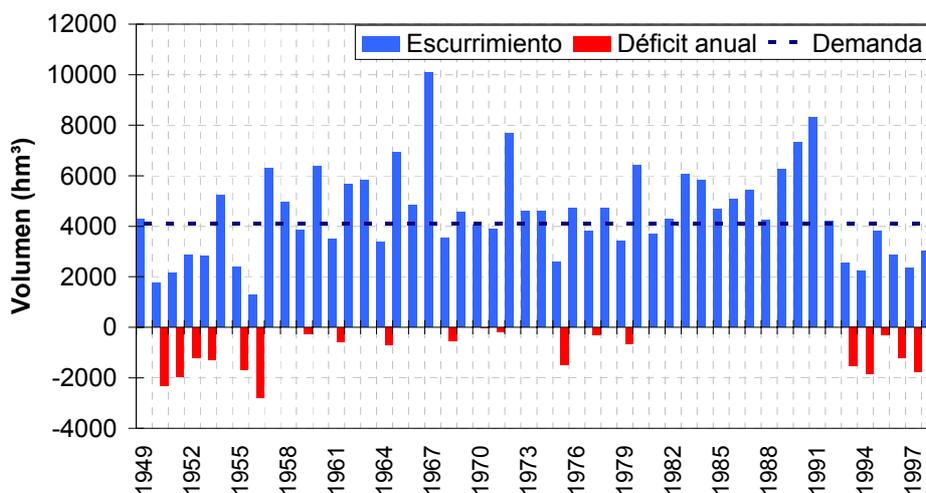


Figura 4.21 Sequías de la serie histórica

4.4.3.2 Valores medios de las características de las sequías

En las figuras 4.22 a 4.33 se presentan los valores promedio de las características de las sequías, para grupos de 50, 100, 200, 500 y 1000 series de aportaciones generadas con los tres métodos de generación de series utilizados. Estas series son las mismas a las que anteriormente se les han estimado los estadísticos. Entre las características que se presentan están: el número de sequías, duración, intensidad y magnitud. La determinación de las sequías se realiza tanto para el sistema en conjunto como para cada presa del mismo.

4.4.3.2.1 Características de las sequías por presa

Como se ha mencionado, la identificación y caracterización de las sequías se realiza utilizando la teoría de rachas, para esto es necesario definir un umbral. Este umbral queda definido por la demanda.

En el caso de aplicación, el sistema de recursos hídricos está conformado por cuatro presas que en conjunto abastecen a las distintas demandas de los usos agrícolas y urbanos de la región. No obstante, se analiza si las series sintéticas logran reproducir las características de las sequías históricas por serie de aportaciones y como umbrales se definen porcentajes del caudal medio anual de la serie de aportaciones. De tal manera, que el umbral del 100% corresponde al caudal medio anual. Para el sistema en cuestión el volumen de la demanda anual es muy cercano al volumen promedio anual de aportación.

En cada una de las graficas que se encuentran en las figuras 4.22 a 4.25 se presentan 24 series de resultados, 5 por cada presa más cuatro correspondientes a las aportaciones de las series históricas. En estas gráficas se representan las características históricas con puntos mientras que las sintéticas se representan con líneas. Como comentario general a estas figuras: las líneas superiores de cada gráfica corresponden a las series de aportaciones a Eustaquio Buelna, mientras que las inferiores corresponden a las series de aportaciones de las otras tres presas.

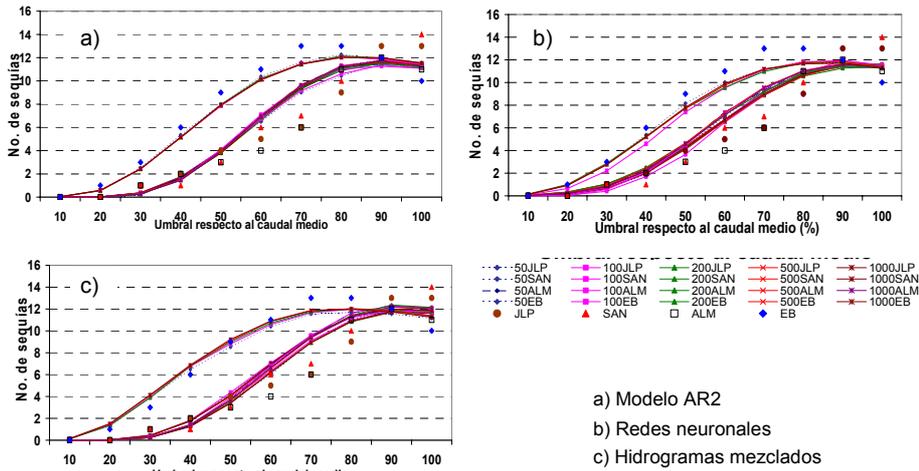


Figura 4.22 Comparación entre el número de sequías de las series históricas y el de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los tres métodos utilizados

En cuanto al número de sequías, en la figura 4.22, se observa que la forma de las líneas que representan el número de sequías para distintos umbrales como porcentaje del caudal medio anual, es similar.

Por lo que respecta a las series del modelo autorregresivo de orden dos, las quince series correspondientes a las tres presas de mayor capacidad tienen un comportamiento muy similar en cuanto al número de sequías. En el modelo de redes neuronales sucede lo mismo, no obstante, si se llegan a ver más líneas esto se debe a la variación del número de sequías promedio para distintos grupos de series y no a que cada serie de aportaciones por presa sea diferente. En los resultados de las series obtenidas con los hidrogramas mezclados si se alcanza a ver una ligera diferencia debida a las series de aportaciones a cada presa.

En la figura 4.23 se presentan los resultados relativos a las duraciones de las sequías. Al igual que para el número de sequías, la variación de la duración respecto al los distintos umbrales para las cuatro presas y para los tres modelos es similar. Las líneas superiores corresponden a los resultados de las series de aportaciones a la presa Eustaquio Buelna y las inferiores a las otras tres presas.

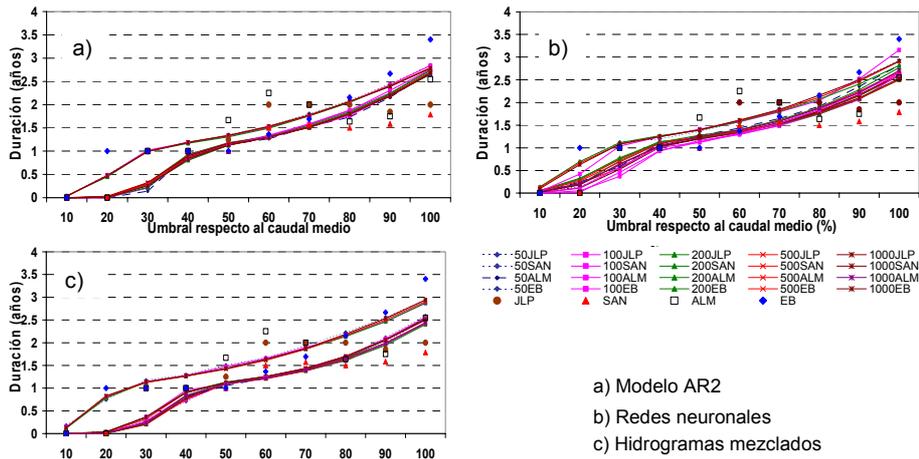


Figura 4.23 Comparación entre la duración de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados

En las figuras 4.24 y 4.25 se presentan los gráficos de las intensidades y magnitudes de las series sintéticas y de las series históricas. En estas gráficas se puede apreciar mejor la existencia de cuatro grupos de resultados que corresponden a cada una de las presas, debido a que la escala de volúmenes de aportaciones y por consiguiente de déficit incide en estos estadísticos. Nuevamente el método que presenta mayor variación de resultados para los distintos grupos de series analizados es el método de las redes neuronales.

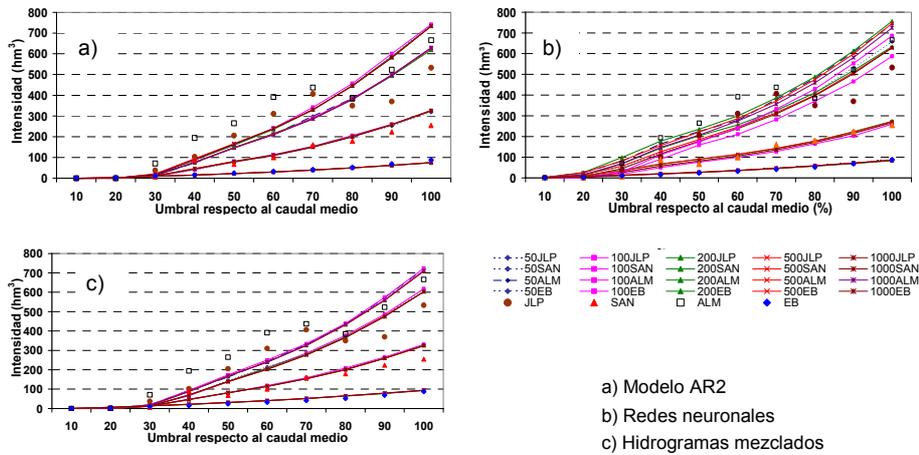


Figura 4.24 Comparación entre la intensidad de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados

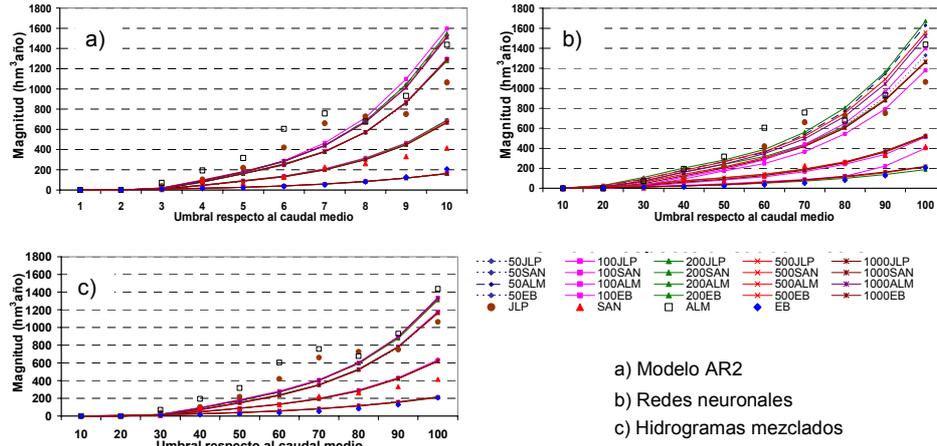


Figura 4.25 Comparación entre la magnitud de las sequías de las series históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para las presas del sistema y los métodos utilizados

4.4.3.2.2 Características de las sequías por sistema de recursos hídricos

Para el caso del análisis del sistema como tal, se analizan y presentan resultados de las sequías anuales y déficit mensual promedio de distintos grupos de series sintéticas y de la histórica. Para el caso del análisis anual los umbrales se fijan en función de la demanda objetivo, que corresponde a los derechos que tienen los distintos usuarios. En este caso el umbral de 100 corresponde a la demanda.

En el caso de la caracterización del déficit mensual del sistema también se utiliza como umbral un porcentaje de la demanda, pero además se considera la variación mensual de la misma. Los resultados se presentan en las figuras 4.26 a 4.33

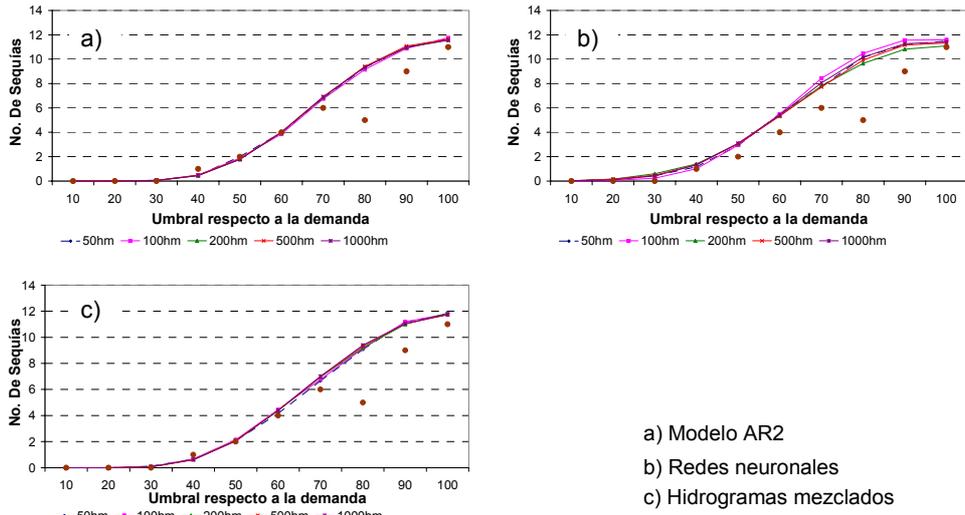


Figura 4.26 Comparación entre el número de sequías históricas y el de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados

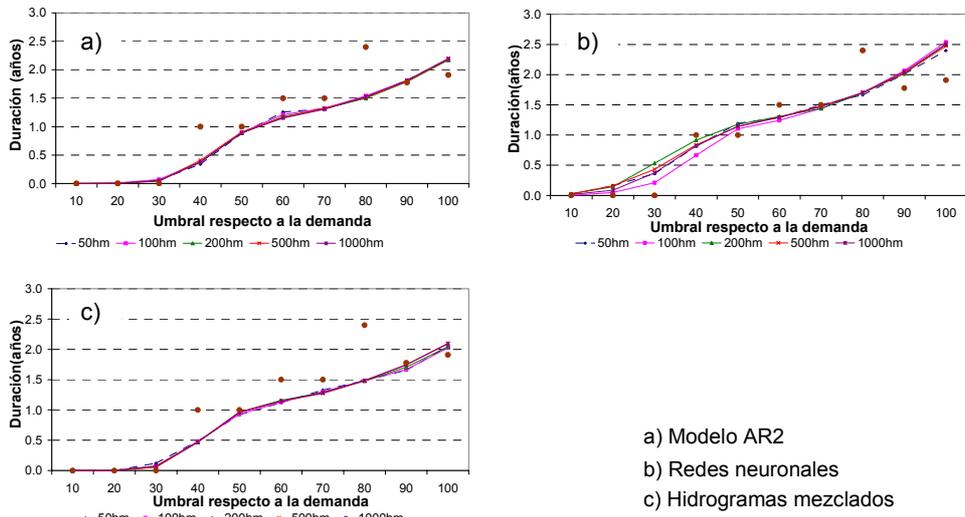
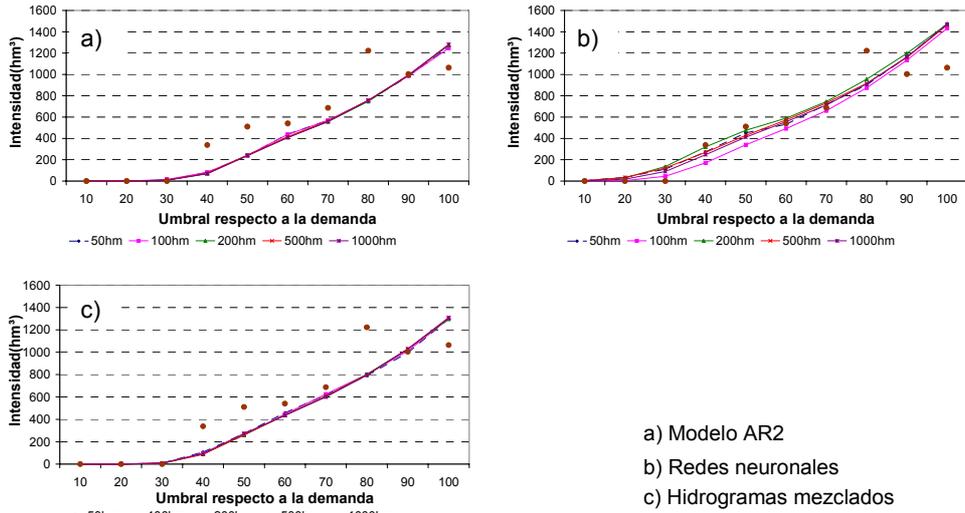
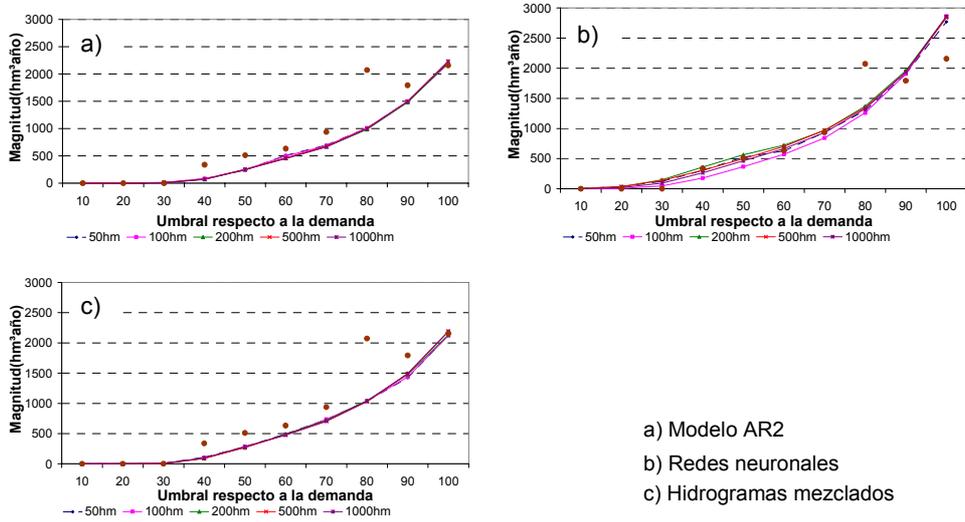


