



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SISTEMAS – GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

**MODELACIÓN DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS  
HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TIJUANA,  
MEDIANTE EL WEAP (WATER EVALUATION AND  
PLANNING SYSTEM)**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

P R E S E N T A:

**JAZMÍN HERNÁNDEZ GEN**

TUTOR:

**DR. HÉCTOR SANVICENTE SÁNCHEZ**

MÉXICO, D. F. MARZO 2014

---

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.C. Jorge Arturo Hidalgo Toledo

Secretario: M.I. Jose Alfredo Gonzalez Verdugo

Vocal: Dr. Héctor Sanvicente Sánchez

1er. Suplente: M.T.E Antonio Romero Castro

2do. Suplente: M.I. Edith Salcedo Sánchez

**Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)  
Paseo Cuauhnahuac No.8532 Col. Progreso, Jiutepec, Morelos:**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA – UNAM -**

**TUTOR DE TESIS:**

---

DR. HÉCTOR SANVICENTE SÁNCHEZ

## *Agradecimientos:*

A mi tutor de tesis, **Dr. Héctor Sanvincente Sánchez**, por todo el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por su apoyo y patrocinio para la realización de mis estudios de posgrado, así como para la elaboración de esta tesis.

Al **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)**, por él apoyó en la infraestructura proporcionada.

A todos aquellos que directamente o indirectamente contribuyeron en mi formación académica a lo largo de estos años, pero en especial a los catedráticos:

M.C Hidalgo Toledo Jorge Arturo  
M.I González Verdugo José Alfredo  
M.T.E Romero Castro Antonio  
M.I Salcedo Sánchez Edith  
M.I Gómez Martínez Juan Fco.

Así como a mis amigos y compañeros que me acompañaron en el logro de esta meta.

## *Dedicatoria:*

A mi familia y amigos quienes compartimos tiempo y experiencias.

## Índice General

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN .....	8
PRESENTACIÓN .....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
<b>CAPÍTULO 1 . ANTECEDENTES .....</b>	<b>13</b>
1.1 Gestión de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tijuana .....	13
1.2 Modelos hidrológicos en la gestión integrada de cuencas .....	18
1.3 Problemática.....	22
1.4 Justificación .....	22
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 Objetivo General .....	22
1.5.2 Objetivos particulares .....	23
1.6 Alcance .....	23
<b>CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1 Enfoques en torno a la gestión del agua.....	24
2.2 Modelos de Gestión Sustentable.....	26
2.3 La Gestión de recursos hídricos en México .....	27
2.4 La cuenca hidrológica como espacio físico para la gestión del agua .....	30
2.5 Modelos hidrológicos .....	32
2.5.1 Descripción de algunos Modelos Hidrológicos Distribuidos.....	34
2.5.2 Modelos integrados de gestión, planificación y evaluación de recursos hídricos .....	35
2.5.3 Conocimiento del Water Evaluation and Planning System (WEAP) .....	38
<b>CAPÍTULO 3 . CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>44</b>
3.1 Características físicas de la Cuenca del Río Tijuana .....	44
3.1.1 Localización Geográfica.....	44
3.1.2 Aspectos Ambientales.....	45
3.2 Infraestructura hidráulica .....	54
3.2.1 Presas y potabilizadoras.....	54
3.2.2 Acueductos .....	56
3.2.3 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) .....	58
3.3 Aspectos sociales y económicos .....	59
3.3.1 Población .....	59
3.3.2 Economía .....	60
<b>CAPÍTULO 4 . METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TIJUANA EN WEAP .....</b>	<b>62</b>
4.1 Preprocesamiento de datos previo a la construcción del modelo de la Cuenca del Río Tijuana .....	62
4.1.1 Delimitación de la cuenca y subcuencas del río Tijuana .....	62
4.1.2 Estimación del escurrimiento natural en la Cuenca del Río Tijuana.....	68
4.1.2.1 Área de la cuenca .....	70
4.1.2.2 Precipitación media .....	70
4.1.2.3 Coeficientes de Escurrimientos .....	78

4.1.3 Estimación de la variación mensual del consumo de agua en los diferentes usos de la cuenca .....	90
4.1.3.1 Determinación de la variación mensual de consumo de agua para el uso agrícola.....	94
4.1.4 Determinación de los flujos de cabecera de los ríos que conforman la CRT.....	106
4.2 Modelación de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP.....	119
4.2.1 Información Requerida para Construir el Modelo en WEAP .....	120
4.2.2 Modelación en WEAP de la Cuenca Río Tijuana.....	122
4.2.2.1 Elaboración del esquema en WEAP .....	122
4.2.2.2 Ríos o corrientes naturales .....	123
4.2.2.3 Derivaciones .....	124
4.2.2.4 Presas .....	125
4.2.2.5 Acuíferos.....	126
4.2.2.6 Sitios de Demanda .....	127
4.2.2.7 Conectores de transferencia de agua entre fuentes y sitios de demanda.....	131
4.2.2.8 Plantas de tratamiento de aguas residuales .....	132
4.2.2.9 Flujos de retorno .....	133
4.2.2.10 Estaciones hidrométricas.....	133
4.2.3 Entrada de datos a WEAP .....	134
4.2.3.1 Sitios de Demanda .....	134
4.2.3.2 Ríos o corrientes naturales .....	136
4.2.3.3 Derivaciones .....	137
4.2.3.4 Presas .....	140
4.2.3.5 Acuíferos.....	145
4.2.3.6 Conectores de transferencia.....	146
4.2.3.7 Plantas de tratamiento de aguas residuales .....	147
4.2.3.8 Flujos de retorno .....	148
<b>CAPÍTULO 5 . VALIDACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>150</b>
<b>CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES .....</b>	<b>161</b>
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162
SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	167

## Índice de Figuras

Figura 1. 1 Oferta actual de agua para la Cuenca del Río Tijuana.....	14
Figura 1. 2 Crecimiento de la población en Tijuana para el período 1900 a 1980.....	16
Figura 2. 1 Esquema de la cuenca del río Tijuana en WEAP.....	40
Figura 2. 2 Esquema de los datos en el modelo.....	41
Figura 2. 3 Representación de los datos en el modelo.....	41
Figura 2. 4 Vistas generales de escenarios de referencia.....	42
Figura 2. 5 Notas de supuestos.....	42
Figura 3. 1 Ubicación de la Cuenca del Río Tijuana .....	44
Figura 3. 2 Topografía.....	45
Figura 3. 3 Suelos.....	46
Figura 3. 4 Temperatura.....	47
Figura 3. 5 Precipitación.....	48
Figura 3. 6 Hidrografía.....	49
Figura 3. 7 Acuíferos que se encuentran dentro y cerca de la CRT del lado mexicano .....	50
Figura 3. 8 Vegetación de la Cuenca del Río Tijuana .....	52
Figura 3. 9 Usos del suelo.....	53
Figura 3. 10 Presas que se ubican en la cuenca del río Tijuana .....	54
Figura 3. 11 Derivaciones en la Cuenca del Río Tijuana .....	57
Figura 3.12 Recorrido de la línea de conducción del agua proveniente del río Colorado desde la presa Morelos (límite binacional) hasta la presa El Carrizo (Tijuana) por ARCT .....	58
Figura 3. 13 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.....	58
Figura 3. 14 Densidad poblacional en la Cuenca del Río Tijuana.....	60
Figura 4. 1 MDE de la Cuenca del Río Tijuana.....	63
Figura 4. 2 Quemado de las líneas de corriente .....	63
Figura 4. 3 Llenado de huecos .....	64
Figura 4. 4 Dirección de flujo .....	64
Figura 4. 5 Acumulación de flujo .....	65
Figura 4. 6 Definición de corriente .....	65
Figura 4. 7 Segmentación de corriente .....	66
Figura 4. 8 Delineación de rejilla de captación .....	66
Figura 4. 9 Procesamiento de polígono de captación .....	67
Figura 4. 10 Subcuencas que integran la cuenca del río Tijuana .....	67
Figura 4. 11 Ubicación de las estaciones climatológicas para el cálculo de mallas de precipitación .....	71
Figura 4. 12 Malla de precipitación en ArcGIS .....	73
Figura 4. 13 Método de Kriging en ArcGIS .....	74
Figura 4. 14 Gráfica de una función semivariograma mostrando los parámetros que la determinan .....	76
Figura 4. 15 Mallas de precipitación y subcuencas.....	77
Figura 4. 16 Zonal Statistics en ArcGIS .....	77
Figura 4. 17 Resultados al ejecutar el comando Zonal Statistics en ArcGIS.....	78
Figura 4. 18 Cartografía hidrológica .....	79
Figura 4. 19 Generación de la cobertura de unidades de escurrimiento para la cuenca del Río Tijuana .....	79
Figura 4. 20 Obtención de las precipitaciones promedio en cada unidad de escurrimiento de cada subcuenca .....	79
Figura 4. 21 Estaciones hidrométricas que se utilizaron en la cuenca del Río Tijuana.....	80
Figura 4.22 Localidades en que se dividió la Cuenca del Río Tijuana para cálculo de los coeficientes de escurrimientos.....	81

