

# 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
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Estado del arte .....</b>	<b>9</b>
1.1 Métodos de análisis de los sistemas de recursos hídricos .....	9
<b>1.1.1 Programación lineal .....</b>	<b>10</b>
1.1.1.1 Programación lineal estocástica .....	12
1.1.1.2 Redes de flujo .....	12
<b>1.1.2 Modelos de optimización multiobjetivo .....</b>	<b>13</b>
1.1.2.1 Soluciones no dominadas .....	13
1.1.2.2 Determinación de una solución única .....	14
<b>1.1.3 Métodos heurísticos.....</b>	<b>14</b>
1.1.3.1 Algoritmos genéticos.....	14
1.1.3.2 Redes neuronales artificiales .....	15
<b>1.1.4 Simulación.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.5 Modelos informáticos generales para el análisis de los             sistemas de recursos hídricos .....</b>	<b>17</b>
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
<b>1.2.1 Modelos autorregresivos.....</b>	<b>21</b>
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
<b>1.2.2 Redes neuronales.....</b>	<b>27</b>
<b>1.2.3 Svanidze Modificado (hidrogramas mezclados) .....</b>	<b>29</b>
1.3 Políticas de operación .....	31
<b>1.3.1 Definición de política de operación .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3.2 Política de operación normal .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3.3 Trabajos sobre conceptos, índices y métodos que ayudan a evaluar el desarrollo de un sistema de recursos hídricos .....</b>	<b>32</b>
<b>1.3.4 Políticas de operación con restricción.....</b>	<b>34</b>
1.3.4.1 Políticas de operación lineales.....	37
1.3.4.2 Políticas de operación discretas .....	40
<b>2 Generación y análisis de series temporales .....</b>	<b>43</b>
2.1 Criterios para determinar las series sintéticas a utilizar en los modelos de gestión de sistemas de recursos hídricos .....	44
<b>2.1.1 Índice de parsimonia general .....</b>	<b>44</b>
<b>2.1.2 Criterio de Akaike .....</b>	<b>45</b>
<b>2.1.3 Análisis de la preservación de los estadísticos .....</b>	<b>45</b>
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
<b>2.2.1 Teoría de rachas o sucesiones .....</b>	<b>49</b>
<b>2.2.2 Identificación y caracterización por aportaciones superficiales a cada presa .....</b>	<b>51</b>
<b>2.2.3 Identificación y caracterización por aportaciones al sistema de recursos hídricos .....</b>	<b>51</b>
2.3 Determinar el número de series a generar .....	52
2.4 Evaluación cualitativa y cuantitativa de las series generadas .....	53

<b>3 Políticas de operación con restricción a la demanda.....</b>	<b>55</b>
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
<b>3.4.1 Determinación de los niveles de restricción .....</b>	<b>60</b>
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 sueltas 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
<b>3.5.1 Delineación de la regla de operación .....</b>	<b>63</b>
<b>3.5.2 Ajuste de la regla de operación mediante simulación.....</b>	<b>64</b>
<b>3.5.3 Tipos de reglas .....</b>	<b>65</b>
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
<b>3.5.4 Comparación de los distintos tipos de políticas de           operación con restricción a la demanda .....</b>	<b>68</b>
3.6 Evaluación de las políticas .....	69
3.7 Periodos de anticipación.....	70
<b>4 Integración de la metodología. Aplicación al caso de   estudio.....</b>	<b>71</b>
4.1 Breve descripción de la zona de estudio .....	71
<b>4.1.1 Localización .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.2 Cuencas de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocorito.....</b>	<b>73</b>
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
<b>4.1.3 Sistema de riego San Lorenzo-Culiacán-Humaya-Mocerito .</b>	<b>77</b>
4.2 Recopilación de la información .....	80
<b>4.2.1 Fuentes de abastecimiento .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.2 Usos del agua en la región .....</b>	<b>83</b>
<b>4.2.3 Organismo operador .....</b>	<b>85</b>
4.3 Modelo conceptual.....	85
4.4 Análisis de la serie histórica y de las series generadas.....	86
<b>4.4.1 Estadísticos de la serie histórica.....</b>	<b>86</b>
<b>4.4.2 Modelos estocásticos .....</b>	<b>89</b>
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
<b>4.4.3 Identificación y caracterización de las sequías .....</b>	<b>101</b>
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
<b>4.4.4 Selección de las series a utilizar en los modelos de gestión.....</b>	<b>111</b>
4.5 Obtención de políticas de operación con restricción .....	111
<b>4.5.1 Uso del modelo de optimización para el caso de estudio...</b>	<b>112</b>
<b>4.5.2 Periodo de optimización .....</b>	<b>112</b>
<b>4.5.3 Volúmenes mensuales objetivo .....</b>	<b>113</b>
<b>4.5.4 Influencia de la condición inicial .....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.5 Determinación de los niveles de restricción .....</b>	<b>115</b>
<b>4.5.6 Determinación de una regla de gestión con restricción .....</b>	<b>116</b>

4.5.6.1 Delineación de la regla de operación.....	117
4.5.6.2 Ajuste de las reglas de operación.....	118
<b>4.5.7 Resultados de los tipos de políticas de operación.....</b>	<b>119</b>
<b>4.5.8 Comparación de las políticas de operación obtenidas.....</b>	<b>121</b>
4.6 Evaluación de las reglas de gestión.....	127
<b>4.6.1 Resultados de la evaluación utilizando series largas.....</b>	<b>127</b>
<b>4.6.2 Evaluación con sequías equiprobables a las históricas del sistema.....</b>	<b>129</b>
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
<b>Conclusiones y líneas futuras de investigación.....</b>	<b>131</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>137</b>
<b>Anexo Herramientas informáticas utilizadas.....</b>	<b>149</b>
A.1 Modelos de generación de series sintéticas.....	150
<b>A.1.1 MASHWIN.....</b>	<b>150</b>
<b>A.1.2 SERENA (Software para el Entrenamiento de REdes Neuronales Artificiales).....</b>	<b>150</b>
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
<b>A.2.1 OptiGes.....</b>	<b>152</b>
A.2.1.1 OptiWin.....	154
<b>A.2.2 SimGes.....</b>	<b>155</b>
A.2.2.1 SimWin.....	158
<b>A.2.3 Sismapre.....</b>	<b>158</b>