Figura 4.27 Comparación entre la duración de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados



a) Modelo AR2
 b) Redes neuronales
 c) Hidrogramas mezclados

Figura 4.28 Comparación entre la intensidad de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados



a) Modelo AR2
 b) Redes neuronales
 c) Hidrogramas mezclados

Figura 4.29 Comparación entre la magnitud de las sequías históricas y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados

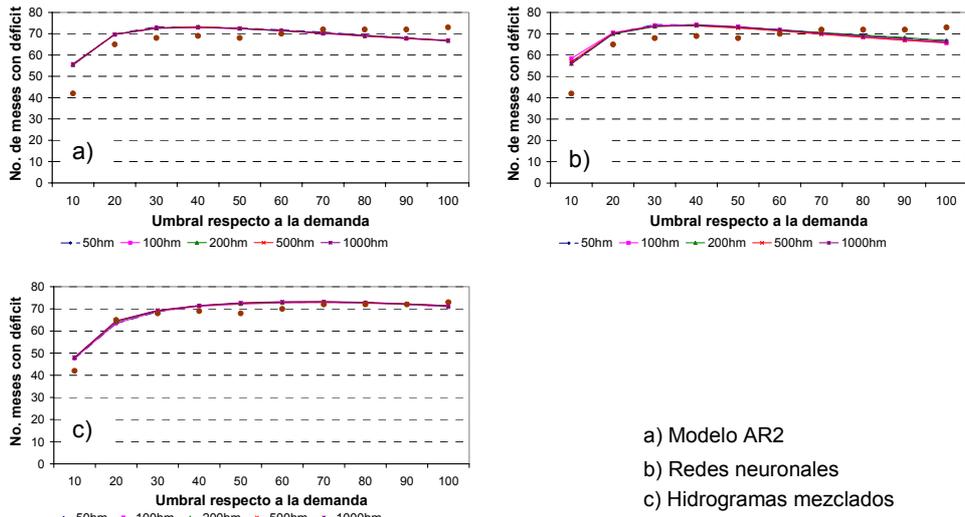


Figura 4.30 Comparación entre el número de meses con déficit de la serie histórica y el de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados

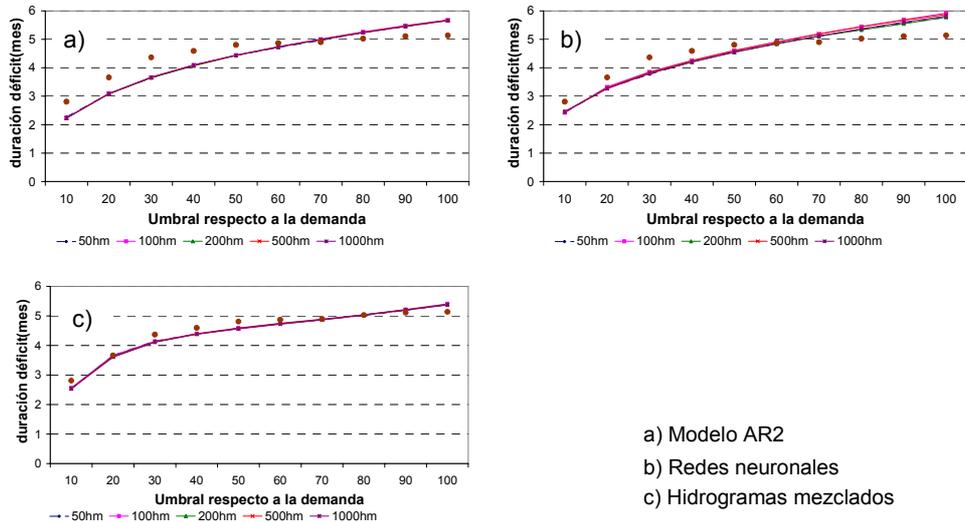
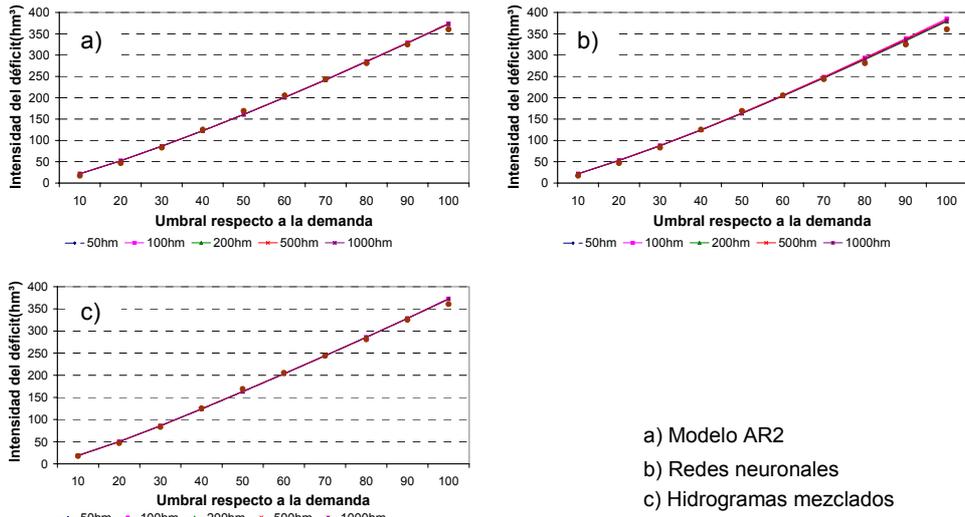
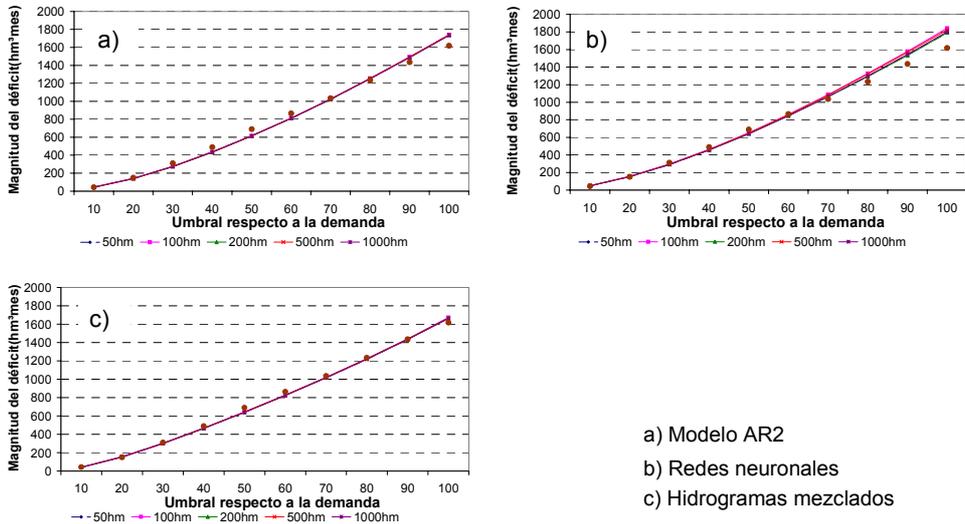


Figura 4.31 Comparación entre la duración en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados



a) Modelo AR2
b) Redes neuronales
c) Hidrogramas mezclados

Figura 4.32 Comparación entre la intensidad en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados



a) Modelo AR2
b) Redes neuronales
c) Hidrogramas mezclados

Figura 4.33 Comparación entre la magnitud en meses del déficit de la serie histórica y la de diferentes grupos de series generadas, para el sistema y los métodos utilizados

Al igual que para los estadísticos básicos, las características medias de las sequías tampoco presentan variaciones importantes para distintos grupos de series sintéticas generadas, el método que presenta mayor variación es el de las redes neuronales,

sin embargo llega a representar mejor las características de las sequías para ciertos umbrales.

La demanda agrícola varía ligeramente a lo largo del año, sin embargo la variabilidad de las aportaciones es mucho mayor, esto provoca que se presenten déficit mensuales en todos los años por eso el número de ellos se incrementa y la duración del déficit es de al menos 2 meses para umbrales del 10% de la demanda, estos meses corresponden a los más secos (abril y mayo) del año agrícola.

El número y la duración de los déficit mensuales para el sistema se reproducen mejor con la metodología de los hidrogramas mezclados, HM, sobretodo para umbrales mayores al 70% de la demanda, para umbrales menores el número se sobreestima, pero se subestima la duración de las mismas.

La intensidad y magnitud de los déficit mensuales generados se reproducen satisfactoriamente con las metodologías de los HM y el AR2. Las magnitudes de las sequías con las ANNs son ligeramente mayores, pero tienen mayor variación para los distintos grupos de sequías

4.4.3.3 Evaluación de las características de las sequías de las series sintéticas

Además de la valoración que se obtiene a través de la inspección visual de las gráficas de resultados, se califica el desempeño de los métodos mediante el uso del índice *RRMSD*. Estos resultados se presentan en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18.

Tabla 4.16 Valores de *RRMSD* para la caracterización anual por presas

| | características de las sequías (50 series) | | | |
|-----|--|----------|------------|----------|
| | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
| AR2 | 0.208 | 0.289 | 0.316 | 0.382 |
| ANN | 0.210 | 0.240 | 0.280 | 0.330 |
| HM | 0.200 | 0.280 | 0.305 | 0.383 |

Tabla 4.17 Valores de *RRMSD* para la caracterización anual del sistema

| | características de las sequías (50 series) | | | |
|-----|--|----------|------------|----------|
| | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
| AR2 | 0.408 | 0.338 | 0.383 | 0.449 |
| ANN | 0.514 | 0.300 | 0.334 | 0.376 |
| HM | 0.393 | 0.329 | 0.355 | 0.439 |

Tabla 4.18 Valores de *RRMSD* para la caracterización mensual del sistema

| Modelo | características de las sequías (50 series) | | | |
|--------|--|----------|------------|----------|
| | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
| AR2 | 0.086 | 0.099 | 0.033 | 0.071 |
| ANN | 0.094 | 0.089 | 0.046 | 0.089 |
| HM | 0.040 | 0.039 | 0.027 | 0.036 |

Si se aplica una valoración similar a la utilizada con los estadísticos de las series sintética, para las características medias, se tienen los resultados que se presentan en las tablas 4.19 a 4.21.

Tabla 4.19 Valoraciones de los modelos en la caracterización anual por presa

| Modelo | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
|--------|------------|----------|------------|----------|
| AR2 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| ANN | 3 | 1 | 1 | 1 |
| HM | 1 | 2 | 2 | 3 |

1 valoración para el modelo que presenta mejores resultados

Tabla 4.20 Valoraciones de los modelos en la caracterización anual del sistema

| Modelo | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
|--------|------------|----------|------------|----------|
| AR2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| ANN | 3 | 1 | 1 | 1 |
| HM | 1 | 2 | 2 | 2 |

1 valoración para el modelo que presenta mejores resultados

Tabla 4.21 Valoraciones de los modelos en la caracterización mensual del sistema

| Modelo | No.Sequías | Duración | Intensidad | Magnitud |
|--------|------------|----------|------------|----------|
| AR2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| ANN | 3 | 2 | 3 | 3 |
| HM | 1 | 1 | 1 | 1 |

1 valoración para el modelo que presenta mejores resultados

4.4.4 Selección de las series a utilizar en los modelos de gestión

Las series a utilizar en los modelos de gestión para generar y validar las políticas de operación serán aquellas que se obtengan con el modelo que reproduzca mejor los estadísticos y las características de las sequías de la serie histórica. Para ello, se utilizan los resultados que se presentan en las tablas 4.15 y 4.19 a 4.21. Así entonces, para el caso de estudio, el método que presenta mejores resultados es el de los hidrogramas mezclados, seguido por el modelo de redes neuronales y finalmente el autorregresivo de orden 2. Por consiguiente las series que se utilizarán serán las generadas con el modelo de hidrogramas mezclados.

4.5 Obtención de políticas de operación con restricción

Siguiendo la metodología que se describe en el capítulo 3, se presentan algunos de los pasos y resultados para la obtención de las políticas de operación con restricción para un sistema de recursos hídricos.

4.5.1 Uso del modelo de optimización para el caso de estudio

Como se ha mencionado, el modelo de optimización que se utilizó fue el OptiGes. Este modelo se emplea en distintas etapas del proceso de optimización, tal como se ilustra en la figura 3.1 se ejecuta con varias series de aportaciones. La alimentación del mismo, además de los archivos de aportaciones y evaporaciones que requiere, se realiza a través de su interfaz, OptiWin. En la figura 4.34 se presenta un esquema del sistema San Lorenzo – Culiacán – Humaya – Mocerito, SLCHM, con algunas de las fichas de datos necesarios para su alimentación y posterior ejecución.

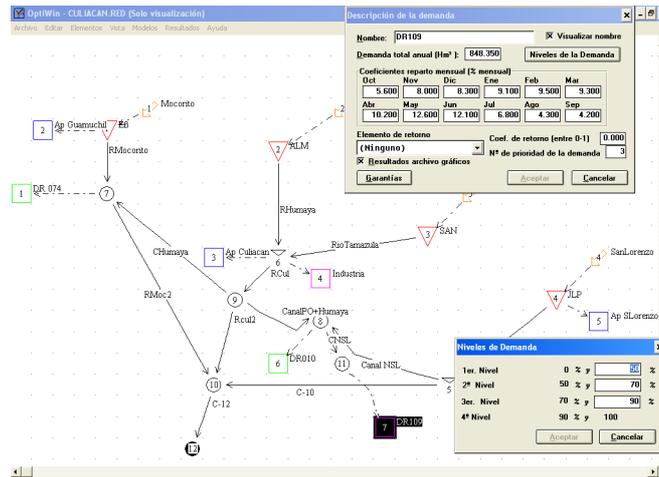


Figura 4.34 Esquema del sistema SLCHM en OptiGes

Cabe resaltar que OptiGes presenta resultados referidos a cuatro niveles de fallo o incumplimiento de la demanda. El nivel 1 corresponde al incumplimiento total, el nivel 2 corresponde al nivel de restricción más alto y el 4 al menor nivel de restricción, debido a que se hace referencia a este tipo de fallos, en los párrafos siguientes.

4.5.2 Periodo de optimización

En esta parte del análisis se plantearon dos objetivos: uno fue garantizar las demandas urbanas en su totalidad y el otro, no admitir fallos de nivel 1 en ninguno de los 50 años en los que se llevó a cabo la optimización, con la serie histórica.

Para la determinación del periodo de optimización se analizaron varios periodos: 1, 2, 3, 5, 10, 17, 25 y 50 años. Los volúmenes mensuales promedio para cada uno de los periodos de optimización y para cada presa se presentan en la figura 4.35. En

ésta las líneas superiores e inferiores corresponden a los volúmenes máximos y mínimos de operación.