Figura 4. 23 Codificación general de un algoritmo de recocido simulado .....	84
Figura 4. 24 Vista del Programa de Recocido Simulado .....	86
Figura 4.25 Periodos con registro de escurrimientos para las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Tijuana .....	88
Figura 4. 26 Ubicación de las estaciones climatológicas para la obtención de temperaturas promedio.....	97
Figura 4. 27 Extracción de la temperatura promedio por subcuenca en ArcGIS .....	98
Figura 4. 28 Delimitación de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP.....	122
Figura 4. 29 Creación de los ríos principales de la CRT en WEAP .....	123
Figura 4. 30 Ríos y arroyos de la Cuenca del Río Tijuana.....	124
Figura 4. 31 Derivaciones en la cuenca del Río Tijuana.....	124
Figura 4. 32 Presas que se ubican en la Cuenca del Río Tijuana .....	125
Figura 4. 33 Acuíferos que se encuentran dentro y cerca de la Cuenca del Río Tijuana .....	126
Figura 4. 34 Usuarios ubicados por subcuencas .....	127
Figura 4. 35 Conectores de transferencia (Transmisión links) que van de fuentes de abastecimientos (ríos) a sitios de demanda en WEAP .....	132
Figura 4. 36 Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales.....	132
Figura 4. 37 Flujos de retorno establecidos en el esquema de WEAP.....	133
Figura 4. 38 Ubicación de las estaciones hidrométricas en WEAP .....	134
Figura 4. 39 Nombramiento de los sitios de demanda en WEAP .....	134
Figura 4. 40 Introducción de datos en los sitios de demanda en WEAP .....	135
Figura 4. 41 Introducción de datos en los ríos en WEAP.....	137
Figura 4. 42 Información que requiere WEAP para las presas .....	140
Figura 4. 43 Curva de volumen-elevación de la presa Abelardo L. Rodríguez en WEAP. ....	141
Figura 4. 44 Curva de la evaporación neta de la Presa Abelardo L. Rodríguez en WEAP .....	142
Figura 4. 45 Curva de volumen-elevación de la presa El Carrizo en WEAP .....	144
Figura 4. 46 Curva de la evaporación neta de la presa El Carrizo .....	144
Figura 4. 47 Recarga natural y almacenamiento inicial del acuífero de Las Palmas en WEAP .....	145
Figura 4. 48 Preferencia de la línea de conducción que va de la presa Abelardo L Rodríguez a El Florido en WEAP .....	146
Figura 4. 49 Volumen máximo de flujo de la línea de conducción que va de la presa Abelardo L Rodríguez a El Florido en WEAP .....	146
Figura 4. 50 Capacidad diaria de procesamiento de la planta de tratamiento Cereso El Hongo en WEAP. ....	147
Figura 4. 51 Retorno que va de la A.L. Rodríguez a la derivación Florido_Tijuana en WEAP .....	148
Figura 4. 52 Esquema de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP .....	149
Figura 5. 1 Validación de los escurrimientos por ríos aguas arriba de la presa Abelardo L. Rodríguez.....	151
Figura 5. 2 Validación de los escurrimientos por ríos en la zona 2 mediante la estación hidrométrica el Alamar	151
Figura 5. 3 Almacenamiento de la presa Abelardo L. Rodríguez para el periodo de 1995-1998.....	154
Figura 5. 4 Entregas de agua a la potabilizadora A.L. Rodríguez en el periodo de 1995-1998 .....	155
Figura 5. 5 Volúmenes de escurrimiento que reporta WEAP con los de la estación hidrométrica El Alamar .....	155
Figura 5. 6 Cobertura de la satisfacción de la demanda en WEAP .....	156
Figura 5. 7 Proyección de la oferta y demanda de la CRT .....	157

## Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Oferta actual de agua para la Cuenca del Río Tijuana .....	14
Tabla 2. 1 Clasificación de los modelos hidrológicos .....	33
Tabla 2. 2 Selección de modelos de GIRH .....	36
Tabla 3. 1 Acuíferos que se ubican dentro y cerca de la CRT .....	50
Tabla 3. 2 Potabilizadoras .....	56
Tabla 3. 3 Plantas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran dentro de la cuenca del río Tijuana .....	59
Tabla 4. 1 Áreas de las subcuencas que integran la cuenca del Río Tijuana .....	68
Tabla 4. 2 Estaciones climatológicas que se encuentran dentro y cerca de la cuenca del Río Tijuana .....	71
Tabla 4. 3 Áreas de las zonas en que está dividida la cuenca del río Tijuana .....	81
Tabla 4. 4 Áreas de las zonas y de los rangos de los coeficientes de escurrimiento .....	82
Tabla 4. 5 Manera en que fueron introducidos los datos al programa de Recocido Simulado .....	85
Tabla 4. 6 Escurrimientos anuales de cada uno de los ríos que conforman la cuenca del río Tijuana .....	89
Tabla 4. 7 Variación mensual de consumo de la ciudad de Tijuana .....	91
Tabla 4. 8 Volumen bombeado y entregado por el Acueducto Río Colorado-Tijuana .....	92
Tabla 4. 9 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la cd. Tecate .....	93
Tabla 4. 10 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la potabilizadora El Florido .....	93
Tabla 4. 11 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la potabilizadora A.L. Rodríguez .....	94
Tabla 4. 12 Porcentajes medios diarios de horas diurnas .....	96
Tabla 4. 13 Estaciones climatológicas que se encuentran dentro y cerca de la cuenca del río Tijuana .....	97
Tabla 4. 14 Temperaturas promedio en centígrados de cada una de las subcuencas .....	99
Tabla 4. 15 ETo para cada subcuenca en sus respectivos meses .....	99
Tabla 4. 16 Duración aproximada de las fases en el periodo vegetativo .....	100
Tabla 4. 17 Coeficientes de cultivo (Kc) .....	101
Tabla 4. 18 Fases del periodo vegetativo de la avena .....	101
Tabla 4. 19 Fases del periodo vegetativo de la cebada .....	101
Tabla 4. 20 Fases del periodo vegetativo del maíz de grano .....	101
Tabla 4. 21 Cálculo de las necesidades de agua durante el periodo vegetativo de la avena y cebada, para la subcuenca río Tijuana (subc_1) .....	102
Tabla 4. 22 Cálculo de las necesidades de agua durante el periodo vegetativo del maíz de grano, para la subcuenca de río Tijuana (subc_1) .....	102
Tabla 4. 23 Necesidades de agua durante el periodo vegetativo de la avena y cebada para todas las subcuencas .....	103
Tabla 4. 24 Porcentajes de requerimientos para el periodo vegetativo de la avena y cebada para todas las subcuencas .....	103
Tabla 4. 25 Necesidades de agua durante el periodo vegetativo del maíz de grano para todas las subcuencas ..	104
Tabla 4. 26 Porcentajes de requerimientos para el periodo vegetativo del maíz de grano para todas las subcuencas .....	104
Tabla 4. 27 Porcentajes de la variación mensual de agua para cada subcuenca de los diferentes cultivos .....	105
Tabla 4. 28 Volumen mensual de agua para cada subcuenca de los diferentes cultivos .....	105
Tabla 4. 29 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca río Alamar de la Zona 2 .....	106
Tabla 4. 30 Requerimientos de agua para el cultivo de la avena y cebada en la subcuenca del Río Alamar .....	106
Tabla 4. 31 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Alamar (zona 2) para el año de 1969 .....	107
Tabla 4. 32 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca río Alamar de la parte de la Zona 3 .....	107



Tabla 4. 33 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Alamar (zona 3) para el año de 1969 .....	108
Tabla 4. 34 Volúmenes anuales (m <sup>3</sup> ) de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Tecate.....	108
Tabla 4. 35 Requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada en la subcuenca Tecate .....	108
Tabla 4. 36 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Tecate para el año de 1969 .....	109
Tabla 4. 37 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca del río Seco.....	109
Tabla 4. 38 Requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada en la subcuenca río Seco.....	109
Tabla 4. 39 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Seco para el año de 1969 .....	110
Tabla 4. 40 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca La Ciénega .....	110
Tabla 4. 41 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca La Ciénega .....	110
Tabla 4. 42 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo la Ciénega para el año de 1969 .....	111
Tabla 4. 43 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Canoas.....	111
Tabla 4. 44 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca Las Canoas .....	111
Tabla 4. 45 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo Las Canoas para el año de 1969 .....	112
Tabla 4. 46 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Beltrán .....	112
Tabla 4. 47 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca El Beltrán .....	112
Tabla 4. 48 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Beltrán para el año de 1969 .....	113
Tabla 4. 49 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Calabazas .....	113
Tabla 4. 50 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca Las Calabazas .....	113
Tabla 4. 51 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo Las Calabazas para el año de 1969.....	114
Tabla 4. 52 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Palmas.....	114
Tabla 4. 53 Requerimientos de agua para el cultivo del maíz de grano en la subcuenca Las Palmas .....	114
Tabla 4. 54 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Las Palmas para el año de 1969 ..	115
Tabla 4. 55 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Florido en la zona 3 .....	115
Tabla 4. 56 Requerimientos de agua para los cultivos de la avena y cebada en la subcuenca El Florido en la zona 3 .....	115
Tabla 4. 57 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Florido en la zona 3 para el año de 1969 .....	116
Tabla 4. 58 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Florido en la zona 4 .....	116
Tabla 4. 59 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Florido en la zona 4 para el año de 1969 .....	117
Tabla 4. 60 Escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Tijuana para el año de 1969 .....	117
Tabla 4. 61 Flujos de cabecera de los rios que conforman la cuenca del río Tijuana .....	118
Tabla 4. 62 Presas que se ubican en la Cuenca del Río Tijuana .....	125
Tabla 4. 63 Acuíferos que se encuentran dentro de la cuenca del Río Tijuana .....	126
Tabla 4. 64 Clasificación de los usuarios por subcuencas y tipos de usos.....	128
Tabla 4. 65 Usuarios de la subcuenca El Beltrán y sus tipos de usos.....	131
Tabla 4. 66 Información de usuarios que se encuentran en la subcuenca del Río Alamar (Subc_2).....	135
Tabla 4. 67 Volúmenes mensuales que transporta la derivación del Acueducto ARCT (1985-2006) a la potabilizadora El Florido.....	138
Tabla 4. 68 Volúmenes mensuales que transporta la derivación Florido_Tijuana (1985-2006) que sale de la potabilizadora El Florido a la demanda de la Cd. Tijuana.....	139
Tabla 4. 69 Datos de la curva elevación-área-volumen de la presa Abelardo L. Rodríguez .....	141
Tabla 4. 70 Datos de la curva elevación-área-volumen de la presa El Carrizo .....	143
Tabla 4. 71 Información de acuíferos introducida en el WEAP .....	145
Tabla 4. 72 Caudal tratado de las PTAR que se encuentran en la cuenca del Río Tijuana .....	147