De los resultados obtenidos al ejecutar el programa OptiGes se concluye lo siguiente:

- con periodo de 1 año se tienen déficit para abastecer agua potable a la Ciudad de Guamúchil, Sinaloa.
- con periodos de optimización mayores o iguales a 5 años ya no se tenían déficit de nivel 1, es decir del 100%.
- para periodos largos de optimización se prefiere mantener los niveles de ALM bajos, mientras que en las otra presas no, ver figura 4.35.
- para periodos mayores a 5 años el número de déficit de magnitud 2 disminuyen y aumentan los de magnitud 3 o 4, pero se necesita más volumen de reserva

Por lo anterior el periodo de optimización elegido es de 5 años

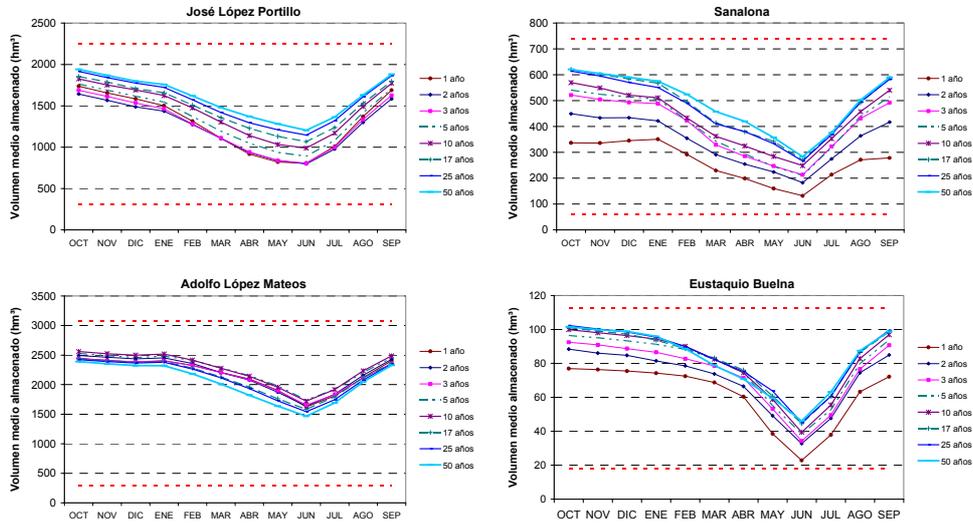


Figura 4.35 Volúmenes de almacenamiento mensual promedio, para distintos periodos de optimización.

4.5.3 Volúmenes mensuales objetivo

Una vez establecido el periodo de optimización, se determinan los volúmenes mensuales objetivo para cada presa del sistema. Éstos se presentan en la tabla 4.22. Los niveles más altos en el sistema se presentan en octubre, mes de inicio del

ciclo agrícola, y los más bajos en junio, mes en que inicia la temporada de lluvias más representativa del año.

Tabla 4.22 Volúmenes mensuales objetivo para las presas del sistema

| Volúmenes de almacenamiento en hm ³ | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Presa | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP |
| JLP | 1763.13 | 1688.33 | 1616.22 | 1544.34 | 1370.19 | 1193.65 | 1046.63 | 936.80 | 890.24 | 1082.20 | 1417.23 | 1706.21 |
| ALM | 2529.48 | 2490.92 | 2460.38 | 2482.46 | 2410.75 | 2286.11 | 2150.01 | 1978.80 | 1739.82 | 1918.79 | 2205.37 | 2454.26 |
| SAN | 540.78 | 524.45 | 514.18 | 505.94 | 423.20 | 342.71 | 294.29 | 244.82 | 210.21 | 318.37 | 439.21 | 514.59 |
| EB | 96.44 | 95.10 | 93.30 | 91.28 | 88.32 | 82.48 | 74.47 | 55.19 | 38.34 | 52.71 | 79.90 | 93.77 |

4.5.4 Influencia de la condición inicial

Para estimar la influencia de la condición inicial de almacenamiento, en la determinación de los volúmenes objetivo se consideraron dos condiciones de los almacenamientos del sistema: una corresponde a una situación de sequía (volúmenes de almacenamiento en las presas el 1 de octubre del año 2000) y otra que corresponde a un porcentaje de los volúmenes promedio al final del periodo de simulación, septiembre. Los volúmenes de la segunda condición se obtuvieron mediante la ejecución del programa de optimización sin imponer restricciones. Los resultados reflejaron que los volúmenes objetivos tendrían que ser mayores para la condición de escasez del recurso.

Para la determinación de la influencia de la condición inicial relacionada con las aportaciones se utilizaron los 50 años del registro histórico. Se manipularon 9 periodos de 5 años. Para el mismo volumen inicial de almacenamiento se varió el inicio de la serie de aportaciones de 1948 a 1952, así para cuando se inicia la optimización con el año 1948 esta termina en 1993 y cuando se inicia en 1952 termina en 1998. La máxima variación que se observó en cuanto a la garantía volumétrica de las demandas agrícolas fue de 0.04%. Lo que indica que para la longitud del registro y el sistema analizado; la influencia de la condición inicial no es importante para lo que es el indicador de garantía volumétrica. No obstante, en cuanto a la distribución de los niveles de fallo si existen variaciones. En este caso si se inicia la optimización en el año 1951, se tiene la condición más desfavorable, llegan a presentarse fallos de nivel 1 mientras que la situación más favorable en cuanto a la distribución de los niveles de fallos se presenta si la optimización inicia en el año 1952. Se considera como situación favorable aquella en la que la mayoría de los fallos son de nivel 4. Tanto la década de los 50's, como la de los 90's presentan sequías de duraciones importantes, mayores a 4 años. Así que al manipular el registro de aportaciones entre estos años no se tiene gran variación de volúmenes, lo cual indica que se tendrá una mejor gestión si la sequía se encuentra al final del registro que al inicio.

4.5.5 Determinación de los niveles de restricción

Como condición inicial de los volúmenes de almacenamiento para la determinación de los niveles de restricción, se utilizó un porcentaje del valor promedio de las condiciones de almacenamiento de las presas del sistema, al final del mes de septiembre, pues el año agrícola para el caso de estudio inicia el 1 de octubre. Los niveles de restricción que presentaron un mejor funcionamiento del sistema con la serie histórica fueron del 50, 25 y 10 % de la demanda, que para OptiGes corresponden a los escalones de 50, 75 y 90.

Las series sintéticas confirmaron que con estos niveles de restricción el sistema presentaba los mejores resultados.

La representación gráfica de los volúmenes extraídos contra el volumen almacenado al 1 de octubre, Vo_t , y volúmenes extraídos versus Vo_t más aportaciones durante el año de análisis de presentan en las figuras 4.36a y 4.36b.

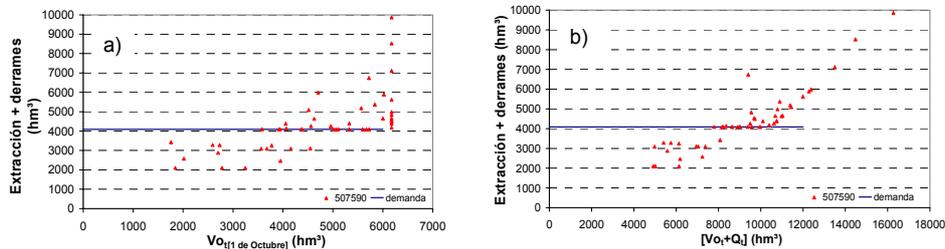


Figura 4.36 a) Volúmenes de extracción vs Vo_t b) Volúmenes de extracción vs Vo_t + aportaciones durante el año de análisis, serie histórica

Con el uso de la serie histórica y con las condiciones iniciales que se establecieron se observa que no existen valores bajos de extracción que permitan definir la parte inferior de una regla de operación. Para ello se utilizan dos periodos secos de la serie histórica, se optimiza cada uno de los periodos y se obtienen otros 3 niveles de restricción que corresponden a 78, 70 y 30% de la demanda.

Por otro lado, se determina el volumen de extracción mínimo garantizado para el sistema con ayuda del programa Sismapre, utilizando el registro histórico. Este volumen depende de las condiciones iniciales que se establecen y da un valor de 1236 hm^3 al año, lo que corresponde a una restricción del 69 % de la demanda, aproximado al de 70% obtenido con la optimización de un periodo seco, utilizando OptiGes.

Tanto el resultado del volumen mínimo garantizado como los volúmenes de extracción obtenidos de los periodos secos del registro histórico se presentan en las figuras 4.37 a) y b).

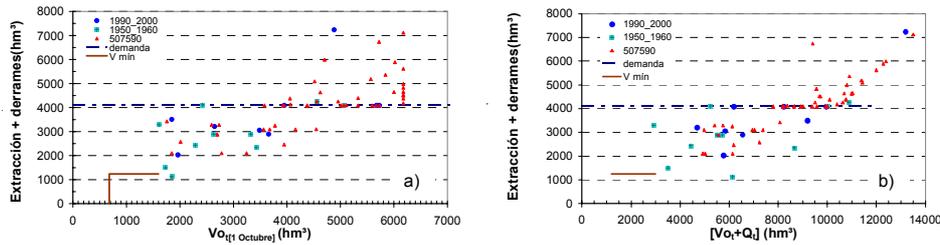


Figura 4.37 a) Volúmenes de extracción vs V_{o_t} ; b) Volúmenes de extracción vs V_{o_t} + aportaciones durante el año de análisis, serie histórica + 2 sequías

Entre el resultado del volumen mínimo garantizado y el nivel de restricción máxima obtenido al optimizar los periodos secos, existe una diferencia de nueve puntos porcentuales para la restricción máxima que debe imponerse a las demandas agrícolas del sistema. Esta diferencia puede deberse a que el modelo OptiGes no permite mantener una restricción superior a un mes mientras que el Sismapre da resultados mínimos anuales, además por un lado se están optimizando sólo periodos secos y en el otro se está utilizando todo el registro. La revisión de cuál será la restricción máxima por asignar al sistema se determinará durante el proceso de evaluación, con un modelo de simulación.

4.5.6 Determinación de una regla de gestión con restricción

Aunque la asignación de agua es anual, para el caso de estudio, existen dos ciclos agrícolas, otoño-invierno y primavera-verano, así que para la determinación de las reglas de gestión se exploraron cuatro casos:

1. Función del almacenamiento para una asignación anual del volumen
2. Función del almacenamiento para una asignación semestral
3. Función del almacenamiento más una aportación antecedente
4. Función del almacenamiento más la aportación del año del análisis

En el caso del tipo de regla semestral se agruparon los volúmenes de extracción correspondientes a los semestres octubre-marzo y abril –septiembre.

Una de las razones que lleva a la exploración de este tipo de reglas semestrales es el sesgo que presentan las aportaciones en los meses de noviembre y abril. Que puede deberse a la presencia de aportaciones debidas a los huracanes o tormentas que ocasionalmente se presentan en esas épocas. Así aunque con las series

sintéticas no se logra reproducir el sesgo para esos meses, si se puede explorar su comportamiento con la serie histórica.

En cuanto al análisis de la regla de operación que toma en cuenta una aportación antecedente, el periodo agregado de aportaciones que presentó mayor correlación con los volúmenes anuales del siguiente año agrícola fue el correspondiente a los meses de agosto – septiembre, por ello fue el que se utilizó para la definición de la regla de gestión que toma en cuenta la aportación antecedente.

4.5.6.1 Delineación de la regla de operación

Para cada uno los casos mencionados en el epígrafe anterior se delinea la regla de operación a través de la representación gráfica de las extracciones correspondientes para cada uno de los indicadores o variables de decisión. En la figura 4.38 y 4.39 se presentan dos de los tipos de reglas analizadas.

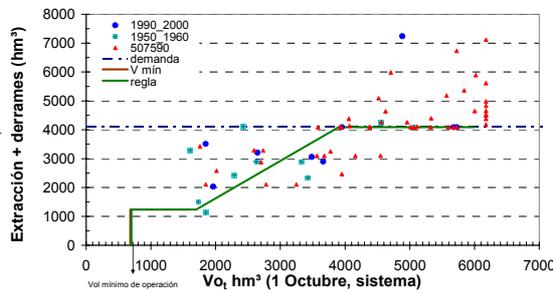


Figura 4.38 Delineación de una política de operación en función del almacenamiento

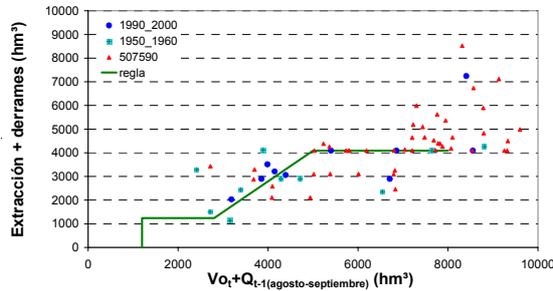


Figura 4.39 Delineación de una regla de operación en función del almacenamiento + aportación antecedente

4.5.6.2 Ajuste de las reglas de operación

Al delinear una primera aproximación de la política de operación, a través de la representación gráfica de las extracciones versus variable de decisión, pueden presentarse distintas alternativas, las cuales estarán en función de las pendientes seleccionadas y de los valores de disponibilidad considerados para establecer el inicio y fin de los diferentes tramos de cada una de las líneas que conforman la política de operación. En la figura 4.40 se ilustran tres opciones que pueden adoptarse como regla de operación del sistema. Por esta razón es necesario recurrir a un modelo de simulación para seleccionar la mejor alternativa, ya que con esta herramienta es posible afinar los parámetros de la política y realizar su validación.

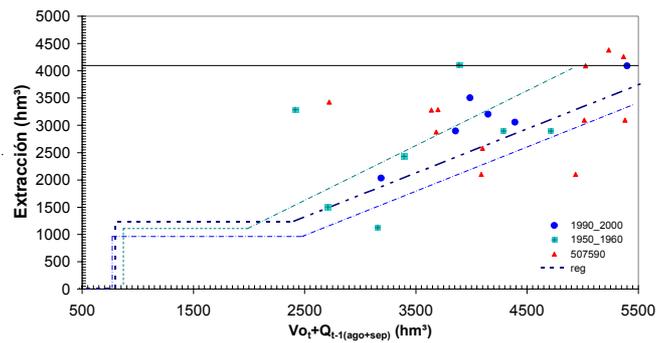


Figura 4.40 Opciones de delineación de una regla de operación

El modelo de simulación que se utilizó para el ajuste de las reglas de operación es el SimGes, éste a diferencia de OptiGes, ya permite mantener una restricción durante un periodo agrícola. La simulación de las reglas de operación se hizo utilizando la serie histórica de aportaciones. Un esquema del sistema en el modelo SimGes, se presenta en la figura 4.41.

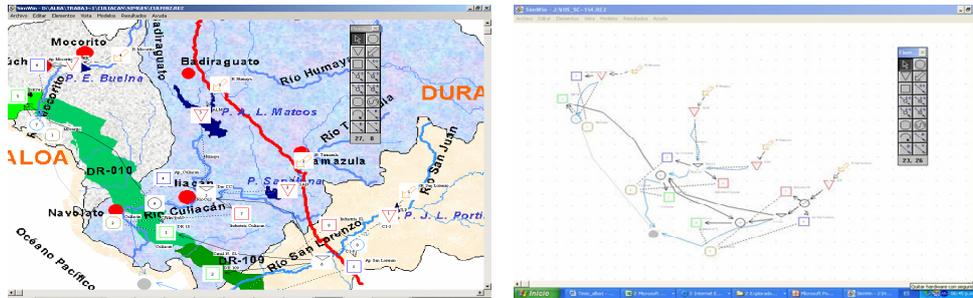


Figura 4.41 Sistema San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocorito en el modelo SimGes

Para tomar en cuenta en las políticas de operación las aportaciones antecedentes y futuras se desarrollaron rutinas de cálculo en el lenguaje de programación *Visual Basic*, con el fin de poder alimentar y ejecutar el modelo SimGes de forma secuencial.

4.5.7 Resultados de los tipos de políticas de operación

Las reglas de operación que se presentan son para el uso agrícola y abastecimiento superficial del sistema, no obstante, en el modelo de simulación se han considerado las demandas urbanas e industriales, las cuales han sido garantizadas al 100% además de los acuíferos con su correspondiente abastecimiento a las demandas agrícolas y urbanas.