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

---

Tabla 5. 1 Validación de los escurrimientos de los ríos en WEAP con datos del funcionamiento de vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez .....	152
Tabla 5. 2 Validación de los escurrimientos por ríos en la zona 2 mediante la estación hidrométrica el Alamar .	153
Tabla 5. 3 Medidas que ayudan a cerrar la brecha hídrica en el municipio de Tecate.....	159
Tabla 5. 4 Medidas que ayudan a cerrar la brecha hídrica en el municipio de Tijuana.....	159

## RESUMEN

La región norte de nuestro país es un área crítica en cuanto a la disponibilidad de agua se trata, ya que debido a su vegetación y tipo de clima semiárido y seco que presenta, hacen que la región no pueda disponer del vital líquido de sus fuentes naturales, lo que origina que tengan que importar agua de otras cuencas. En el caso de la franja transfronteriza que hay entre México y Estados Unidos (EU) se tiene que aunar más el crecimiento poblacional y económico que se origina en dicha zona ya que da como resultado una mayor demanda del recurso hídrico.

El presente trabajo tiene como finalidad crear un modelo de gestión de recursos hídricos que ayude en la toma de decisiones en cuanto al manejo del agua en la Cuenca del Río Tijuana (CRT); la cual se ubica entre el límite internacional entre México y Estados Unidos en la región de Baja California y California, y se considera como una zona de gran dinamismo económico y poblacional debido a que en ella se encuentran las ciudades de Tijuana y Tecate del lado mexicano y San Diego del lado de Estados Unidos. La CRT actualmente presenta una limitada disponibilidad natural de agua, debido a que sus recursos hídricos subterráneos y superficiales se encuentran ya sin disponibilidad o son muy escasos, esto hace que se tenga que importar de otras cuencas el vital líquido, que en este caso es del río Colorado.

La modelación de los recursos hídricos de la CRT se realizó en la plataforma WEAP (Water Evaluation and Planning System) la cual es una herramienta computacional amigable que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos.

El modelo de la CRT en WEAP quedó representado como un sistema de recursos hídricos operado para satisfacer del lado mexicano las demandas de las ciudades de Tijuana y Tecate, principalmente, considerando las transferencias de agua que llegan a través del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) y los escurrimientos almacenados en la presa Abelardo L. Rodríguez. Del lado de los EU los escurrimientos son trasvasados de la presa Barrett a la presa Otay y empleados para satisfacer las demandas de la ciudad de San Diego. En el análisis de validación del modelo que se llevó a cabo, arrojó factores de correlación altos tanto para caudales de cauces principales, como para almacenamiento en embalses y para las entregas de agua a los usuarios analizados.

Este trabajo finalmente nos deja ver que la cuenca se encuentra en una situación difícil en cuanto a la oferta de agua se trata, ya que su única fuente segura con la que cuenta proviene del río Colorado mediante el ARCT, de tal manera que en un futuro inmediato esta fuente no va a ser suficiente para satisfacer todos los requerimientos de agua que la población demande, por ello tiene que evaluar otras fuentes alternativas que ayuden a proveer de agua a las demandas futuras sin dañar al medio ambiente, para poder lograr así un modelo de gestión sustentable.

**Abstract:**

The northern region of our country is a critical area in terms of the availability of water is, due to its vegetation and semi-arid and dry weather presenting, make the region may not have of the vital liquid from its natural sources, resulting in having to import water from other basins. In the case of the cross-border strip between Mexico and United States should combine more population and economic growth that originates in that area since it gives as a result a greater demand for the vital liquid.

The present work aims to create a model of water resource management that will help in the decision making regarding the management of water in the basin of the Tijuana River (CRT); It is located between the international boundary between Mexico and United States in the region of Baja California and California, and is considered as a dynamic economic and population area since there are the cities of Tijuana and Tecate on the Mexican side and San Diego on the side of the United States. The CRT now presents a limited natural water availability, since their surface and underground water resources are already available or are very scarce, this causes it to have to import from other basins the vital liquid, which in this case is the Colorado River.

The modeling of the water resources of the CRT was the WEAP (Water Evaluation and Planning System) platform which is a user-friendly computer tool that provides a holistic approach to water resources planning.

The CRT in quedo WEAP model represented as a water resources system operated for demands on the Mexican side of the cities of Tijuana and Tecate, mainly, whereas transfers of water coming through the Rio Colorado Tijuana aqueduct (ARCT) and stored in the prey Abelardo L runoffs. Rodriguez. The US side runoff are transferred to the Otay dam dam Barrett and employees to meet the demands of the city of San Diego. In the analysis of validation of the model that was carried out, he threw factors correlation high flows of main channels, for both storage in reservoirs and for deliveries of water analyzed users.

This work finally lets us see that the basin is in a difficult situation as to the supply of water is, since their only reliable source that has comes from the Colorado River via the ARCT, in such a way that in the immediate future this source will not be sufficient to meet all the requirements of water that the population demandsTherefore you need to evaluate other alternative sources that help to provide water to the future demands without damage to the environment, to be able to achieve a sustainable management model.

## **PRESENTACIÓN**

El presente trabajo se realizó con el propósito de gestionar el manejo de las aguas de la Cuenca del Río Tijuana.

En el Capítulo 1, se presentan los antecedentes de la Cuenca del Río Tijuana y de los modelos hidrológicos; así como la justificación, alcance y objetivos del presente trabajo.

En el Capítulo 2, se maneja el marco teórico, con temas referentes a enfoques en torno a la gestión del agua, modelos de gestión sustentable, gestión de recursos hídricos en México y modelos hidrológicos.

En el Capítulo 3, se describen las características fisiográficas de la Cuenca del Río Tijuana, así como su ubicación, infraestructura, aspectos ambientales y sociales.

En el Capítulo 4, se describe la metodología para la construcción del modelo de simulación de la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP, la cual se enfoca en dos partes, la primera en el procesamiento de datos necesarios previos antes de la elaboración del modelo como son: la delimitación de la cuenca y sus subcuencas, variación mensual del consumo de agua en los diferentes usos, cálculo de los escurrimientos naturales y flujos de cabecera; y la segunda en la construcción del modelo de la cuenca en la plataforma WEAP.

En el Capítulo 5, se presenta la validación y resultados del modelo generado de la Cuenca del Río Tijuana en el WEAP.

En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos del modelo de gestión de los recursos hídricos de la Cuenca Río Tijuana.

## INTRODUCCIÓN

La frontera norte de México se caracteriza por ser una región árida y semiárida sujeta a sequías recurrentes que menguan la disponibilidad del recurso en esta zona altamente poblada e industrializada, ocasionando conflictos sociales, económicos y ambientales. De esta forma la administración y manejo del agua en la región es esencial para lograr la sustentabilidad, lo que implica la identificación del potencial hidráulico de las cuencas, la evaluación de la infraestructura hidráulica y el empleo de técnicas de diagnóstico y planeación para lograr un desarrollo armónico del uso con respecto a la disponibilidad del recurso. Por ello es conveniente apoyarse de herramientas computacionales enfocadas en la gestión integral de los recursos hídricos.

Los sistemas de cómputo para la gestión integrada del agua permiten desarrollar modelos de simulación que brindan un soporte básico durante la planeación de los recursos hídricos al definir el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo y proporcionar datos para el análisis y el apoyo a la toma de decisiones para diferentes escenarios de manejo del agua (Loucks, 1995).

Los modelos de Gestión Integrada del Agua (IWRM, Integrated Water Resources Management), están divididos en dos grupos de sistemas, los que abordan factores bio-físicos y los que abordan factores relacionados al manejo socio-económico. Entre los factores bio-físicos se tienen la climatología, topografía, uso de suelo, hidrología de agua superficial, la hidrología del agua subterránea, suelos, calidad del agua, etc. Los sistemas que manejan factores socio-económicos se enfocan principalmente a demandas de agua, operación de infraestructura, asignación de agua, transferencias de agua Inter o intra cuencas, etc. (McCartney, 2007).

Algunos modelos hidrológicos de gestión hídrica que se basan en el manejo de los factores biofísicos son el SWAT (Soil Water Assessment Tool), el RIBASIM y el MIKE-SHE, mientras que entre los que dan preferencia a factores socio-económicos están el RiverWare y el HecRecSim. El WaterWare es un IWRM sofisticado que proporciona la integración de ambos tipos de factores sin embargo su aplicación e implementación requiere de un elevado nivel de conocimiento por parte del usuario y una poderosa infraestructura computacional (McCartney, 2007).

Finalmente el modelo hidrológico Water Evaluation and Planning System (WEAP) integra ambos tipos de factores pero con una interfase amigable que facilita su aplicación e implementación y lo hace accesible a la toda la comunidad del recurso agua (SEI,2009).

Así que para llevar a cabo el modelo de la gestión de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tijuana (CRT), se elaboró mediante el Water Evaluation and Planning System (WEAP). Desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI por sus siglas en inglés), el cual es una herramienta práctica para la planificación de los recursos hídricos, se distingue por su enfoque integrador para

simular sistemas de abastecimiento de agua. Los modelos WEAP permiten especificar escenarios de cantidad, calidad, demandas (escenarios de manejo de agua) y simular el comportamiento del sistema de manejo de cuenca a lo largo del tiempo (Yates et al, 2005a y 2005b).

## **CAPÍTULO 1 . ANTECEDENTES**

### **1.1 Gestión de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tijuana**

La Cuenca del Río Tijuana (CRT), que se extiende a ambos lados del límite internacional entre México y Estados Unidos, en la región de Baja California y California, es un sistema natural complejo caracterizado por diversos microclimas y sistemas humanos con dinámicas contrastantes (SDSU, 2005). La CRT incluye la mayor parte de las ciudades mexicanas de Tecate y Tijuana, y la ciudad de San Diego por el lado estadounidense. El crecimiento de la actividad humana presenta varios patrones de desarrollo: uno intensivo en la cuenca baja de ambos países y en la parte media alrededor de Tecate y Valle de Las Palmas, así como en las partes altas que corresponden a zonas rurales. No sólo el acelerado crecimiento demográfico y la urbanización hacen difícil la gestión de la cuenca, sino también la coordinación entre las administraciones de México y de Estados Unidos (Ganster, 2010).

La problemática de la gestión del agua en la CRT del lado mexicano, se enfoca en dos características. La primera es que se ubica una de las ciudades con el mayor dinamismo en el crecimiento poblacional y económico del estado de Baja California, que es Tijuana (INEGI, 2006 y Conapo, 2008), situación que le confiere distintivos particulares en la distribución de la población, en el incremento en el uso de agua potable y en la generación de aguas residuales. La segunda característica es que la CRT carece de recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, que condiciona a las ciudades de Tecate y Tijuana a la dependencia casi total del abasto del río Colorado (Marcus, 2000 y Bernal, 2005).

En lo que compete a la disponibilidad de recursos hídricos, un aspecto fundamental son las condicionantes naturales de la CRT. La cual presenta características topográficas y climatológicas que influyen en la disponibilidad natural de los recursos hídricos, limitándola a ser una región de bajo potencial hidrológico. Su clima es templado seco, hasta el punto de aridez, con bajas precipitaciones (Wright y Vela, 2005), contando con un escurrimiento natural de apenas 77.78 hm<sup>3</sup> y una disponibilidad de 7.2 hm<sup>3</sup> (DOF, 2007).

Al carecer de fuentes propias de agua, tanto superficiales como subterráneas, la CRT ha dependido de la cuota de agua que obtiene del río Colorado para abastecer las necesidades de agua potable de la cuenca. En el Tratado de 1944 se estipula que Estados Unidos, se compromete a entregar a México un volumen anual de 1,850 hm<sup>3</sup> de agua (Marcus, 2000; Muñoz, 2000 y Bernal, 2005); los cuales son distribuidos en México por parte de la Comisión Nacional de Aguas a los diferentes usuarios.

En la CRT se ubican 1,642,065 habitantes que representan el 53% de la población del estado de Baja California (conapo, 2008) y su abasto de agua depende en un 86.1% del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) y en un 13.9% de acuíferos regionales cuya mayor parte se encuentra en déficit (figura 1.1), por lo cual no es posible esperar un mayor suministro de agua procedente de esa fuente (CEA, 2008). Más bien resulta lógico esperar una reducción.



Figura 1. 1 Oferta actual de agua para la Cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaboración propia con base en información de CESPT (2006), CEA (2008a) y DOF (2002).

La tabla 1.1 se muestra como esta conformada la oferta en la Cuenca del Río Tijuana.

Tabla 1. 1 Oferta actual de agua para la Cuenca del Río Tijuana

Oferta de Agua para la Cuenca del Río Tijuana ( CRT)	
Oferta	Volumen l/s
<b>ARCT:</b>	
Acueducto ARCT	4,000
Ampliación ARCT	1,300
<b>Total ARCT</b>	<b>5,300</b>
<b>Subterránea:</b>	
Tijuana	300
Tecate	305
Las Palmas	251
<b>Total subterránea</b>	<b>856</b>
<b>Total</b>	<b>6,156</b>

Fuente: Elaboración propia con base en información de CESPT (2006), CEA (2008a) y DOF (2002).

Esta situación nos lleva a concluir que la única fuente de abasto confiable de agua para la CRT en general y en especial para las ciudades de Tecate y Tijuana, es la que proviene por el ARCT procedente del Río Colorado, que a su vez también provee a la ciudad de Rosarito.

Como se viene comentando anteriormente el principal proveedor de agua en la cuenca es el ARCT, el cual empezó a funcionar en 1982, y se puede considerarse como el parteaguas de la gestión de los recursos hídricos en la CRT, pero principalmente en la ciudad de Tijuana. Su etapa previa se caracterizó, por un crecimiento exponencial de la población, que en contraste con un largo período de

sequía presionó hacia la búsqueda de nuevas fuentes de agua y formas de abastecimiento. En consecuencia, el período posterior es identificado por su dependencia casi total al río Colorado, así como por el deterioro de las fuentes propias de abasto, como resultado de años de sobreexplotación. Este panorama, además de exponer la constante brecha entre la oferta y la demanda del servicio de agua en la cuenca, también hace evidente el aumento en la presión y deterioro de los recursos hídricos.

### **Evolución del abasto de agua en la Cuenca del Río Tijuana**

El suministro de agua en la CRT, a través del Acueducto Río Colorado-Tijuana fue considerado como la alternativa que solucionaría los problemas en torno al desabasto de agua en la cuenca, no sólo para cumplir con los requerimientos presentes sino para satisfacer un período futuro amplio de las demandas. Para entender el optimismo creado alrededor de esta obra, es necesario recurrir a la historia del abasto del agua en la cuenca y luego remontarnos a los años siguientes del inicio de su operación.

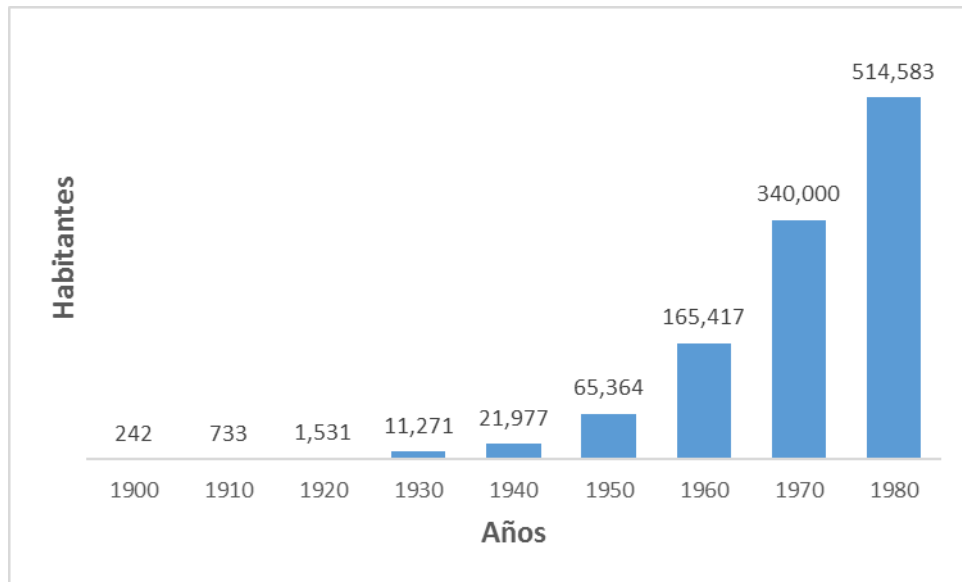
Se podría pensar que el punto de partida crítico de la gestión de los recursos hídricos en la CRT se dio a comienzos del siglo XX. En el período de 1900 a 1927, principalmente en la ciudad de Tijuana, donde la población pasó de 242 habitantes a 8,349, es decir un crecimiento superior de 34 veces el tamaño inicial, rebasando la capacidad de los pozos que servían como únicas fuentes de abasto. Esta problemática condujo al entonces gobernador del estado, general Abelardo L. Rodríguez, a buscar nuevas fuentes de agua, elaborándose para 1927, los primeros estudios hidrológicos de la Cuenca del Río Tijuana y de los arroyos Alamar y Tecate, los cuales determinaron como alternativa viable la construcción de una presa, que inició sus operaciones en 1937 (CESPT, 2006). Con una capacidad de 138 hm<sup>3</sup>, se esperaba que tuviera una cobertura para el sector agrícola de 219 parcelas, equivalentes a 1,200 hectáreas de riego y un abastecimiento para la zona urbana de 27 mil habitantes. Sin embargo, trascurrido sólo un año, la presa inició un descenso crítico en su capacidad, pasando de 116.8 hm<sup>3</sup> en 1938 a 44 hm<sup>3</sup> en 1954, reducción que debido a un largo período de sequía se mantuvo hasta 1978, fecha en la cual un evento de lluvia aumentó la capacidad de abastecimiento de la presa.