Mediante simulaciones múltiples en las que se varían los parámetros de las reglas de gestión y con ayuda de rutinas de programación en *visual Basic* para la simulación múltiple y el análisis de resultados, se llegó a las reglas de operación que se presentan en las figuras 4.42 a 4.46. En éstas figuras se han representado los volúmenes suministrados como resultado de incorporar la regla de operación en el modelo de gestión, utilizando la serie histórica. Estos se representan con puntos en las gráficas.

1. Regla semestral cuyo indicador de activación es el almacenamiento al 1 de octubre. La extracción agrícola corresponde a la demanda bruta del semestre octubre – marzo. La línea continua representa la regla de operación y los puntos son los volúmenes extraídos al simular el sistema con la serie histórica.

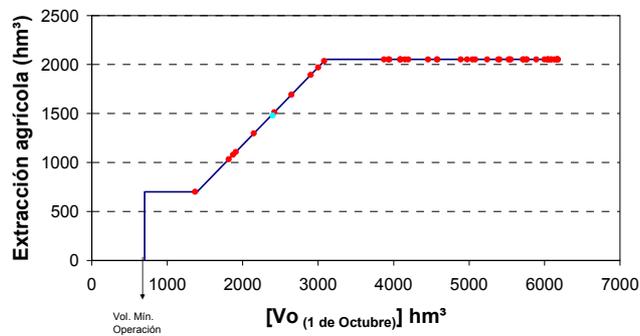


Figura 4.42 Regla de operación semestral (Octubre – Marzo)

2. Regla semestral, indicador de activación es el volumen almacenado al 1 de abril

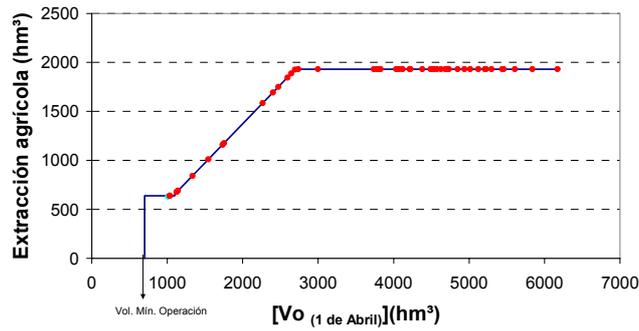


Figura 4.43 Regla de operación semestral (Abril – Septiembre)

3. Regla anual, indicador de activación es el volumen almacenado al 1 de octubre

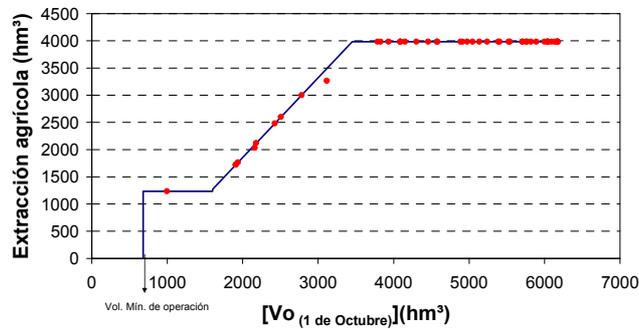


Figura 4.44 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre

4. Regla anual, el indicador de activación es el volumen almacenado al 1 de octubre más las aportaciones de agosto y septiembre del año agrícola anterior, la región correspondiente al volumen mínimo se representa con línea discontinua debido a que al incluir las aportaciones no hay un valor definido del inicio de la política.

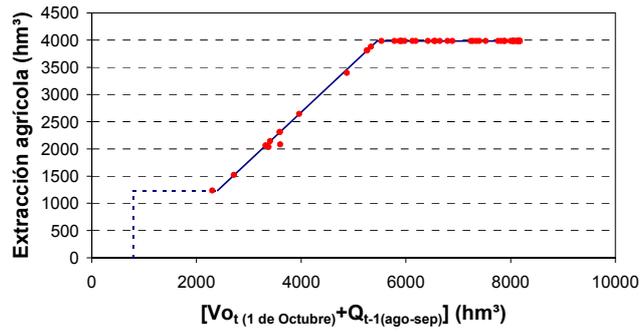


Figura 4.45 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre más aportación antecedente

5. Regla anual, el indicador de activación es el volumen almacenado al 1 de octubre más las aportaciones del año de análisis, igual que en el caso anterior el inicio de la política no está definido al incluir la aportaciones.

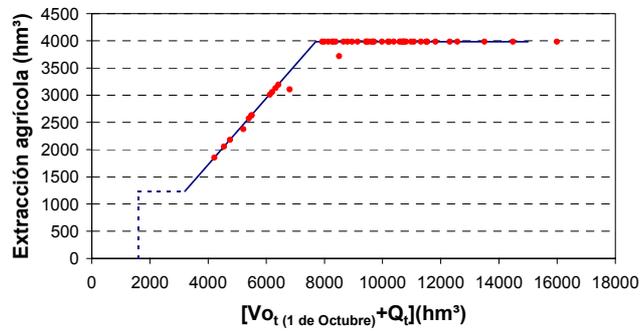


Figura 4.46 Regla de operación anual, función del volumen almacenado al 1 de octubre más la aportación del año de análisis

Los resultados que se presentan en las gráficas anteriores son volúmenes de extracción anuales o semestrales para cada uno de los indicadores. Además del cumplimiento de estos volúmenes es necesario comparar el desarrollo de estas políticas a nivel mensual analizando la magnitud de los déficits mensuales.

4.5.8 Comparación de las políticas de operación obtenidas

Para la comparación del funcionamiento del sistema al adoptar las distintas reglas de operación obtenidas se han incorporado 3 casos adicionales:

- 1) Simulación del sistema sin aplicar restricción de forma anticipada

- 2) Se examina el funcionamiento del sistema si se adopta la política de operación del reglamento y
- 3) El caso de contar con una política de operación escalonada determinada a partir de la serie histórica.

Los resultados de esta comparación se presentan en la tabla 4.23. En esta se ha sombreado la política de operación que toma en cuenta la aportación del periodo actual y para la que se necesita de un pronóstico seguro. Esta política no se utilizará en el proceso de evaluación, pero se incorpora como referencia.

Tabla 4.23 Comparación de las políticas de operación analizadas

| Tipos de reglas | Max. CR | CR medio (%) | No. Fallos resp. oferta | No. Fallos resp. concesión | Fallos > 50% de D consecutivos | Fallo máx % demanda | Fallo_abs_urb agua_sup | Garantía Vol | Vol min sma hm ³ |
|--|---------|--------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Sin restricción | 0.00 | 6.79 | 79 | 79 | 19 | 99.97 | 21 | 91.5 | 675.00 |
| Reglamento | 0.57 | 7.63 | 46 | 120 | 0 | 52.60 | 20 | 90.0 | 678.40 |
| S histórica 3 escalones 50-75-90 | 0.50 | 9.25 | 25 | 109 | 24 | 100.00 | 0 | 89.0 | 762.80 |
| Regla lineal (VO) | 0.69 | 7.96 | 2 | 120 | 0 | 48.27 | 1 | 91.0 | 679.77 |
| Regla lineal 2 ciclos *vol_minG (0.31) | 0.67 | 8.89 | 2 | 126 | 0 | 5.54 | 1 | 91.1 | 679.89 |
| Vol+aportación(a-s) *vol_minG (0.31) | 0.69 | 9.11 | 2 | 120 | 0 | 36.34 | 0 | 90.8 | 679.70 |
| Vol+aportación(a_act) *vol_minG (0.31) | 0.53 | 7.83 | 4 | 144 | 0 | 87.38 | 0 | 91.8 | 678.40 |

A continuación se da más información sobre la tabla 4.23.

La columna 2 representa el coeficiente de restricción máximo que se ha aplicado, en algún periodo de un año o seis meses, según el tipo de política, dentro de los 50 años de registro histórico que se han simulado.

La columna 3 representa el coeficiente de restricción promedio, en porcentaje, de los 50 años de análisis

La columna 4 se refiere al número de fallos mensuales que se tienen respecto de lo que se asigna al principio del año agrícola, si se adopta alguna de las políticas de operación de la columna 1.

La columna 5 representa el número de fallos que se presentaron con respecto a la demanda objetivo o los derechos de uso agrícola.

La columna 6 representa el número de veces en los que el déficit ha superado el 50 % del volumen de agua mensual asignado al inicio del ciclo agrícola, en dos meses consecutivos.

La columna 7 representa el fallo máximo en porcentaje de la demanda mensual que se presentó durante la simulación. Este fallo es respecto a la asignación al inicio del ciclo agrícola.

La columna 8 representa el número de veces en el que el sistema superficial no pudo abastecer la demanda de agua potable y se recurrió al abastecimiento subterráneo para satisfacer esta demanda.

La columna 9 representa la garantía volumétrica del sistema, obtenida para el periodo de 50 años de simulación.

La columna 10 representa el volumen mínimo de almacenamiento que se presentó en el sistema, en alguno de los 600 meses de simulación. Cabe recordar que el volumen mínimo de operación del sistema corresponde a 681 hm³.

Con el fin de proporcionar información sobre los resultados, de manera temporal, en la figura 4.47 se presentan los volúmenes históricos anuales del sistema, junto con la demanda objetivo y el promedio de la serie histórica y, en las figuras 4.48 a 4.53 la evolución de los coeficientes de restricción y de las sueltas al mar, al simular el sistema con la serie histórica, utilizando las políticas de operación de la tabla 4.23.

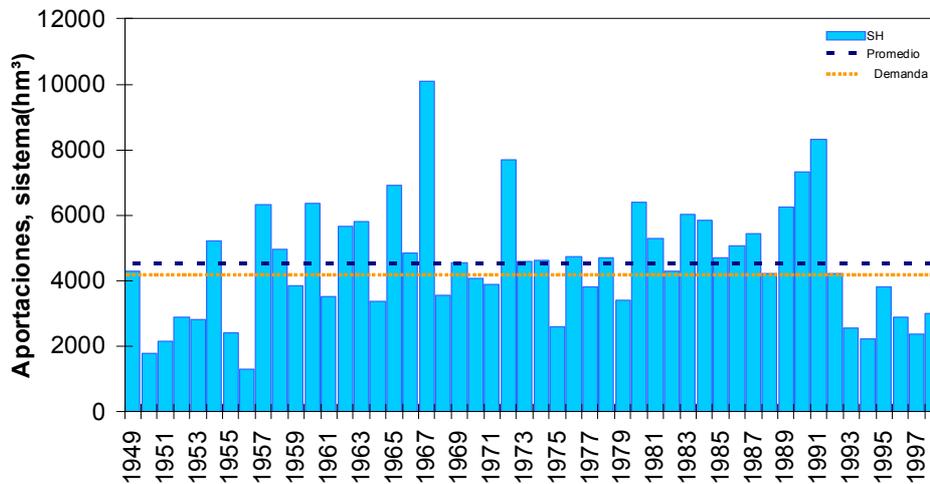


Figura 4.47 Volúmenes anuales de la serie histórica para el periodo 1949-1998

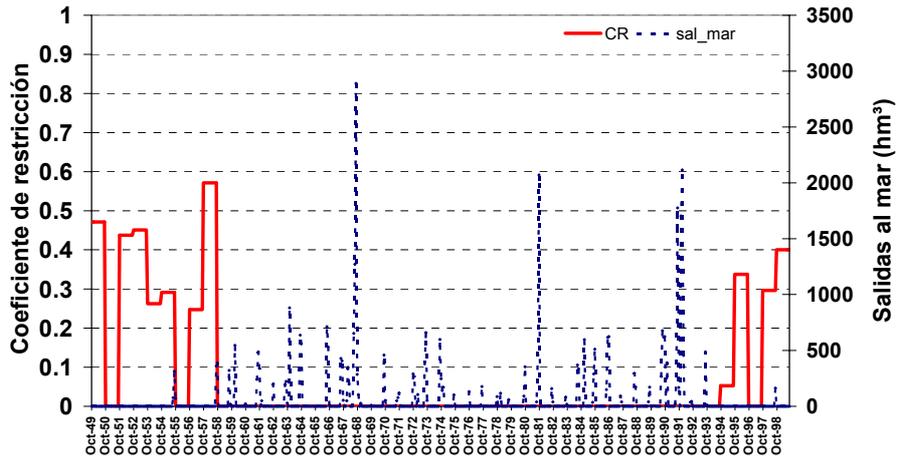


Figura 4.48 Coeficientes de restricción, aplicando la política del reglamento.

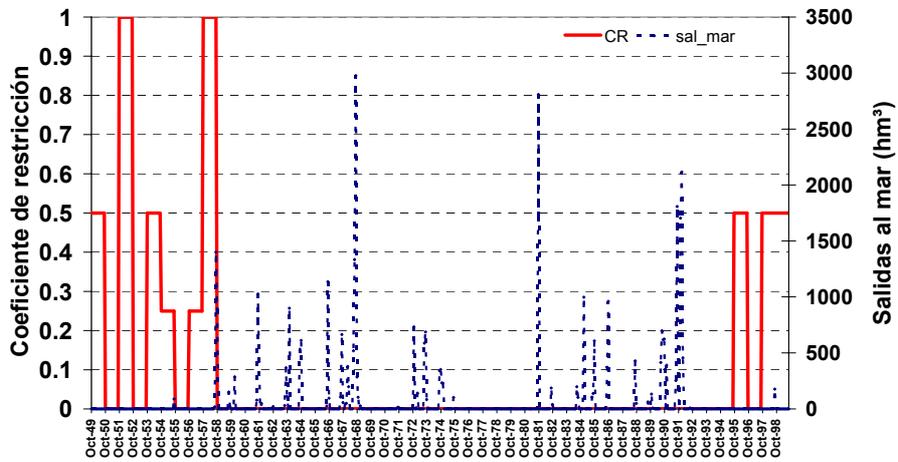


Figura 4.49 Coeficientes de restricción, aplicando la política escalonada.

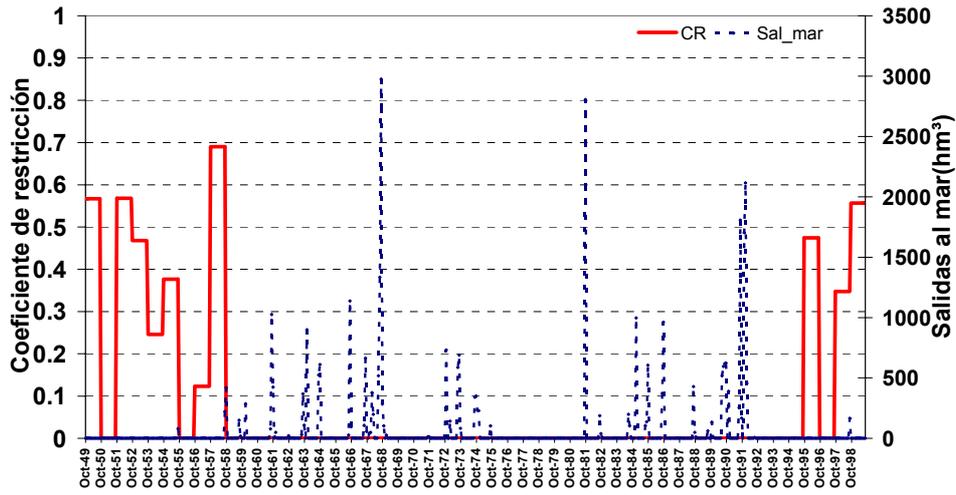


Figura 4.50 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(V_{0t-1 \text{ oct.}})$.

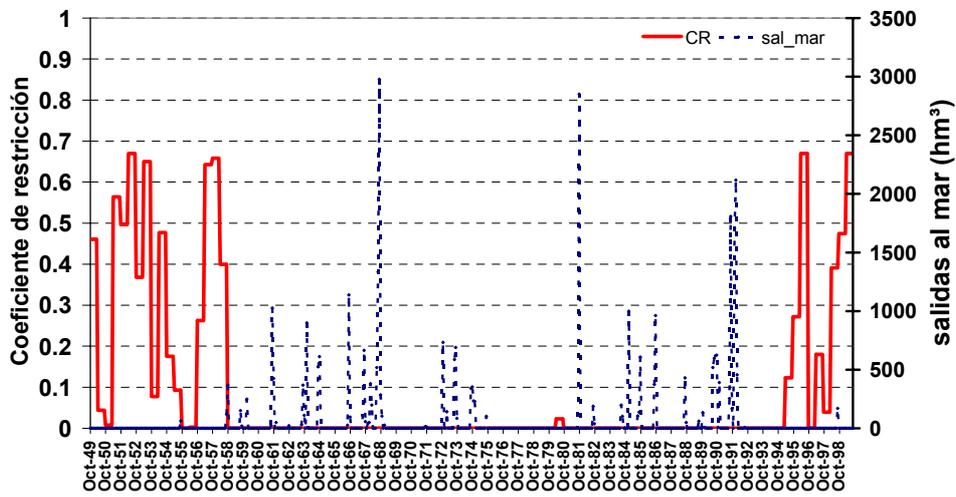


Figura 4.51 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(V_{0t})$ para 2 ciclos.

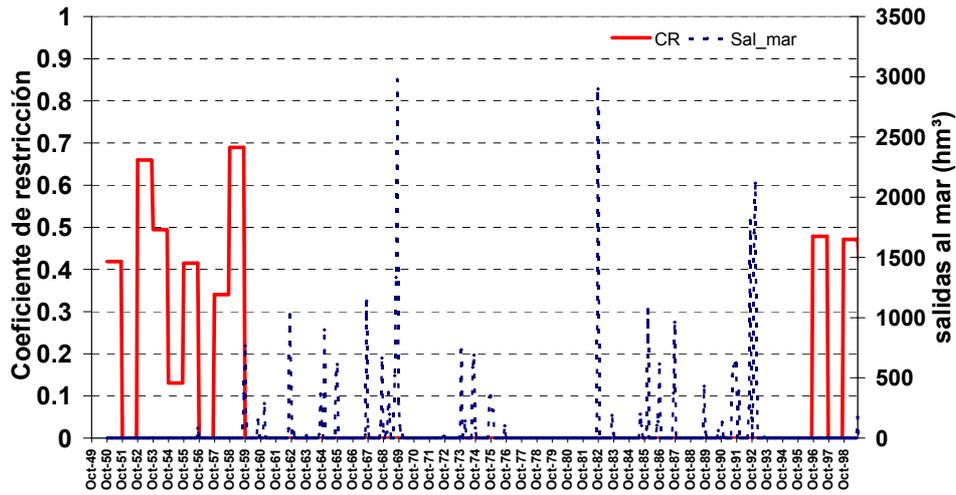


Figura 4.52 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(V_{0t} + Q_{t-1})$.

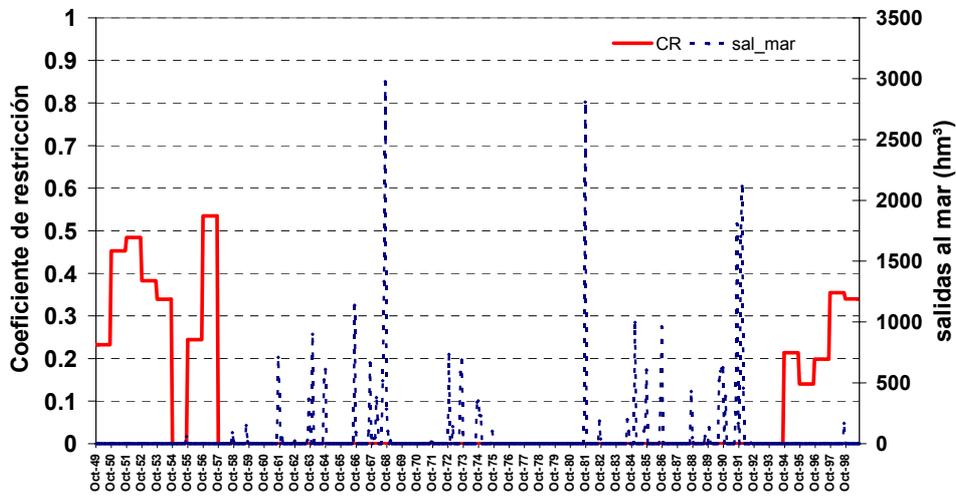


Figura 4.53 Coeficientes de restricción, aplicando la política $f(V_{0t} + Q_t)$.

De los resultados que se presentan en la tabla 4.23 y en las figuras 4.48 a 4.53 se puede concluir entre otras cosas, lo siguiente:

1. Existen periodos en los que el sistema no es capaz de satisfacer íntegramente la demanda. De tal manera que, para mitigar los efectos de estos recortes, que pueden llegar a ser equivalentes a la demanda mensual, se hace necesario establecer una serie de restricciones al inicio del ciclo

- agrícola, para distribuir el déficit a lo largo de ciclo y evitar que se presenten déficits catastróficos que puedan producir pérdidas económicas importantes.
2. Los dos primeros casos que se analizan no garantizan el abastecimiento urbano a través del agua superficial que se tiene concesionada para este uso. Este punto es importante, ya que los acuíferos de la región presentan ya problemas de sobreexplotación.
 3. Considerar una regla escalonada con solo tres niveles de restricción lleva a que en dos periodos anuales no se pueda entregar agua para uso agrícola.
 4. Los resultados de la última fila corresponden a una política de operación en la que se conoce la cantidad de agua que ingresará al sistema durante todo el ciclo agrícola por llegar, es decir, se tendrían esos resultados en el caso de contar con un pronóstico seguro, algo que hasta la fecha no es posible. No obstante podría utilizarse esta regla de operación para realizar pronósticos prospectivos de disponibilidad de agua.
 5. Los resultados de los casos analizados en las filas cuatro a seis son similares en cuanto al número de fallos que se presentan respecto a la asignación al inicio de año y respecto de la concesión, de igual manera la garantía volumétrica es similar. Estos tres tipos de reglas se evaluarán con las series sintéticas generadas previamente.

4.6 Evaluación de las reglas de gestión

Para evaluar las reglas de operación obtenidas se utilizaron cincuenta grupos de series de 50 años de longitud, posteriormente de estas series se seleccionaron sequías con características predeterminadas con el fin de analizar el comportamiento del sistema al implementar las reglas de operación.

4.6.1 Resultados de la evaluación utilizando series largas

Para la evaluación de las políticas de operación con las series sintéticas se utilizaron las mismas condiciones iniciales que se usaron en las simulaciones con la serie histórica. En la tabla 4.24 se presentan los resultados promedio al analizar las 50 series sintéticas.

Tabla 4.24 Evaluación de las políticas de operación analizadas

| Tipos de regla | Vol. Aportación anual promedio (hm ³) | Evaporación anual promedio (hm ³) | Suministro agrícola anual (hm ³) | Suministro urbano, superficial (hm ³) | Salidas al mar (hm ³) | Garantía volumétrica anual (%) | Meses con restricción (%) | Meses con fallos (%) |
|--|---|---|--|---|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Regla lineal (V0) | 4543.12 | 107.90 | 3633.65 | 107.68 | 583.3 | 91.23 | 22.36 | 0.05 |
| Regla lineal 2 ciclos *vol_minG (0.31) | 4543.12 | 105.52 | 3639.34 | 107.67 | 568.16 | 91.37 | 23.28 | 0.10 |
| Vol+aportación(a-s) *vol_minG (0.31) | 4543.12 | 103.67 | 3697.89 | 107.64 | 581.07 | 92.84 | 28.57 | 1.34 |

Como se observa en la tabla anterior, el porcentaje máximo de meses en los que no fue posible entregar el volumen asignado, a cada inicio de año agrícola, para el conjunto de series analizadas; fue tan sólo de 1.34 y corresponde a la política de operación que toma en cuenta la aportación antecedente. Con respecto al porcentaje de meses con restricción, éste ya es superior al 20 %, así que además de este valor es importante revisar la distribución de ocurrencia de estos coeficientes de restricción. En la figura 4.54 se presenta una comparación de la distribución porcentual de los coeficientes para los tres tipos de políticas, en ella se puede ver que en la política que toma en cuenta la aportación antecedente los coeficientes de restricción se agrupan en valores bajos, de tal manera que el 86 por ciento de las restricciones son menores al 40 % de la demanda. Así pues, la probabilidad de que se presente una restricción mayor al 40 % de la demanda para la política de operación que toma en cuenta la aportación antecedente es del 4%, mientras que para la política que considera dos ciclos agrícolas en un año es de 7% y la que toma en cuenta el volumen de almacenamiento inicial es de 12%.

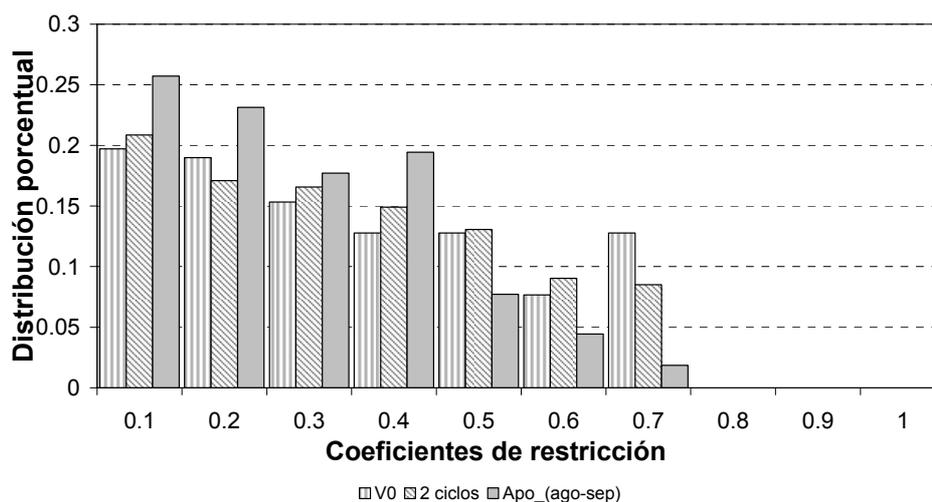


Figura 4.54 Distribución porcentual de coeficientes de restricción

4.6.2 Evaluación con sequías equiprobables a las históricas del sistema

Además de la evaluación del sistema utilizando series largas, que comprenden periodos húmedos y secos, es importante examinar el desempeño de las reglas de gestión con series cortas que presenten sequías similares a las que se presentan con la serie histórica para ello se recurre a las series sintéticas nuevamente.

4.6.2.1 Selección de las características de las sequías a analizar

Del registro histórico de 50 años se observa que se presentan 21 años en los que la aportación es menor a la demanda, que se manifiestan en 11 sequías. De estas 11 sequías la probabilidad de que la duración sea mayor a 1 año es de 36.36%. Este tipo de sequías son las que afectan más al sistema y 3 de ellas superan una intensidad media anual de 1000 hm³, ésta se determina como la magnitud entre la duración. Por tal motivo una de las características para seleccionar las sequías a utilizar en este análisis es la intensidad media.

Para este caso se seleccionan 100 sequías para duraciones de:

1. Dos años, sequías cuya magnitud se encuentre entre 1500 y 2500 hm³
2. Tres años, sequías cuya magnitud se encuentre entre 2500 y 4500 hm³
3. Cuatro años, sequías cuya magnitud se encuentre entre 4500 y 7000 hm³

4.6.2.2 Resultados para los distintos rangos de magnitudes seleccionados

El análisis del funcionamiento del sistema ante distintos tipos de sequía se hizo utilizando los volúmenes objetivos de las presas, correspondientes al final del mes de septiembre. En general se observa que al incrementar la magnitud y duración de las sequías, la garantía volumétrica disminuye y aumenta la probabilidad de que se presente una restricción.

Para las sequías de 2 años y magnitud entre 1500 y 2500 hm³ la garantía volumétrica, para los tres tipos de política, es alrededor del 96% y probabilidad de fallo es cercana a 1%. La probabilidad de restricción varió entre el 10 y el 22%.

En las sequías de 3 años, cuyos rangos de magnitud fueron de 2500 a 4500 hm³, la garantía volumétrica disminuyó al 89% y la probabilidad de que se presente una restricción se encuentra entre 36 y 46 %. La probabilidad de fallo es similar a la que se presenta para sequías de 2 años.

Para sequías de 4 años y magnitudes entre 4500 y 7000 hm³ la garantía volumétrica es aproximadamente del 79 % y la probabilidad de aplicar una restricción es de 60%.

Cabe mencionar que con el almacenamiento que se tiene en el sistema, si los embalses se encuentran en los niveles o volúmenes objetivo para finales del mes de septiembre, no hace falta introducir una restricción en el primer año de sequía, es decir, las restricciones se presentan a partir del segundo año; por ello para sequías de dos años de duración, la garantía volumétrica anual es alta (alrededor del 96%) y a medida que las sequías se van prolongando, esta garantía va disminuyendo y aumenta la probabilidad de establecer una restricción.

Conclusiones y líneas futuras de investigación

El uso de las reglas de operación con restricción en sistemas de recursos hídricos se remonta a los trabajos de Blair T. Bower, Maynard M. Hushmid y William W. Reedy en 1962, quienes ya mencionan que económicamente es aceptable sufrir pequeños déficit en el suministro, para evitar posibles recortes severos tanto en el abastecimiento como en la producción de energía, una vez avanzado el ciclo de vaciado de la presa.

La razón por la cual esta línea de trabajo data de 1962 es la aparición de las primeras computadoras que hacen posible la simulación y análisis de sistemas de recursos hídricos complejos. En los últimos 45 años se ha venido trabajando en mejorar el aprovechamiento de los sistemas de recursos hídricos, debido al aumento constante de las demandas y a la recurrencia de periodos de baja disponibilidad. No obstante hasta la fecha no se ha presentado un trabajo que logre integrar tantas herramientas como las que en esta tesis se han utilizado. Esto ha sido posible gracias al trabajo continuo que el grupo de recursos hídricos de la Universidad Politécnica de Valencia viene desarrollando desde hace casi 20 años y al de diversos investigadores por los avances que han logrado en ésta área del conocimiento.

Los trabajos realizados hasta la fecha sobre la determinación de políticas de operación con restricción a la demanda, generalmente han utilizado esquemas simplificados, entre ellos, problemas hipotéticos. En esta investigación se ha decidido utilizar un sistema de riego localizado en el noroeste de México, que consta

de cuatro embalses de almacenamiento, tres acuíferos y un conjunto de infraestructura para abastecer a uno de los distritos de riego más importantes de México debido a la cantidad y variedad de productos que en éste se cultivan.

Entre las conclusiones generales se destacan las siguientes:

1. Las reglas de operación que se obtienen con el procedimiento propuesto establecen restricciones sólo si se detectan condiciones de baja disponibilidad del recurso.
2. Es necesario incorporar en el proceso de optimización la variabilidad de las series de caudales a través del uso de series sintéticas o de la manipulación de la serie histórica, para garantizar que los niveles de restricción que se establecen funcionen para varios escenarios de disponibilidad.
3. En condiciones de escasez las reglas de operación discretas y las lineales presentan resultados similares en cuanto a suministro de agua. Es decir, la cantidad de agua que se deja de entregar en un ciclo agrícola se entrega en el siguiente ciclo. La diferencia radica en que las segundas son más fáciles de asimilar por los usuarios, pues a mayor disponibilidad del recurso, esperarán mayor volumen de asignación.
4. El periodo de optimización para determinar una regla de gestión de sistemas de recursos hídricos depende de los usos que se requiere garantizar, así como de la capacidad de regulación del sistema. Puesto que a través de este se pueden llegar a determinar los volúmenes de reserva, con el fin de anticiparse a condiciones de sequía.
5. El tiempo de anticipación a una sequía es propio de cada sistema de recursos hídricos y depende del volumen almacenado al iniciar la sequía y de las características de la misma.
6. La condición de almacenamiento inicial se verá más atenuada mientras más largo sea el periodo de optimización y dejará de tener importancia en el momento en el que los embalses se llenan.
7. Para este tipo de análisis es recomendable que la longitud de las series de aportaciones sintéticas que se generan sea equivalente al de la serie histórica, con el fin de reproducir los estadísticos del registro y las características de las sequías que se identifican en el mismo.
8. Si se analiza un sistema con una serie de longitud larga, es más fácil gestionar una sequía si ésta se presenta en medio o al final del registro que al inicio.
9. Si se incrementa el valor de disponibilidad (Vo_t , ó Vo_t+Q_{t-1}) para el que se abastece la demanda en su totalidad, se reduce el número de fallos respecto al volumen asignado, pero se producen más derrames que no son aprovechados por el mismo sistema.