En el caso de la ciudad de Tecate en 1943 con una población de alrededor de 3,000 habitantes, se abastecía principalmente a base de norias, las cuales cubrían las necesidades de agua potable de la localidad; en este año se funda la Compañía Cervecera de Tecate de S. de R. L., lo cual originó una oferta laboral, provocando asentamientos en las zonas aledañas a dicho establecimiento, de esta manera, se crea una necesidad de agua potable que en parte era solventada por la Cervecería. Posteriormente se crea la compañía de refresco Lime-Cola (CESPTE, 2008).

El período de 1950 a 1980 es identificado como un momento crítico de escasez del agua en la ciudad de Tijuana, que paralelamente se contrasta con el incremento igualmente crítico de la demanda. Los esfuerzos federales en poblar el extremo de la península, aunado a la migración generada bajo el marco del convenio braceros, firmado entre México y Estados Unidos, así como el impulso al

crecimiento industrial<sup>1</sup>, fueron acciones que actuaron como catalizadores en el aumento acelerado de la población (figura 1.2).

Figura 1. 2 Crecimiento de la población en Tijuana para el período 1900 a 1980



Fuente: CESPT (2006).

En la gráfica se observa el crecimiento acelerado de la población tijuanaense. En 1950 el número de habitantes creció 270 veces en comparación con la población existente para el año 1900. En 1980 la población habría aumentado 8 veces con respecto a la población de 1950 o más de 2 mil veces con respecto a 1900.

En 1972 se realizaron dos acciones importantes para el suministro de agua, la primera consistió en el acuerdo con Estados Unidos para recibir aguas de la presa de Otay y la segunda fue la firma del Acta de la CILA No. 240 para la entrega de agua del río Colorado en caso de emergencias<sup>2</sup>. En ese mismo año en Tecate se perforaron algunos pozos en la zona de San José para abastecer de agua a la ciudad. En 1974 considerando la escasez de agua de la región, se construye el acueducto Valle Las Palmas-Cuchumá, el cual operó durante un año debido a problemas técnicos, así que posteriormente se adaptó parte de esta para la construcción de las instalaciones Carrizo-Cuchumá, la cual conducirá agua de la presa El Carrizo a la planta Potabilizadora Cuchumá (CESPTE,2008).

<sup>1</sup> En la década de 1960 la puesta en marcha del Programa Industrial Fronterizo, representó junto con las políticas de desarrollo locales para la siguiente década, lo que Castro (2006) considera como la última fase impactante del crecimiento urbano de la ciudad, siendo característicos de este proceso, desde su punto de vista, la creación de la Ciudad Industrial Nueva Tijuana (CINT) en Otay y la canalización y urbanización del río Tijuana.

<sup>2</sup> Esta conexión se mantuvo con Estados Unidos hasta 1980, fecha en la cual suspendió el abasto del agua, viéndose nuevamente obligada la ciudad de Tijuana a buscar otras fuentes de agua. Sin embargo, actualmente aún es utilizada aunque de forma irregular para algunos períodos del año.

Continuando con el desarrollo de la infraestructura hídrica, para finales de la década de los setenta y principios de los ochenta se construyeron las plantas potabilizadoras de la cuenca. En 1975 se inició la operación de la planta Abelardo L. Rodríguez que tiene una capacidad de tratamiento de 650 l/s y en ese mismo año en Tecate se inician los trabajos para la construcción de la Planta Potabilizadora Cuchumá, con capacidad de 100 l/s. En 1978 se termina de construir la presa El Carrizo, con capacidad de almacenamiento de 40 hm<sup>3</sup>, que dará abastecimiento a las ciudades de Tecate y Tijuana. Posteriormente, en 1982, la planta potabilizadora El Florido comenzó a operar con una capacidad de 2,000 l/s, ampliándose al doble en poco más de una década, para el tratamiento de las aguas provenientes del río Colorado y en algunas oportunidades las aguas de la presa Abelardo L. Rodríguez (CESPTE,2008).

En suma, la construcción del Acueducto Río Colorado-Tijuana ante la ineficiencia de las acciones realizadas hasta el momento, se presentó como la solución que reduciría la brecha existente entre la oferta y la demanda. Transcurridos siete años de construcción, en 1982 inicia operaciones, con una capacidad de 150 l/s. Sin embargo, debido a la reducción de las fuentes de agua subterránea, los escasos eventos de lluvias y la creciente demanda del recurso, contribuyeron a que su capacidad fuera rápidamente rebasada (CESPT, 2006).

Así en 1984, con una población estimada de 684,814 habitantes que demandaban 1,982 l/s, se tenía un déficit de 382 l/s, que aumentó para 1985 a 483 (CESPT, 2006). Esto generó que a cinco años de su apertura, para 1987, fuera necesario ampliar la capacidad del acueducto a 2,660 l/s, aumentándose nuevamente para el año 1993 a 4,000 l/s. Como se puede observar, en sólo una década la capacidad del acueducto fue ampliada en una escala de 27 veces para poder satisfacer las demandas de la población.

En 1992 en Tecate se construye el acueducto las Auras, con capacidad de 350 l/s, el cual consiste en una derivación del ARCT a la Potabilizadora la Nopalera, la cual también inicio su construcción en ese mismo año, con una capacidad de 175 l/s (CESPTE,2008).

Para 1998 nuevamente se analizaron alternativas en busca de la ampliación de la oferta de agua. En 1999 se determinó por parte de la Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEA), aumentar la capacidad del ARCT, a un gasto de operación de 5,300 l/s (incremento que garantizará el suministro de agua de los municipios de Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito) (CESPT, 2006).

Como se muestra es importante gestionar el recurso hídrico en la CRT sino de lo contrario en pocos años debido al crecimiento poblacional y económico que presenta la cuenca, no va ser posible abastecerla del vital líquido, por ello es necesario utilizar herramientas que nos sirvan para la planificación y evaluación del recurso en el transcurso del tiempo, por tal motivo este trabajo tiene como objetivo elaborar un modelo de la CRT en la plataforma WEAP que ayude a dicho fin.

## 1.2 Modelos hidrológicos en la gestión integrada de cuencas

La Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) que se define en la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2004) busca que el Estado en coordinación con los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad a nivel de cuenca hidrológica, implementen las políticas necesarias para el control, aprovechamiento, distribución y preservación del recurso hídrico tanto en calidad como en cantidad considerando las estrategias necesarias para atenuar los impactos y propiciar el desarrollo sustentable de la cuenca (Valencia, 2004).

La modelación hidrológica constituye un elemento clave en esta gestión. La correcta representación de los fenómenos hidrológicos que ocurren dentro de la cuenca permite establecer los cimientos para la evaluación de las estrategias de manejo de recursos. Es importante conocer los conceptos básicos de la modelación hidrológica y los desarrollos tecnológicos que existen de manera que se pueda seleccionar la herramienta más adecuada (Yeomans, 2004).

Un modelo hidrológico es la representación de los diferentes procesos involucrados en la generación y distribución de la lluvia sobre una cuenca definida. Un modelo busca predecir la respuesta de la cuenca (escurrimientos) ante un determinado estímulo (precipitación). Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la cuenca a diferentes condiciones hidrometeorológicas (Yeomans, 2004).

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados de la década de los 60's, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar los mecanismos individuales involucrados en el ciclo hidrológico. Así encontramos el Método Racional (1850), la teoría de infiltración de Horton (1933), los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapotranspiración (1948), la teoría de la onda cinemática de Lighthill y Whitham (1955) y la del hidrograma unitario instantáneo de Nash (1957).

En la década de los 60's con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Standford Watershed Model-SWM (actualmente HSPF) de Crawford y Linsley (1966). A partir de entonces, con el uso de las computadoras se hizo posible el desarrollo de los modelos utilizando métodos numéricos para la solución de las ecuaciones o bien, para la simulación estadística de los procesos. Durante los 70's y 80's, el desarrollo se orientó hacia otras áreas del conocimiento como el medio ambiente y la gestión de los ecosistemas (Singh y Woolhiser, 2004).