10. En las reglas de operación planteadas, además de determinar la cantidad de agua a asignar al inicio del ciclo agrícola, se toma en cuenta la procedencia del agua, a través del establecimiento de prioridades entre los diferentes embalses del sistema. En la determinación de las zonas para definir de cual embalse se extrae el agua, también están involucrados los volúmenes objetivos que se determinan con la metodología propuesta.

Conclusiones respecto al caso de estudio:

a) En la generación de las series de caudales:

1. El método que presenta mejores resultados en la reproducción de los estadísticos y de las características medias de las sequías históricas es el de los hidrogramas mezclados, seguido del método que utiliza las redes neuronales y finalmente el modelo autorregresivo de orden 2.
2. El estadístico que presenta peores resultados en su reproducción es el coeficiente de asimetría o sesgo.

b) En el proceso de optimización:

1. Es necesario utilizar un periodo de optimización mayor o igual a 5 años para garantizar los usos urbanos e industriales de la región.
2. Para periodos mayores a 5 años, el número de déficit de magnitud 2 disminuye y aumentan los de magnitudes 3 y 4, pero se necesita más volumen de reserva. Los déficits de magnitud 2 son aquellos que corresponden a la racionalización máxima que se establece y los de magnitud 4 a la restricción mínima.

c) En la determinación y evaluación de las políticas de operación obtenidas

1. Se determinaron y evaluaron tres tipos de políticas de operación. Estas políticas fueron definidas a partir de los siguientes indicadores: a) volumen almacenado al inicio del año agrícola, b) disponibilidad compuesta por la suma del volumen almacenado más las aportaciones de agosto y septiembre del año anterior (aplicación anual) y c) volumen almacenado al inicio del ciclo agrícola (aplicación semestral, ciclo otoño-invierno y primavera verano).
2. El periodo agregado de aportaciones que presentó mayor correlación con los volúmenes anuales del siguiente año agrícola fue el correspondiente a los meses de agosto – septiembre, por ello fue el que se utilizó para la definición de la regla de gestión que toma en cuenta la aportación antecedente.
3. Se garantizan los usos urbanos e industriales de la región al 100 %.

4. Se incluyen los acuíferos de la región, pero solo se permite el abastecimiento a las demandas con los volúmenes que se tienen concesionados para los distintos usos.
5. La demanda de agua potable que abastece la presa Eustaquio Buelna es muy baja, comparada con la evapotranspiración de la presa, por lo tanto, se recomienda abastecer la demanda agrícola cuando se tenga disponibilidad en el embalse en lugar de tenerla de reserva, para el abastecimiento urbano, pues se necesitarían niveles de reserva elevados para garantizar la demanda urbana, que en los meses de mayor demanda y menor disponibilidad se pierden por evapotranspiración.
6. Respecto a la evaluación de las políticas de operación, las tres políticas que se evaluaron presentan resultados satisfactorios en cuanto a la garantía volumétrica y a la ocurrencia de fallos respecto al volumen asignado, esto se debe a que se obtuvieron a partir del mismo proceso de optimización de los volúmenes suministrados. Aunque la política que toma en cuenta la aportación antecedente presenta resultados más desfavorables en cuanto a la ocurrencia de fallos y probabilidad de recurrir a una restricción, cuando se analiza la distribución porcentual de los coeficientes de restricción; la probabilidad de que se presente una restricción mayor al 40 % de la demanda es del 4% mientras que para las políticas que consideran el volumen inicial semestral y el anual, es 7 y 12% respectivamente.

Conclusiones respecto a los procesos que se pueden mejorar en las herramientas utilizadas:

1. El proceso que lleva a la determinación de los niveles de restricción a través del modelo OptiGes sería más rápido si se incluye la opción de optimizar por ciclo agrícola.
2. En el mismo OptiGes, si se incluye un número mayor de niveles de restricción la definición de la regla de gestión sería más directa.
3. El ajuste de los tipos de reglas a los que se llega con la metodología propuesta se realiza con el modelo SimGes. Esto se llevo a cabo durante el desarrollo de esta tesis.
4. Para facilitar el análisis de reglas de operación que tomen en cuenta una aportación es recomendable incorporar en el modelo SimGes rutinas que permitan la lectura conjunta de volúmenes embalsados y aportaciones antecedentes y futuras, y el proceso de estos datos en forma conjunta con los resultados para analizar políticas de operación como las que se proponen en esta tesis.

5. El proceso de parada del modelo SERENA debe revisarse, puesto que las series obtenidas presentan variación en cuanto a la reproducción de los estadísticos, para distintos grupos de series sintéticas.
6. En el método de los hidrogramas mezclados no se diferencia entre años de abundancia y de baja disponibilidad. Puede hacerse una distinción entre este tipo de años para utilizarse en la generación de series.

Aportaciones originales

- Se propone una metodología general para desarrollar políticas de operación en sistemas de recursos hídricos. El tipo de políticas que se obtienen con la metodología propuesta maximiza el suministro agrícola, garantizando la demanda urbana e industrial. Estas políticas permiten detectar la necesidad de establecer una racionalización del agua si el indicador que activa la restricción revela una disminución de los recursos hídricos. Una vez detectada esta condición se establece la restricción a la demanda al inicio del ciclo agrícola, con el fin de alertar a los agricultores para que puedan reajustar sus planes de riego; ya sea disminuyendo el área a cultivar o cambiando el plan de cultivos y así prevenir déficits importantes ya iniciado el ciclo.
- Al Identificar, el periodo mínimo de optimización a través de la optimización por tramos de una serie de aportaciones larga (>30 años), se logra determinar los volúmenes de reserva que sirven para garantizar usos urbanos e industriales.
- El usar sequías anuales en la optimización para determinar las restricciones, cuando no es posible abastecer íntegramente la demanda.
- Proponer requisitos que deben cumplir las series sintéticas para definir una regla de operación.
- A través de la caracterización y generación de series que se propone, se obtiene un conjunto de series de sequías equiprobables a la serie histórica que sirven para evaluar las políticas de operación.
- Proponer criterios para evaluar las políticas de operación de manera global. Entre ellos se destacan: a) el relacionado con la ocurrencia de fallos consecutivos cuya magnitud sea superior a un X % de la demanda mensual, buscando que la garantía volumétrica sea la mayor posible y b) el relacionado con la probabilidad de sufrir alguna restricción, en este caso, es deseable que la distribución porcentual de las restricciones esté sesgada hacia los menores valores de coeficientes de restricción.
- Se define un procedimiento que permite realizar análisis prospectivos de la disponibilidad de los recursos hídricos al utilizar una regla de operación que considera la aportación durante el periodo de análisis.

Futuras líneas de investigación

Proponer un procedimiento para aprovechar mejor los recursos en épocas de abundancia. Utilizar el agua en la generación de energía, antes de laminarla si en la víspera de la época de lluvias los embalses se encuentran en niveles favorables para satisfacer los usos consuntivos.

El seguimiento de eventos de sequía, así como el establecimiento de relaciones adimensionales, que sean función de las capacidades de almacenamiento de los sistemas y de las magnitudes de las sequías de la región, darán pautas para determinar los periodos de anticipación y con ello mitigar los efectos de las sequías. Para ello habría que analizar otros sistemas de recursos hídricos y comparar la evolución del almacenamiento ante sequías de diferentes magnitudes.

Las reglas de operación que se definieron en esta tesis son lineales, puesto que uno de los objetivos era definir reglas fáciles de asimilar por los distintos integrantes de un sistema de recursos hídricos, sin embargo, se podrían explorar reglas de operación que incluyeran secciones no lineales.

Del resultado del análisis de las series de caudales generadas se observa, que éstas no llegan a reproducir satisfactoriamente el sesgo que presentan algunos meses de las series históricas. En ese sentido, es necesario seguir el desarrollo de métodos de generación de series temporales que involucren más este estadístico. Por ejemplo Domínguez y Arganis (2006) ya proponen una modificación al modelo de Svanidze Modificado en el que reproducen mejor este estadístico, no obstante debe seguirse trabajando en esa línea.

Seguir en la búsqueda de métodos que mejoren la predicción de aportaciones a mediano y largo plazo utilizando quizás pronósticos de lluvia.

Incluir en los indicadores que activan una restricción información económica de producción de la agricultura y/o información ambiental de las distintas fuentes de abastecimiento.

Este trabajo desarrolla el proceso para definir un tipo de regla de operación seleccionado a priori, pero podría ser generalizado a otros tipos de reglas.

Referencias

- Andreu, J. (1992): **“Conceptos y métodos para la planificación hidrológica”**. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad politécnica de Valencia.
- Andreu, J. (1992): **“Modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos”**. Manual de Usuario. Universidad Politécnica de Valencia.
- Andreu, J., Capilla J. (1993): **“Optimization and simulation models applied to the Segura water resources system”**. Stochastic Hydrology and its Use in Water Resources Systems Simulation and optimization. Edita: J. B. Marco, R. Harboe and J. D. Salas. Kluwer Academic, Dordrecht, 14 p.
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J. y Ferrer, J.(1996): **“Modelo SIMGES de simulación de la gestión de recursos hídricos, incluyendo utilización conjunta”**. Manual de usuario. Universidad Politécnica de Valencia.
- Anthony R.N. (1965): **“Planning and Control Systems: a framework for analysis”**. Harvard Univ. Graduate School of Business Administration, Harvard.
- Ardekaaniaan, R., and Moin, S. (1995): **“A comparison of different optimization techniques based on a real water resources allocation problem”**. Proc., Regional Conf. on Water Resources Management, Isfahan, Iran.
- Arganis J.M. (2004): **“Operación Óptima de un Sistema de Presas en Cascada para Generación Hidroeléctrica Tomando en cuenta condiciones reales de operación y el uso de muestras sintéticas para el pronóstico”**. Tesis doctoral dirigida por el Dr. Ramón Domínguez Mora, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks (Govindaraju, R.) (2000a): **“Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts”**. Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), pp. 115-123.
- Bayazit, M., Ünal N.E. (1990): **“Effects of Hedging on Reservoir Performance”**. Water Resources Research, 26(4), pp. 713-719, April
- Beard, L. R. (1972): **“Status of water resources systems analysis”**. Paper presented at Seminar on Hydrological Aspects of Project Planning, Hydrol. Eng. Cent., U.S. Army Corps of Eng., Davis, Calif., March.
- Bower, T. B., M. M. Hufschmidt and W. W. Reedy (1962): **“Operating procedures: Their role in design of water resources systems by simulation analysis”**.

Design of Water Resources Systems, edited by A. Maass, pp. 444-460, Harvard University Press, Cambridge, Mass.

- Box, G. E. P. y Jenkins, G. (1970): ***“Time series analysis, forecasting and control”***. 1st edition, Holden-Day Inc., San Francisco.
- Bras R.L. y Rodríguez I.I. (1985): ***“Random Functions and Hydrology”***. Addison-Wesley Publishing Company. ISBN 0-201-05865-0
- Cai, X., McKinney, D., and Lasdon, L. (2001): ***“Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach”***. Adv. Water Resour., 24(6), pp. 667–676.
- Cancelliere, A., Ancarani A., Rossi G. (1998): ***“Susceptibility of Water Supply Reservoirs to Drought Conditions”***. Journal of Hydrology Engineering, 3(2), pp. 140-148.
- Carr, D.P., y Undrehill, H.W. (1974): ***“Los métodos de simulación en el aprovechamiento de los recursos hídricos”***. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO) CEDEX (1997). ***“Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y las demandas de agua de riego en determinadas regiones de España”***. Informe técnico para el Ministerio de Medio ambiente de España. Madrid.
- Chaturdevi, M.C. (2000): ***“Water for food and rural development: developing countries”***. Water international, 25(1), pp. 40-53.
- CNA-IMTA (2000): ***“Reglamento de operación del sistema de riego San Lorenzo - Culiacán –Humaya - Mocorito”***. Jiutepec Morelos. México
- CNA (2000): ***“Programa Hidráulico de Gran Visión 2001 – 2025, de la Región III Pacífico Norte”***. México
- CNA-IMTA (2000a): ***“Reglamento de operación del sistema de riego San Lorenzo - Culiacán –Humaya - Mocorito”***. Jiutepec Morelos. México
- CNA-IMTA-CEDEX (2000): ***“Planificación, diseño, modernización y operación de la red principal en zonas de riego”***
- Cohon, J. L., and D. H. Marks, (1975): ***“A review and evaluation of multiobjective programming techniques”***. Water Resour. Res., 11(2), pp. 208-220.

- Conde, C. (2006): **“México y el cambio climático global”**. Dirección General de Divulgación de la Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Crawley, P., and Dandy, G. (1993). **“Optimal operation of multiplereservoir system”**. J. Water Resour. Plan. Manage., 119(1), pp. 1–17.
- Croley, T.E. (1979): **“Risk in reservoir design and operation: a state of the art review”**. En Reliability in water resources management, Edit. E.a. McBean et al., Water resources Publications, Littleton, Colorado.
- Díaz G., and Brown T. (1997). **“AQUARIUS: A general model for efficient water allocation in river basins”**. Proceedings of 27 th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Theme A: Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance, Pages 405-410, August 10-15, 1997, San Francisco, CA, published by the American Society of Civil Engineers, New York.
- Domínguez, R., Arganis, M.L (2006). **“Determinación de registros sintéticos de ingresos por cuenca propia de un sistema de presas de la región noroeste de México caracterizada por eventos invernales”**. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela.
- Dorfman, R. (1962): **“Mathematical Models: The multistructure approach”**. Design of water resource Systems, Maass et al. Harvard University Press, fourth printing 1970
- Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G. (1980): **“On the definition of droughts”**. Water Resources Research, 16(2), 297-302.
- Draper, A. J., Lund Jay R. (2004): **“Optimal Hedging and Carryover Storage Value”** Technical notes, J. of water resources planning and management, © ASCE / January-february, pp. 83-87.
- Escalante, C., y Reyes, L. (2004): **“Análisis de sequías”**. Vol. I, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Estrela, T. (1992): **“Metodologías y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos”**. Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. Ministerio de Obras Públicas.

- Estrada, F. (1994): **“Garantía en los sistemas de explotación de los recursos hidráulicos”**. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Estrada, F., y Luján, J. (2000): **“Criterios de Garantía en la Planificación de Regadíos”**. Curso sobre formulación y evaluación de planes de riegos. CEH, CEDEX, Madrid.
- Fiering M. B. y Jackson B. B. (1971): **“Synthetic streamflows”**. Water Resources Monograph Series.
- García A. (2005): **“Análisis del Sistema San Lorenzo - Culiacán – Humaya - Mocerito, utilizando la plataforma de simulación STELLA RESEARCH y SIMGES”**. Trabajo de investigación presentado para obtener el Diploma de Estudios Avanzados por la Universidad Politécnica de Valencia.
- Goicoechea, A., Hansen, D., and Duckstein, L. (1982): **“Multiobjective decision analysis with engineering and business applications”**. Wiley, New York.
- Guerrero-Salazar, P. y Yevjevich, V. (1975): **“Analysis of drought characteristics by the theory of runs”**. Hyd. Paper 80. CSU, Fort Collins.
- GWP – TAC (2000) **“Manejo integrado de los recursos hídricos”**. Documento de trabajo TAC N° 4 Global water partnership. Marzo 2000
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982): **“Reliability, Resilience, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation”**. Water Resources Research, 18(1), 14-20.
- Haykin, S. (1999): **“Neural networks. A comprehensive foundation”**. Prentice-Hall, New Jersey.
- Hecht-Nielsen, R. (1988): **“Neurocomputing: picking the human brain”**. IEEE Spectrum, 25, pp. 36-41.
- Hiew, K., Labadie, J., and Scott, J. (1989): **“Optimal operational analysis of the Colorado-Big Thompson project”**. Computerized decision support systems for water managers”, J. Labadie *et al.*, eds., ASCE, Reston, Va., pp. 632-646.
- Hilera, J. R. y Martínez, V. J. (1995): **“Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones”**. Ra-ma, Madrid.