Los desarrollos más recientes en la modelación hidrológica se han dado en las siguientes áreas (Yeomans, 2004): 1. Adquisición de datos. Uso de sensores remotos, imágenes satelitales y de radar para la medición de la precipitación; desarrollo de Modelos de Elevación Digital (DEM) para la

representación en 3D de la topografía y uso de trazadores químicos, isótopos estables y la composición química del agua para hacer la separación del flujo base. 2. Sistemas de información geográfica para el procesamiento y administración de la información. 3. Calibración de los modelos. Desarrollo de técnicas para manejo del error presente en los datos, algoritmos para una estimación confiable de los parámetros del modelo y representación de su incertidumbre. 4. Redes neuronales artificiales (ANN's) y algoritmos genéticos. Aplicación de ANNs en sistemas no lineales donde se vuelve inconveniente la estimación tradicional de los parámetros (ASCE, 2000). 5. Modelos hidrológicos globales. Integración de modelos hidrológicos, atmosféricos y climáticos para evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. 6. Integración de modelos hidrológicos con modelos de calidad del agua. 7. Interacción entre aguas subterráneas y aguas superficiales.

La modelación hidrológica constituye una herramienta necesaria en la gestión integrada de los recursos hídricos de una región. Permite hacer una evaluación cuantitativa del efecto de las políticas administrativas sobre los diferentes usuarios (agrícolas, industriales, ecológicos, etc.) de tal manera que se pueda llegar a la definición de políticas que realmente busquen el desarrollo sustentable de la zona. La selección del modelo a utilizar depende fuertemente de la información disponible y del uso que se le pretenda dar (Yeomans, 2004).

Para fines de este trabajo se decidió trabajar la modelación de la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP.

WEAP es una herramienta de software que aplica un enfoque integrado a la planificación de recursos hídricos. Se ha modificado en diversas ocasiones durante su historia de 20 años, ya que fue creado en 1988, por el Stockholm Environment Institute (SEI)<sup>3</sup>.

WEAP intenta cubrir la distancia entre la gestión de agua y la hidrología de cuencas, así como los requisitos según los cuales un modelo integrado de recursos hídricos eficaz debería ser útil, fácil de utilizar, asequible y disponible directamente para el sector de los recursos hídricos en general. WEAP integra una serie de procesos hidrológicos físicos con la gestión de la demanda y la infraestructura instalada de un modo coherente. Permite analizar diversos escenarios, incluyendo escenarios de climas alternativos y factores de estrés antropogénicos, como las variaciones en el uso de la tierra, los cambios en las demandas municipales e industriales, las normas operativas alternativas y los cambios en los puntos de desvío. El punto fuerte del WEAP consiste en tratar las cuestiones y problemas asociados a la asignación de recursos y planificación del agua; cabe destacar que no ha sido diseñado como un modelo de operaciones hídricas detallado que pueda utilizarse, por ejemplo, para optimizar la hidroelectricidad en función de las previsiones hidrológicas (UNFCC, 2012).

El sistema de gestión del sistema de apoyo a las decisiones (DSS) del WEAP se define como un conjunto de preferencias de suministro y prioridades de demanda definido por los usuarios para que cada

---

<sup>3</sup> <http://www.weap21.org/>

centro de demanda desarrolle una rutina de optimización para la asignación de los suministros disponibles (Yates et al., 2005a, 2005b). El usuario define las demandas, que suelen incluir la demanda municipal e industrial, así como los requisitos de flujo medioambientales y de las partes irrigadas de las divisiones de las cuencas. El análisis de la demanda WEAP que no está cubierto por la demanda de irrigación basada en la evapotranspiración sigue un enfoque desagregado basado en el uso final para determinar las necesidades de agua en cada modo de demanda. Se utiliza información económica, demográfica y sobre el uso del agua para desarrollar escenarios alternativos que examinen cómo evoluciona el consumo total y desagregado del agua a lo largo del tiempo. Estos escenarios de demanda se calculan en WEAP y se aplican de forma determinista a un algoritmo de asignación pasado en un programa lineal. El análisis de la demanda constituye el punto de partida para realizar un análisis de la planificación integrada del agua porque todos los cálculos de recursos y abastecimiento en WEAP se rigen por la rutina de optimización que determina el suministro final a cada nodo de demanda en función de las prioridades especificadas por el usuario (UNFCC, 2012).

La primera aplicación importante de WEAP fue en la región del Mar de Aral en 1989 con el auspicio del recién formado Stockholm Environment Institute (SEI). SEI continuó apoyando el desarrollo de WEAP a través de su Centro en los Estados Unidos (SEI-US), el cual se estableció en 1989 y fue organizado por el Tellus Institute hasta 2006. A través de los años WEAP se aplicó en muchos países y sistemas fluviales. El software ha sido transferido a planificadores de recursos hídricos alrededor del mundo, ejemplos de esto es:

En 1999, en India y Nepal se utilizó WEAP para evaluar el suministro de agua y las opciones de conservación del agua en sus regiones.

En 2001-2005 en Beijing China, se utilizó en el programa eco-región Hebei: El proyecto está diseñado para proporcionar la base en la cooperación relativas al agua, involucrando actores de los 14 condados de la provincia de Hebei que se encuentran aguas arriba y los 6 condados en Beijing ubicados en aguas abajo.

En 2002-2003 en Asia Central, WEAP se utilizó para desarrollar y evaluar las estrategias de adaptación en la cuenca de Syr Darya (Kazajstán, Tayikistán y Uzbekistán) para mitigar los impactos negativos del cambio climático y variabilidad. Además se manejó para evaluar varias estrategias de adaptación, incluyendo aumento de la producción de grano, abandono de cultivos altamente dependientes de la irrigación y desarrollar tecnologías de conservación de agua.

En 2002-2003 en el sur de África, WEAP se utilizó para construir un modelo que permite la simulación y análisis de diversos escenarios de asignación de agua y, sobretodo, escenarios de comportamiento de los usuarios.

En América latina se han desarrollado los siguientes proyectos en WEAP:

En 1993-1994 en México se aplicó en la cuenca del río San Juan. El estudio incluyó el desarrollo de un equilibrio de oferta y la demanda para la cuenca y la identificación de estrategias de desarrollo alternativo del agua y sus implicaciones ambientales.

En 2007-2009 en México se desarrolló los modelos de la cuenca del Río Bravo/Grande y Río Colorado, para la gestión de sus recursos hídricos.

En 2007 en Guatemala se utilizó en las cuencas de San José y El Naranjo, para estimar la vulnerabilidad de cambio climático.

En 2008-2009 en Perú se utilizó para la gestión de adaptación a la pérdida de glaciares en los Andes del Perú.

En 2008-2009 en Chile se utilizó en la cuenca del Limarí, para estimar los impactos del cambio climático.

En el 2009 en Ecuador se utilizó en la cuenca del Paute, para la evaluación del impacto del cambio climático.



### **1.3 Problemática**

La Cuenca del Río Tijuana se ubica en una región con estrés hídrico, debido a que presenta una limitada disponibilidad de agua por parte de sus fuentes naturales; y esto es debido a que su clima es templado seco, hasta el punto de aridez, con bajas precipitaciones. Las precipitaciones que se presentan en la cuenca van desde apenas 200 mm en las zonas costeras hasta 1,000mm en las zonas montañosas (Wright y Vela, 2005). Las presas de la cuenca de ambos países capturan parte de los escurrimientos, los cuales son intermitentes y con un caudal muy bajo; los acuíferos también almacenan agua para el suministro de usuarios locales, pero desafortunadamente las recargas no son suficientes y estos se encuentran en déficit, por lo tanto aproximadamente el 86% del agua que consumen los usuarios dentro de la cuenca es importada, provienen principalmente del río Colorado en el caso de Tecate y Tijuana mediante el Acueducto Río Colorado-Tijuana. Otro de los factores que contribuyen a la escasez de agua, es el crecimiento de la población e industria, principalmente en la ciudad de Tijuana, lo que trae consigo un desequilibrio entre la oferta y demanda del vital líquido y esto conlleva a la necesidad de importar el agua de otras cuencas, de desalinizar agua de mar y de realizar acciones de conservación y reutilización del recurso hídrico en la propia cuenca. Por ello es necesario lograr un mejor manejo sustentable de los recursos hídricos de la cuenca (Ganster, 2010).

### **1.4 Justificación**

La administración y manejo del agua en la región de la frontera norte de nuestro país es esencial para lograr la sustentabilidad del vital líquido, lo que implica la identificación del potencial hidráulico de la zona, por ello es necesario crear un modelo de gestión de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tijuana el cual facilite la toma de decisiones en la distribución de dichos recursos para satisfacer a corto, mediano y largo plazo, las necesidades humanas y de los ecosistemas.

Para lograr lo anterior, se llevara a cabo mediante el WEAP (Water Evaluation and Planning System) que es una herramienta computacional que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos.

### **1.5 Objetivos**

#### **1.5.1 Objetivo General**

Desarrollar un modelo de gestión de los recursos hídricos para la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP, para el apoyo en la toma de decisiones.

### **1.5.2 Objetivos particulares**

- Delimitar la cuenca y subcuencas del río Tijuana.
- Estimar los escurrimientos naturales.
- Simular el comportamiento del sistema actual en la plataforma WEAP.

### **1.6 Alcance**

El modelo que se desarrollará para la gestión de los recursos hídricos para la Cuenca del Río Tijuana en WEAP, solo llegará a la fase de validación, para lo cual se considerarán las estaciones hidrométricas y presas que se ubican en la cuenca; para tener así un modelo listo, en el que se puedan llevar a cabo escenarios que ayuden al mejor manejo del recurso hídrico.

## CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO

### 2.1 Enfoques en torno a la gestión del agua

La gestión hídrica puede ser encarada desde varias perspectivas, las cuales, para fines analíticos, se pueden englobar en dos enfoques: *enfoque administrativo (extractivo)* y el *enfoque integral*, entendiendo como enfoque administrativo el que contempla las cuestiones políticas, institucionales, financieras, estructurales y técnico-operativas, y como enfoque integral el que plantea una perspectiva integradora y multidimensional en la que se interrelacionan los aspectos sociales, económicos y ambientales implicados en el manejo de los recursos hídricos, además de su relación sistémica con el bienestar social y ambiental presente y futuro.

La problemática de los recursos hídricos cobra especial importancia en el orden mundial desde el siglo XIX. El acelerado crecimiento poblacional de esta época contrastó con las deficiencias en las infraestructuras de abasto que expusieron al recurso agua a fuertes presiones y alteraciones para cumplir con los requerimientos de las crecientes demandas. Dentro de esta perspectiva tuvieron auge, a mediados del siglo XX, los enfoques administrativos abanderados por organismos pertenecientes a la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que plantearon el aumento de las coberturas como respuesta al contexto de escasez y la falta de acceso a los servicios de agua.

Dentro de estos organismos hay que destacar la acción de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (Unicef, por sus siglas en inglés), y la Organización Mundial de la Salud (OMS), las que marcan las pautas de los programas y políticas de gestión de los recursos hídricos, que finalmente se materializan como políticas públicas en diferentes países del mundo. De allí, la importancia de la perspectiva a través de la cual este tipo de organismos internacionales enfocan el estudio del tema, ya que explica en gran medida el porqué de las acciones aplicadas para la gestión del agua en el nivel internacional.

Asimismo, es importante señalar la influencia que organismos como el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional han tenido en la administración del recurso hídrico. Estos organismos han planteado abiertamente la privatización de los servicios de agua y el aumento de las tarifas como mecanismo condicionantes a cumplir por parte de los países beneficiados con los préstamos económicos. A pesar de que su justificación tiene connotaciones ambientales, como el ahorro del agua y económicas como la reinversión por la recuperación de costos, a nivel mundial, han sido fuertemente criticadas por sus efectos negativos en la preservación del recurso y la inequidad social en el acceso al servicio.

La “crisis del agua” ha sido el lema sobre el cual estos organismos han pretendido fundamentar, durante varios años, los problemas relativos al recurso hídrico a nivel mundial. Esta visión de la

problemática motivó a que su solución estuviera enfocada en la gestión extractiva y tecnocéntrica<sup>4</sup>. Según este enfoque, el problema está centralizado en la escasez del agua y la solución en la construcción de un gran número de infraestructuras. De esta forma, se accede a mayores volúmenes de agua para aumentar la cobertura de las crecientes demandas de los servicios de agua potable. Sin embargo, a pesar de lograr incrementos importantes en los indicadores de acceso y abastecimiento a los servicios públicos de agua, contrario a lo esperado, este enfoque no ha conseguido reducir los índices mundiales de marginación social con relación al agua.

La deficiente mitigación de los problemas sociales causados por la falta de acceso al agua y el incremento en el deterioro de los recursos hídricos, motivó a replantear la base en la que se fundamentaba el problema, ya que por lo visto estaba más allá de la escasez de las fuentes de agua.

El viraje en el entendimiento de la problemática del agua por parte de los organismos públicos del orden internacional podría decirse que comenzó recientemente, con el posicionamiento del tema en una perspectiva más compleja por parte de la UNESCO en el 2003. En ella se reconoció que el compromiso humano en torno al desarrollo sustentable y el rol del hombre en el ciclo hidrológico, exigían ver la crisis del agua desde una posición diferente a la escasez, trascendiendo el enfoque prioritariamente basado en la satisfacción de las demandas para ser considerado un problema de gestión de los recursos hídricos. Esta gestión requiere considerar además del uso racional del recurso, su protección y los valores sociales, culturales, ambientales y generacionales asociados al mismo.

Por su parte la ONU, en el 2007, presentó en su informe “El agua, una responsabilidad compartida”, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) como un enfoque inclusivo y sistémico del recurso, para dar solución al enfoque sectorizado y poco integral sobre el que hasta el momento se realizaba el manejo del agua. Asimismo, plantea la gestión de la demanda dentro de un enfoque sustentable para la atención del suministro de agua, en el que el usuario es ahora parte de la solución de la problemática. De esta forma, se motiva a los países a cambiar el paradigma de la oferta del agua por una visión que considere el manejo de su demanda, como medida tendiente a la sustentabilidad.

Los enfoques de gestión de orden administrativo propuestos por estos organismos merecen dos críticas centrales relativas a su tendencia hacia la sustentabilidad en el manejo del agua. La primera está orientada a advertir que, a pesar de plantear una gestión integral y corresponsable del agua para su justa distribución y uso eficiente, continúan siendo inconsistentes con la gestión sustentable del agua. Su direccionamiento institucional está orientado al logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM); que en el caso del agua se enfocan hacia la reducción, para el 2015, de la proporción de personas sin acceso a fuentes de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Meta que se logra a través del cumplimiento de indicadores relacionados específicamente con el aumento de las

---

<sup>4</sup> Entendemos como gestión tecnocéntrica en el manejo de los recursos hídricos aquella que centra la solución de las problemáticas del agua en la construcción de infraestructuras hidráulicas y el desarrollo tecnológico para el aumento de la oferta de los servicios de agua.

infraestructuras hidráulicas, lo que demuestra que se continúa atado a los modelos de gestión tradicional.

La segunda crítica se refiere a la forma en la cual se han planteado soluciones genéricas a los problemas del agua. Las alternativas de solución son presentadas como „recetas“ a aplicar indistintamente a las condiciones de los recursos naturales y capacidades institucionales de cada región. Generalizar las causas de los problemas, es una práctica que debe ser evitada, buscando en su lugar hacer análisis y propuestas acordes a cada contexto.

Bajo el llamado enfoque integral se sostiene que para hacer gestión del agua se requiere saber manejar la oferta de este recurso de manera sostenible en el tiempo, a fin de entender los requerimientos en términos de cantidad, calidad y distribución espacial, y considerar todos los elementos de índole natural y social que están presentes en el proceso (OPS/OMS, 2001); es decir, es necesario conocer la disponibilidad y uso de los recursos hídricos. Sin embargo, aquí tampoco se dice cómo hacer esto en el ámbito práctico, en el mundo donde se toman las decisiones. Por otro lado, es previsible que la problemática del agua o la llamada crisis del agua adquiera un lugar mucho más prioritario en la agenda pública como consecuencia de las demandas sociales y que se requiera buscar soluciones más creativas a los problemas que se generan (Rodríguez, et al. 2003).

En síntesis, es evidente que los enfoques sobre los cuales se ha estudiado la problemática del agua están orientados, principalmente, hacia dos modelos de gestión. Un primer modelo que se denominará de gestión tradicional caracterizado por un enfoque de explotación de los recursos hídricos para la satisfacción de las crecientes demandas, a través del desarrollo de vastas infraestructuras hidráulicas. El segundo modelo identificado es de gestión sustentable, el cual busca integrar aspectos sociales, ambientales, administrativos y económicos en el manejo del agua. De forma similar es preciso reconocer que la mayor parte de los estudios concluyen señalando la necesidad de abordar enfoques sistémicos para el estudio complejo de la problemática.

## **2.2 Modelos de Gestión Sustentable**

En los estudios de Clausen y Hafkesbrink (2005), Larsen y Gujer (1997), Sharma y Vairavamoorthy (2008) y Gleick et al. (2009) se afirma, de manera general, que la sustentabilidad en el manejo del agua debe comprender la prestación de los servicios de agua potable, drenaje y tratamiento de aguas residuales. Esto a través de la integración de aspectos sociales, económicos y ecológicos, así como la vinculación del principio intergeneracional, es decir la consideración de las generaciones futuras en la protección de las fuentes de agua.

Estos autores coinciden de manera general en señalar que los criterios para la gestión sustentable del agua, deben prestar especial atención a la reducción de los niveles de contaminación, a la conservación de las fuentes de agua y a la reducción de la dependencia de las fuentes de agua externas

a la cuenca. Objetivos logrados mediante la gestión de la demanda (Sharma y Vairavamoorthy, 2008), la reducción de pérdidas por fugas en las líneas de distribución, el mayor aprovechamiento de las aguas residuales y las aguas lluvias (Larsen y Gujer, 1997) y la proyección de la demanda en la cual se analicen los costos, beneficios, efectividad y expectativa de los usuarios (Gleick et al., 2009).

De acuerdo con Clausen y Hafkesbrink (2005) dos factores adicionales deben ser considerados en la gestión tendiente a la sustentabilidad del agua; estos son, la responsabilidad compartida a través de la integración de los diferentes actores responsables de la gestión y la innovación tecnológica. Estos autores junto con Girardet (2006) y Sharma y Vairavamoorthy (2008) sugieren que antes de implementar medidas estructurales se deben analizar todas las alternativas para hacer eficiente el uso del agua, dentro de las cuales se debe incorporar los desarrollos tecnológicos.