- Houck, M. H., and J. L. Cohon (1978): ***“Sequential explicitly stochastic linear programming models: A proposed method for design and management of multi-purpose reservoir system”***, Water Resour. Res., 14(2), pp.161-168.
- Hufschmidt, M., and M. B. Fiering (1966): ***“Simulation Techniques for Design of Water Resource Systems”***. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Ilich, N. (2001): ***“The benefits of replacing LP solvers in basin allocation models with a generalized nonlinear evolutionary network flow solver”***. Proc., World Water and Environmental Resources Congress, D. Phelps and G. Shelke, eds., ASCE, Reston, Va.
- Ito, K., Xu, Z.X., Jinno, Z., Kojiri, T., and Kawamura, A. (2001): ***“Decision Support System for Surface Water Planning in River Basins”***. Journal of water resources Planning and Management, vol.127, No. 4.
- Jiménez, E.M., (1996). ***“Programa AX. Area de Riesgos Hidrome-teorológicos”***. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- Klemes, V. (1969): ***“Reliability estimates for storage reservoir with seasonal input”***. Journal of Hidrology, 7, 198-216.
- Klemes, V. (1977): ***“Discrete representation of storage for stochastic reservoir optimization”***. Water Resour. Res., 13(1), pp. 149-158.
- Klemes, V. (1987): ***“Drought prediction: A hydrological perspective”***. In D.A. Wilhite and W.E. Easterling (eds), Planning for drought: Toward a reduction of societal vulnerability, Boulder, CO: Westview Press.
- Ko, S. K., Fontane, D., and Labadie, J. (1992). ***“Multiobjective optimization of reservoir systems operations”***. Water Resour. Bull., 28(1), pp. 111-127.
- Kohonen, T. (1988): ***“An introduction to neural computing”***. Neural Networks, 1, pp. 3-16.
- Kuczera, G. (1993): ***“Network linear programming codes for water supply headworks modeling”***. J. Water Resour. Plan. Manage., 119(3), pp. 412-417.

- Labadie, J. W. (2004): "**Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review**". Journal of Water Resources Planning and Management, (march-april 2004), pp. 93-111.
- Lachtermacher, G. y Fuller, J. D. (1994): "**Backpropagation in hydrological time series forecasting**". Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering - Time series analysis in hydrology and environmental engineering, K. W. Hipel *et al.* (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 229-242.
- Lane, W. L. (1979): "**Applied stochastic techniques (LAST computer package), user manual**". Division of Planning Technical Services, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Lettenmaier, D. P. (1993): "**Some thoughts about the state-of-the-art in stochastic hydrology and streamflow forecasting, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on stochastic hydrology and its use in water resources systems simulation and optimization**". J. B. Marco *et al.* (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 209-215.
- López, J. L. (1993): "**Simulación de sistemas de recursos hidráulicos, en Conceptos y métodos para la planificación hidrológica**", J. Andreu (ed.), CIMNE, Barcelona, pp. 125-135.
- Loucks D.P. (1968): "**Computer models for reservoir regulations**". J. Sanit. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 94 (SA4), pp 657-669.
- Loucks D.P., Stedinger J.R., Haith D.A. (1981): "**Water Resource systems planning and analysis**". Prentice Hall Inc. ISBN 0-13-945923-5.
- Loucks, D. P. (2000): "**Sustainable water resources management**". Water International, 25(1), pp. 3-10.
- Lund, J.R. (1997): "**Drought Management and water transfer programs: recent developments and research in California**". En "Drought management planning in water supply systems". Edit. E.Cabrera y J.García Serra. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.242- 260.
- Maass A., Hufschmidt M.M., Dorfman R., Thomas J.R. H., Marglin A.S., Maskew G.F (1962).: "**Design of Water-Resource Systems**" Harvard University Press. Fourth printing, 1970. United States of America.

- Maier, H.R. y Dandy, G.C. (2000): **“Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications”**. Environmental Modelling & Software, 15, pp. 101-124.
- Manne, A.S., (1962): **“Product mix alternatives: Flood control, electric power and irrigation”**. Int. Econ. Rev., 8(1), pp. 30-54.
- Manzer, D. F. y Barnett M. P. (1962): **“Analysis by simulation: Programming techniques for a High-Speed Digital Computer”**. Design of Water-Resource Systems. Maass *et al*, cuarta edición 1970, pp. 325-390.
- Marglin, S. (1967): **“Public Investment Criteria”**. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Meier W.L., Jr. y Brightler C.S. (1967): **“An optimization method for branching multi-stage water resources systems”**. Water resources research, 3 (3), pp. 645-652.
- Ming-Yen Tu, Nien-Sheng Hsu y William W.-G. Yeh (2003): **“Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules”**. Journal of Water Resources Planning and Management, © ASCE, march-april, pp. 87-97.
- Neelakantan T. R., Pundarikanthan N. V. (1999): **“Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System”**. Water Resources Management 13, pp. 409–426.
- Niemczynowicz, J.(2000): **“Present challenges in water management: a need to see connections”**. Water international, 25 (1),pp 139-147.
- Ochoa, J.C. (2002): **“Modelo Estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequías”**. Tesis doctoral dirigida por: D. Joaquín Andreu Álvarez y D. Rafael García Bartual. Presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Otero, J., Labadie, J., and Haunert, D. (1995): **“Optimization of managed runoff to the St. Lucie estuary”**. Proc., First Int. Conf., W. Espey Jr. and P. Combs, eds., Water Resources Engineering Division, ASCE, San Antonio.

- Parikh, S.C. (1966): **“Linear decomposition programming of optimal long range operation of a multi-purpose reservoir system”**. Rep. ORC 66-28, Poer.Res. Cent., Univ. of Berkeley, 1966.
- Raman, H. y Sunilkumar, N. (1995): **“Multivariate modeling of water resources time series using artificial neural networks”**. Journal of Hydrological Sciences, 40, pp. 145-163.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. y Lane, W. L. (1980): **“Applied modeling of hydrologic time series”**. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Salas, J. D., Delleur J.W., Yevjevich, V. y Lane, W.L. (1985): **“Applied modeling of hydrologic time series”**. Water Resources Publications.
- Salas, J. D., Saada, N. M., Lane, W. L. y Frevert, D. K. (1996): **“Stochastic analysis modelling and simulation (SAMS)”**. U. S. Department of Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Salas, J. D., Markus, M. y Tokar, A. S. (2000): **“Streamflow forecasting based on artificial neural networks”**. Artificial neural networks in hydrology, R. S. Govindaraju y A. R. Rao (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 23-51.
- Sánchez, S. T. (1999): **“Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos con Toma de Decisión Basada en Riesgo”**. Tesis doctoral dirigida por D. Joaquín Andreu Alvarez, presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia –España.
- Sánchez S.T., Andreu, J., y Solera, A. (2001): **“Gestión de Recursos Hídricos con Decisiones Basadas en Estimación del Riesgo”**. Ed.: Universidad Politécnica de Valencia. I.S.B.N.84-9705-037-1.
- Sharif, M., and Wardlaw, R. (2000): **“Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: Case study”**. J. Comput. Civ. Eng., 14(4), pp. 255–263.
- Shih J.S. y ReVelle Ch.(1994): **“Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule”**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.120, No. 5.

- Shih J.S. y ReVelle Ch.(1995): **“Theory and Methodology Water supply operations during drought: A discrete hedging”**. European Journal of Operational Research 82, pp.163-175.
- Shiau, J.T. y Lee, H.C. (2005): **“Derivation of Optimal Hedging Rules for a Water-supply Reservoir through Compromise Programming”**. Water Resources Management 19, pp. 111–132.
- Simonovic, S. P. (2000): **“Tools for water management: one view of the future”**. Water International, 25(1), pp. 76-88.
- Stern, H. S. (1996): **“Neural networks in applied statistics”**. Technometrics, 38(3), pp. 205-214.
- Solera, A. (2003): **“Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistémica de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar”**. Tesis doctoral dirigida por D. Joaquín Andreu Alvarez, presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia –España.
- Stedinger, J. R. (1978): **“Comment on ‘Value of information in reservoir optimization’**. Water Resour. Res., 14(5), pp. 984-986.
- Tang, Z., de Almeida, C. y Fishwick, P.A. (1991): **“Time series forecasting using neural networks vs box-jenkins methodology”**. Simulation, 57(5) pp. 303-310.
- Thomas, H. A. y Fiering, M. B. (1962): **“Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation”**. Design of water resources systems, A. Mass *et al.* (eds.), Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Thomas, H. A., and P. Watermeyer, (1962): **“Mathematical models: A stochastic sequential approach”**. Design of Water Resource Systems, edited by A. Maass, pp. 540-564, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- UN (1997): **“Economic and Social Council, Comission on Sustainable Development”**, Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world (E/CN.17/1997/9)

- UPV (2002): **“Modelo de análisis de series hidrológicas”**, MASHWIN. Manual de usuario. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente, Universidad Politécnica de Valencia
- USBR (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation) Pacific Northwest (2000): **“Region River and Reservoir Operations Simulation of the Snake River”**. Application of MODSIM to the Snake River Basin.
- Villalobos, A., García A., Hidalgo, J., Rivera J., 2002. **“Modelo dinámico de la cuenca del Río Culiacán”**. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe final. Jiutepec Morelos. México.
- Villalobos, A (2003): **“Análisis previos para la obtención de reglas de gestión de recursos hídricos en cuencas mexicanas”**. Trabajo de investigación presentado para obtener el Diploma de Estudios Avanzados por la Universidad Politécnica de Valencia.
- Villalobos, A., García A., Hidalgo, J., Rivera J., (2004): **“Modelo para la planificación de la gestión de las cuencas de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito”**. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro, Brasil
- Villalobos de A. Angel A. (2007): **“Análisis y seguimiento de distintos tipos de sequía en la cuenca del río Jucar”**. Tesis doctoral dirigida por D. Joaquín Andreu Alvarez, presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia –España, 261 p.
- Vlachos E., y James, L.D. (1983): **“Drought impacts”**. En "Coping with droughts" Editor V. Yevjevich, Water Resources Publications, Colorado, p.p.44-73.
- Wagner, A. I., y Villalobos, A. A. (1994): **“Planeación y manejo del agua. Aplicación a la cuenca Lerma-Chapala”**. Proyecto SH9311, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Wagner, A. I., Rivera J. (1996): **“Sismapre: Sistema para determinar políticas de operación óptimas de una presa”**, XIV Congreso Nacional de Hidráulica, Artículo núm. 76, Tomo I. Acapulco, Guerrero, México.

- Wai-See Moy, Cohon J.L. y Reville Ch. S. (1986): "**A programming Model for Analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir**". Water resources research, Vol 22, No 4, pp 489-498.
- Yeh, W. W-G. (1985): "**Reservoir Management and Operations Models: A State of-the-art Review**". Water resources research, Vol. 21, No. 12, pp.1797-1818.
- Yevjevich, V. (1963): "**Fluctuations of wet and dry years. Part 1. Research data assembly and mathematical models**". Hydrology Paper 1, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Yevjevich, V. (1967): "**An objective approach to definition and investigation of continental droughts**". Hyd. Paper 23, CSU, fort Collins.
- Zadeh, L. (1963): "**Optimality and non-scalar-valued performance criteria**". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 8, pp. 59-60.

Anexo

Herramientas informáticas utilizadas

Cabe destacar, que el uso de estas herramientas se debe a la facilidad de contar con la mayoría de ellas, dado que cuatro de las cinco que se describen fueron desarrolladas por el grupo de Ingeniería de recursos hídricos de la Universidad politécnica de Valencia, sin embargo existen otras cuyas bondades son similares que pudieron haber sido utilizadas.

En cuanto a las herramientas, se utilizaron tres de los seis módulos que comprende el Sistema Soporte de Decisión denominado AQUATOOL, siendo estos: OptiWin, SimWin y MASHWIN los cuales se describen a continuación; SERENA que está en proceso de formar parte de AQUATOOL, Sismapre (Wagner *et al* 1996), desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Antes de pasar a la descripción de estos programas, es importante señalar que OptiWin y SimWin son las interfaces de los programas OptiGes (Andreu 1992) y SimGes (Andreu *et al*, 1996) respectivamente. Así que en los siguientes apartados se prestará más atención a éstos últimos que a sus interfaces, puesto que es importante conocer las formulaciones que cada uno de ellos utiliza para resolver los problemas de análisis de recursos hídricos. En cuanto a las formulaciones que usan los modelos de generación de series sintéticas, éstas se citan en el capítulo 1.

A.1 Modelos de generación de series sintéticas

A.1.1 MASHWIN

El modelo de análisis de series hidrológicas (MASHWIN) es un modelo de análisis estocástico de tipo mensual, destinado al estudio de series temporales de aportaciones pertenecientes a un sistema hidráulico. Su utilidad consiste en ser una herramienta de cálculo y análisis para la definición de la estructura estocástica a la que mejor se ajusta un conjunto de series temporales de aportaciones.

El modelo MASHWIN combina una modelación periódica estocástica mensual mediante una modelación auto regresiva y de media móvil (ARMA) multivariada, con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane (Lane, 1979. Citado por Salas *et al.*, 1980) que está basado en el modelo de desagregación de Valencia y Schaake (1973. Citados por Salas *et al.*, 1980). Además el modelo realiza una gran variedad de pruebas de ajuste para todas las fases del análisis. Entre las herramientas disponibles para realizar este tipo de análisis se pueden destacar LAST (Lane, 1979) y SAMS (Salas *et al.*, 1996).

El modelo ha sido fraccionado en un conjunto de aplicaciones que permiten realizar un análisis detallado paso a paso de un conjunto de series hidrológicas. Y que a su vez es coordinado en todos los pasos parciales por una interface de usuario que permite acceder automáticamente a todas las fases del análisis.

La interface de usuario controla el acceso a todas las pruebas realizadas por medio de un árbol similar al de directorios del explorador de Windows, que situado en el margen izquierdo de la pantalla permita al usuario navegar entre las distintas alternativas del análisis. Cuando el usuario selecciona un elemento del árbol, el programa cargará las opciones de trabajo en el nivel correspondiente, y una pantalla de texto en la que puede verse el informe escrito del proceso correspondiente a la opción seleccionada. Además el usuario tiene acceso a una gran variedad de gráficos relativos al análisis concreto que tiene en pantalla. Este programa es de acceso libre y puede descargarse de la página www.upv.es/aquatool, donde también se encuentra el manual de usuario.

A.1.2 SERENA (Software para el Entrenamiento de REdes Neuronales Artificiales)

Este programa está en la fase de inserción al DSS AQUATOOL, por lo cual no se encuentra aún en la página electrónica, pero las características del mismo así como

las bases matemáticas en las que se fundamenta se encuentran descritas en Ochoa (2002).

A grandes rasgos y como lo menciona su autor este programa consiste de dos módulos que funcionan de manera independiente, cada uno de los cuales está conformado por una serie de subrutinas. Un módulo está destinado a los cálculos relacionados con el entrenamiento de la red neuronal, y el otro módulo se encarga de la generación de caudales sintéticos.

El funcionamiento de SERENA, es el siguiente:

Primero se especifica si se va a realizar el entrenamiento (E) de una red neuronal o si se van a generar (G) series sintéticas con una red previamente entrenada y dependiendo de la elección se realizan los pasos correspondientes.

A.1.2.1 Módulo de entrenamiento

1. Lee los datos, preprocesa los valores correspondientes a las series de caudales observados, y calcula sus estadísticos
2. Entrena la red neuronal, ya sea con presentación fija de patrones o presentación aleatoria, y realiza la predicción de caudales a un intervalo de tiempo, empleando como datos los caudales históricos.
3. Obtiene las series residuales neuronales, y estiman sus estadísticos básicos, sus funciones de auto correlación y sus matrices de correlación cruzada.
4. Imprime en un archivo todos los resultados que luego se emplean como datos para la síntesis de las series de caudal en el módulo de generación.

A.1.2.2 Modulo de generación

1. Lee los datos y preprocesa los caudales iniciales a los que se condiciona la generación sintética
2. Obtienen las series de ruidos blancos que constituyen la componente aleatoria de cada valor sintético, calcula la componente determinística de los caudales, realiza las operaciones inversas al preprocesamiento efectuado en la fase de entrenamiento e imprime en archivo los caudales sintéticos generados.

3. Evalúa e imprime en archivo los estadísticos de las series generadas.

A.2 MODELOS DE GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

A.2.1 OptiGes

El modelo OptiGes es un programa de uso general que realiza la optimización de la gestión de un sistema de recursos hidráulicos a escala mensual. El programa resuelve una red de flujo conservativa, en la que se minimiza la función objetivo:

$$\sum_{t=1}^{N \cdot 12} \left[\sum_{i=1}^{nc} \sum_{j=1}^{ni} \alpha_{i,j} d_{i,j,t} + \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{ni'} \beta_{i,j} d'_{i,j,t} \right] - \sum_{i=1}^{ne} \delta_i v_{i,N \cdot 12} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

nc es el número de conducciones en el esquema, cada una de ellas con el caudal mínimo dividido en ni niveles.

nd es el número de demandas en el esquema, cada una de ellas con la demanda dividida en ni' niveles.

ne es el número de embalses en el esquema.

ni es el número de niveles en que se divide el caudal mínimo de la conducción i .

ni' es el número de niveles en que se divide la demanda i .

$\alpha_{i,j}$ es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d_{i,j,t}$ del nivel j del caudal mínimo de la conducción i en el mes t .

$\beta_{i,j}$ es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d'_{i,j,t}$ del nivel j de la demanda i en el mes t .

Esta función objetivo es lineal y minimiza la suma ponderada de déficit de caudales ecológicos y de suministro a zonas de demanda, y maximiza el volumen almacenado en embalses, $v_{i,N \cdot 12}$, al final de cada período de optimización elegido.

Los factores de ponderación vienen dados por:

$$\alpha_{i,j} = K\alpha - piK1 - jK2 \quad (\text{A.2})$$

$$\beta_{i,j} = K\beta - pi'K3 - jK4 \quad (\text{A.3})$$

$$d_i = 1 + ne - pi'' \quad (A.4)$$

Donde: $K\alpha$, $K\beta$, $K1$, $K2$, $K3$, y $K4$ son constantes y pi , pi' y pi'' son las prioridades asignadas a cada caudal ecológico, cada demanda y cada embalse, respectivamente. Los valores de $K\alpha$, y $K\beta$ son datos que proporciona el usuario y que en principio conviene sean 10000 y 10000 respectivamente. Los valores de $K1$, $K2$, $K3$, y $K4$ son 5, 200, 5 y 200 respectivamente.

La optimización de la función objetivo se realiza sujeta a las siguientes restricciones:

1. La suma de caudales entrantes en cualquier nudo corriente de la red ha de ser igual a la suma de caudales salientes del mismo para cada mes.
2. En los embalses, para cada mes, la suma de volúmenes entrantes más el volumen embalsado a principio del mes ha de ser igual a la suma de volúmenes salientes más el volumen embalsado a final de mes, más el volumen de evaporación.
3. El caudal circulante por una conducción ha de ser menor que la capacidad máxima de la conducción para el mes en cuestión.
4. Además, todas las variables, tales como volúmenes de embalse, caudal circulante por conducciones y volumen suministrado a demandas han de ser positivas o nulas.

Puesto que estas restricciones son también lineales, y el esquema de cuenca es en definitiva una red de flujo, se utiliza para la optimización el algoritmo de optimización de redes de flujo conservativas denominado "out-of-kilter" (Bazaraa y Jarvis, 1977. Citados por Andreu, J. 1992). Para ello el modelo configura, a partir del esquema del usuario y en base a los datos físicos y de prioridades proporcionados sobre el sistema, una red de flujo interna, mucho más compleja que el esquema del usuario.

La confección de esta red y su posterior optimización mediante el uso de un algoritmo de redes de flujo conservativas sirve para:

- Introducir la dimensión temporal. La red de flujo interna es una multiplicación del esquema del usuario que abarca los N años del período a optimizar. Las redes de un mes y la del siguiente están unidas por arcos de transferencia de agua de un mes a otro debidos a los elementos de almacenamiento.
- Contemplar las restricciones físicas del sistema: mantenimiento del balance de masas, de la ecuación de continuidad, capacidades máximas de las conducciones, de los embalses, etcétera.

- Introducir las prioridades entre las distintas demandas y entre los distintos niveles de las mismas, incluidas las demandas de caudal mínimo en tramos de río.
- Encontrar aquella solución de gestión que satisface al máximo las demandas teniendo en cuenta las mencionadas prioridades en caso de escasez.

A.2.1.1 OptiWin

Es la interface del programa OptiGes de tal manera que aquí el usuario define el sistema, y adicionalmente el intervalo de tiempo a optimizar y demás opciones. La pantalla de visualización del OptiWin es un grafo al que se le pueden agregar los siguientes elementos para construir la representación esquemática de un sistema de recursos hídricos, ver figura A.1.

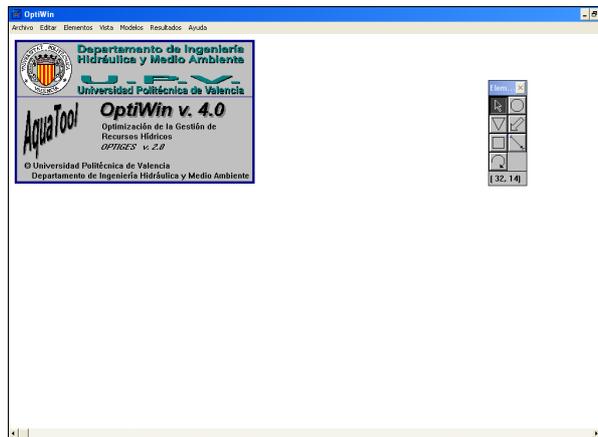


Figura A.1 Pantalla de OptiWin

Elementos para diseñar un sistema de recursos hídricos en Optiwin:

Recursos: aportaciones superficiales

Conducciones: pueden ser ríos o canales que quedan definidos por sus capacidades máximas o mínimas

Infraestructura: Embalses

Elementos de demanda

Nudos: son elementos de conexión

Retornos

El usuario debe crear un esquema con los elementos antes mencionados y los datos característicos de cada uno de ellos antes de poder ejecutar el modelo OptiGes.

A.2.2 SimGes

SimGes es un modelo de simulación de sistemas complejos de recursos hídricos que incluye el uso conjunto, está basado en una red de flujo sujeta a restricciones físicas de la cuenca. La simulación se realiza a nivel mensual y en cuanto a configuración no tiene restricciones, se pueden incluir tantos elementos como sean necesarios. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado por continuidad de balance y para los subterráneos el flujo es calculado a través de modelos uni o pluricelulares e inclusive modelos distribuidos lineales. Toma en cuenta también las pérdidas por infiltración y evaporación así como la relación entre los sistemas superficiales y subterráneos. Tiene salidas gráficas y en archivo de las variables de interés a nivel mensual, anual y valores promedio de la simulación.

Después de que el usuario formula el esquema, lo cual constituye la red de flujo, lo primero que hace el programa es convertir esta red de flujo en una conservativa, siendo esta más complicada que la que introduce el usuario. Cuando está lista la red interna es que empieza el proceso de simulación en la que para que cada mes del periodo se resuelve la red con los datos de aportaciones, demandas y reglas de gestión. Las reglas de gestión se introducen a través de las curvas de zonado de embalses y de los indicadores de alarma. Mediante las primeras y dependiendo de la prioridad en las demandas y en los embalses el programa preferirá dar agua o almacenarla dependiendo del coste que se tenga al dar agua de una zona u otra al abastecer las distintas demandas. Ya que *SimGes* consiste en minimizar la suma:

$$T_E + T_{R1} + T_{R2} + T_{R3} + T_{R4} + T_{R5} + T_{DC} + T_{DN} + T_{RA} + T_{BA} \quad (A.5)$$

donde:

- T_E término de embalses
- T_{R1} a T_{R5} términos de tramos de ríos
- T_{DC} término de demandas consuntivas
- T_{DN} demandas no consuntivas
- T_{RA} recargas artificiales
- T_{BA} bombeos adicionales

Sujeto a las restricciones de conservación de masa y a los límites físicos de transporte de conducciones y capacidad de embalses.

Los términos de la ecuación A.5 se definen a continuación:

$$T_E = \sum_{i=1}^{nemb} \left[\left(\sum_{j=1}^4 (V_{ij} CE_{ij}) + P_i CV \right) \right] \quad (A.6)$$

donde:

nemb: número de embalses

V_{ij} : volumen a final de mes en cada zona j , $j = 1, 2, 3$ y 4 . La zona 1 es la zona de reserva, la zona 2 es la zona inferior, 3 es la zona intermedia y 4 la superior.

P_i : son los vertidos o derrames

CE_{ij} : es el costo ficticio asociado al volumen embalsado en la zona j y viene dado por:

$$CE_{ij} = K_j + NP_i \quad (A.7)$$

K_j : son valores establecidos por defecto: $K_1 = -1700$; $K_2 = -1100$;

$K_3 = -1000$ y $K_4 = -700$

NP_i : es el número de prioridad asignado al embalse

CV : es el coste ficticio asociado al vertido, por defecto $CV = 2000$

En este caso solo tenemos conducciones tipo 1, por lo que solo existe el término TR1

$$T_{R1} = \sum_{i=1}^{ntr1} (D_i CD_i + Q_i CQ_i) \quad (A.8)$$

ntr1: número de tramos de río tipo 1

Q_i : es el caudal que circula por el tramo de río tipo 1

D_i es el déficit con respecto al caudal mínimo declarado

$$D_i = \begin{cases} Q_i^{\min} - Q_i \rightarrow si Q_i^{\min} > Q_i \\ 0 \rightarrow si Q_i^{\min} \leq Q_i \end{cases} \quad (A.9)$$

CD_i es el costo ficticio asociado al déficit de caudal mínimo y viene dado por:

$$CD_i = KD + NP_i \quad (A.10)$$

KD : es un valor constante por defecto igual a 2000

NP_i : es el número de prioridad asignado al caudal mínimo en el tramo de río i

CQ_i : es el costo ficticio asociado al caudal que circula por el tramo de río i .
 $CQ_i=0$ si se declara de otra forma puede valer 1 o ser definido por el usuario es el costo ficticio asociado al caudal que circula por el tramo de río i

En cuanto a las demandas consuntivas:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left(D_i CK + \sum_{t=1}^{nto} (S_{it} (CT_{it} + 1) - DS_{it} CT_{it}) \right) \quad (A.11)$$

ndc : es el número de demandas consuntivas

D_i : es el déficit sobre la demanda total de la zona i en el mes en cuestión

CK : es el costo ficticio asociado con el déficit de la zona de demanda, por defecto igual a 7500

nto_i : es el número de tomas de la demanda i

S_{it} : es el suministro bruto a la toma t de la demanda i

DS_{it} : es el déficit al suministro bruto mínimo calculado por el modelo

De forma que el suministro neto a la toma es:

$$SN_{it} = S_{it} - DS_{it} \quad (A.12)$$

Los términos S_{it} y DS_{it} tiene sentido a lo largo de las iteraciones, pero en la última se tiene que $DS_{it}=0$ y $SN_{it}=S_{it}$, con lo que la ecuación A.11 queda como:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left(D_i CK + \sum_{t=1}^{nto} SN_{it} CT_{it}' \right) \quad (A.13)$$

donde:

$$CT_{it}' = CT_{it} + 1 \quad (A.14)$$

$$CT_{it} = -CTC + (NP_{it} - 1)CDC \quad (A.15)$$

siendo:

CTC y CDC valores constantes e iguales a 750 y 5, respectivamente

NP_{it} : es el número de prioridad de la toma t de la demanda i

A.2.2.1 SimWin

Es la interface del módulo de simulación denominado SimGes. Por lo que al igual que en OptiWin, el usuario debe definir los elementos que componen el sistema a representar, la vinculación de los elementos, las características de cada elemento y sus reglas de operación. La pantalla de visualización del SimWin es más completa que la de OptiWin, ya que en este módulo se vinculan las aguas superficiales con las subterráneas. De tal manera cuenta con elementos adicionales como son:

Recursos: acuíferos

Conducciones: Existen 5 tipos de conducciones

- Las conducciones tipo 1, pueden ser ríos o canales que quedan definidos por sus capacidades máximas o mínimas
- Las conducciones tipo 2, son similares a las tipo 1, pero consideran pérdidas por infiltración.
- Las tipo 3 no tienen información de infiltración, pero si de conexión a acuíferos
- Las 4 y 5 consideran la diferencia de niveles en embalses, esto es útil cuando hay una gestión entre 2 zonas a través de un túnel.

Infraestructura: bombeos adicionales, recargas artificiales

Elementos de toma o demanda

El usuario debe crear un esquema con los elementos antes mencionados y los datos característicos de cada uno de ellos antes de ejecutar el programa SimGes.

A.2.3 Sismapre

Wagner y Rivera (1996) desarrollaron un sistema para el manejo de presas denominado "Sismapre" en el cual se "automatiza" el proceso necesario para obtener reglas de operación, con este modelo se determinan los parámetros de la regla de operación de un embalse en función del volumen almacenado en el periodo de decisión (octubre), y del escurrimiento que ingresó al embalse en el período anual antecedente, figura A.2. En este caso se combinan las aportaciones y las reservas como criterios de decisión o racionalización de la demanda, con este modelo es posible analizar diferentes alternativas de operación y obtener reglas de operación dinámicas adaptables a las condiciones de disponibilidad hídrica, en este sistema también se consideraron diferentes criterios de déficit.

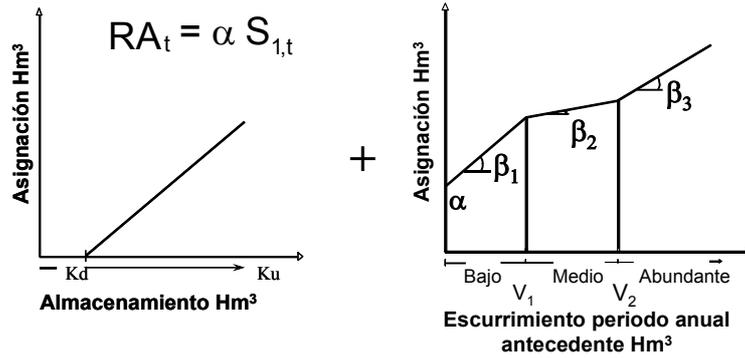


Figura A.2 Regla de operación función del almacenamiento y del escurrimiento del año anterior

El Sismapre está integrado por 3 módulos: planteamiento del modelo en programación lineal, en este módulo se construye la matriz de restricciones a resolver; el módulo de solución y finalmente el módulo de resultados. En las figuras A.3 a A.5 se muestran de forma esquemática las tareas que se realizan con cada uno de los módulos. Con el modelo de optimización se buscan los valores de los parámetros, alfa y beta, en la primera política hay que calcular solamente el parámetro alfa, mientras que en la segunda es necesario estimar alfa y betas, que maximizan el uso productivo del agua. Su principal desventaja es que ha sido desarrollado para analizar la operación de presas aisladas.

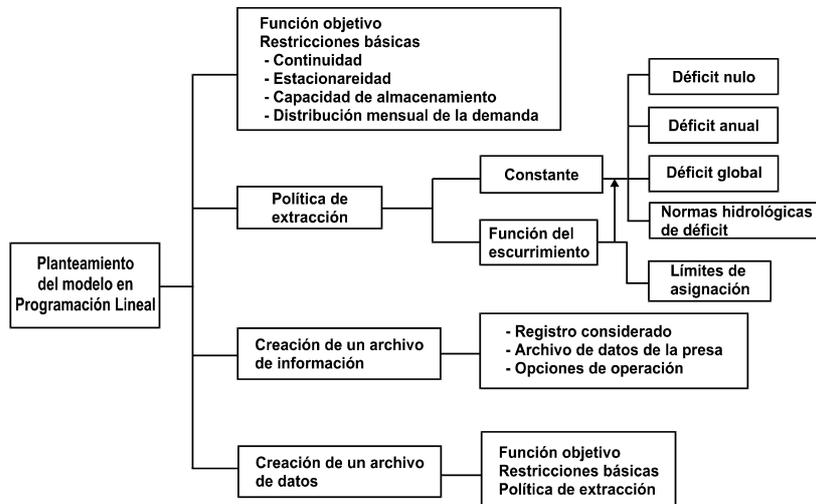


Figura A.3 Módulo uno del Sismapre (planteamiento del problema)

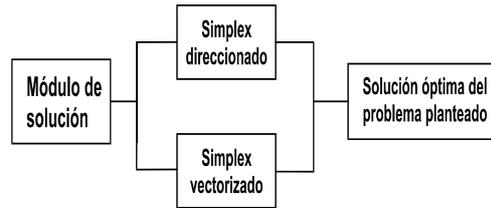


Figura A.4. Módulo dos del Sismapre (solución del problema)



Figura A.5. Módulo tres del Sismapre (resumen de resultados)