Asimismo, autores como Wolff y Gleick (2002) y Brooks (2005) exploran la visión sustentable del agua, bajo la argumentación de que es necesario relegar el paradigma de la centralización en las infraestructuras como único medio de abastecer las demandas y transitar hacia el aumento de las prácticas de uso productivo de agua. Brooks, enfatiza sus argumentos advirtiendo que urge una política de “no más extracción de agua” ya que la gestión sustentable no depende sólo de su producción sino también de su consumo sustentable. De esta forma, estos autores comparten la teoría conocida como “Soft path” cuyo enfoque de gestión sustentable del agua se centra en las estrategias de la demanda que conducen a su uso eficiente.

Como principales criterios de operación de la teoría “Soft path” está el reconocer que el agua es un recurso que puede ser distribuido de acuerdo a las necesidades de los usuarios. Wolff y Gleick discuten que por ejemplo, un agricultor no demanda agua potable como tal, sino un insumo que ayude a crecer sus cultivos. El agua de abasto puede tener diferentes calidades; así de acuerdo al tipo de uso debe ser el tipo del agua, con las reservas de alta calidad sólo para los procesos que la requieran. Este modelo de gestión reconoce la salud ecológica del agua, así como, el empoderamiento de los usuarios en la operación y mantenimiento del sistema de agua.

En síntesis, los modelos expuestos marcan la transición de la gestión de la oferta a la gestión de la demanda, donde la sociedad empieza a tener un papel relevante en la conservación de las fuentes, como usuario demandante del servicio y el agua, por su parte, comienza a recobrar el valor ecológico hasta el momento, casi perdido.

### **2.3 La Gestión de recursos hídricos en México**

En México existe un largo proceso de gestión hídrica, aunque éste puede ser considerado como de corto alcance. Sin embargo, la gestión oficial del agua en México se ha desarrollado en dos periodos difusos, sobre todo en lo que se refiere a su aplicación práctica.

Así, el primer período abarca de fines del siglo XIX hasta los primeros años de la década de los años 90 del siglo XX. En esta fase, en 1917, se creó la Secretaría de Agricultura y Fomento, y posteriormente la Comisión Nacional de Irrigación, para ordenar el uso de los recursos suelo y agua en el país (Aboites, 1998). Para instrumentar la política de desarrollo regional y el manejo eficiente de los recursos naturales en el país se crearon a partir de 1947 siete comisiones de cuencas hidrográficas, las cuales fueron organismos descentralizados de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (Tortolero, 2000).

La Comisión del Papaloapan se estableció en 1947 y a partir de esa fecha se constituyeron las Comisiones del Grijalva-Usumacinta, Tepalcatepec, Balsas, Lerma -Santiago, Fuerte y Pánuco, las cuales tenían entre sus responsabilidades realizar obras de contención en los ríos, presas de almacenamiento para la regulación de avenidas, obras de irrigación, plantas hidroeléctricas, sistemas de agua potable, sistemas de comunicación tales como vías de navegación, puertos, carreteras, ferrocarriles, telégrafos, teléfonos, la creación y ampliación de los centros de población, desarrollos agropecuarios, forestales y agroindustriales. También se inició la realización de estudios y proyectos y, en algunos casos, el reacomodo y cambios de uso del suelo para desarrollos agrícolas, con su consecuente impacto ecológico (Elwell y Polerman, 1980; Barkin y King, 1978). Lo anterior bajo el enfoque administrativo con altos componentes de tipo ingenieril.

Así, en ese primer periodo se puede ver una marcada centralización de la gestión del agua. Se privilegia la construcción de grandes obras hidráulicas –embalses- por parte del gobierno federal mexicano; sobre todo, se privilegia e incentiva la ampliación de la frontera agrícola; se otorgan derechos de agua sin poner consideraciones ambientales (Vargas, 2004).

El segundo período abarca desde los primeros años de la década de los 90's del siglo XX. Este período es el resultado de la crisis fiscal del Estado, de la apertura comercial y la incorporación de mecanismos de mercado; pero sostenido, sobre todo más en el papel que en la práctica, por la búsqueda de una mejor distribución del agua, un uso eficiente de ésta, y la participación social y política de la sociedad en la gestión del líquido (López, 2005; Vargas, 2004). Así, se quiere pasar, sólo en teoría, de un modo de regulación estatal a otro en el que se pretende incorporar a los sectores sociales y privados en su manejo, incentivando, por parte del Estado mexicano, mecanismos de asignación que tienen su fundamento en la lógica del mercado.

En este período se crea, por Decreto Presidencial de fecha 16 de enero de 1989, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Actualmente, en esta institución recae la gestión oficial del agua en México. Este organismo gubernamental ha promovido la “participación” de los usuarios; sin embargo, esta participación es regulada y “supervisada” por la misma CONAGUA. Aquí es importante destacar que la participación social es producto de la presión ejercida por la sociedad civil en el afán, sobre todo, de ser considerada en las decisiones políticas. Sin embargo, las agencias gubernamentales, buscando no perder poder en la toma de decisiones, han promovido una participación social “regulada” mediante leyes y reglamentos.

En ese sentido, se dice que el marco legal en materia de agua en México requería ser actualizado y en 1992, tres años después de la creación de la CONAGUA, se promulga la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y en 1994 se establece su reglamento, el cual es reformado en 1997. Así, la LAN introdujo el desarrollo integral sustentable, la participación de los usuarios, el reconocimiento de un mercado de derechos de agua, la certeza “jurídica” de los usuarios a partir de un título de concesión, hacer pública la disponibilidad del agua, contar con un Registro Público de Usuarios y la creación de los llamados Consejos de Cuenca. En 2004, se reforma y adicionan diversas disposiciones a la LAN y se impulsan a la Comisión Nacional del Agua como la autoridad del agua, apoyada, según estas reformas, por los Organismos de Cuenca. Esta ley reformada introduce conceptos como gestión del agua, gestión integrada de los recursos hídricos, mercados y bancos del agua; considera al agua como un bien de dominio público, vital, vulnerable, finito, con valor económico; y que está en manos, sobre todo, del Estado y de la sociedad preservar su calidad y cantidad.

La estructura burocrática de la CONAGUA se organiza en 13 regiones hidrológico-administrativas. Cuenta con gerencias regionales y estatales como órganos desconcentrados de la CONAGUA. Impulsa la “participación social” a través de los organismos de cuenca (Consejos de Cuenca, Comités de Cuenca y, en el caso del Agua Subterránea, los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas –COTAS-); actualmente existen 25 Consejos de Cuenca, 63 COTAS y 19 Comités de Cuenca. Se establece que La Ley de Agua Nacionales (LAN) establece el marco jurídico para la Gestión Oficial del Agua en México. Este marco jurídico, en el papel, privilegia el enfoque integral; sin embargo, en la práctica de la gestión “oficial” del agua, el enfoque extractivo es el que prevalece. En la LAN se establece que la Gestión del Agua debe entenderse como un proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende su distribución y administración; 2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua; y (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. Sin embargo, esta Ley establece que la gestión del agua comprende, en su totalidad, a la administración gubernamental del agua.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, según la ley, debe entenderse como el proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable (LAN, 2004).

La LAN establece que la Región hidrológica es el área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica



como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos, cuya finalidad es el agrupamiento y sistematización de la información, análisis, diagnósticos, programas y acciones en relación con la ocurrencia del agua en cantidad y calidad, así como su explotación, uso o aprovechamiento. Normalmente una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas hidrológicas. Por lo tanto, los límites de la región hidrológica son en general distintos en relación con la división política por entidades federativas y municipios. Una o varias regiones hidrológicas integran una región hidrológico – administrativa (LAN, 2004).

La Región Hidrológico – Administrativa es el área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y el municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país (LAN, 2004).

La cuenca hidrológica es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde escurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio, delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna y otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica, está a su vez, integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas (LAN, 2004).

La gestión de recursos hídricos en general y, en particular, la gestión hídrica por cuencas es un proceso que requiere de investigaciones, que integren los aspectos sociales y biofísicos que están presentes en la cuenca. Sin embargo, en la práctica, el proceso de gestión hídrica en México bajo el enfoque integral aún no ocurre, ya que no se consideran los aspectos sociales, ambientales y económicos que influyen en la cuenca. Se da respuesta a los problemas que se van presentando y no se presentan soluciones integrales. Por ejemplo, la sequía o las inundaciones se resuelven sin un enfoque integral con medidas de corto plazo.

### **2.4 La cuenca hidrológica como espacio físico para la gestión del agua**

En el ámbito teórico pero también en el ámbito legal, se establece que la cuenca hidrológica es el marco espacial para la gestión hídrica. Esta consideración no es nueva ya que desde la década de los años 30 y más en los 70 del siglo XX se viene impulsando esa idea (véase: Forbes y Hodges, 1971; Grigg, 1996; White y Ford, 1994).

Sin embargo, aún existe el dilema de cómo pueden tomarse decisiones a nivel de cuencas cuando las decisiones políticas se realizan en las ciudades, a nivel estatal, federal o de ámbito binacional (fronteras de México), las cuales consideran límites jurisdiccionales que no coinciden con los de la cuenca y más aún si se considera que la visión predominante es el enfoque ingenieril o administrativo. Así, a pesar de que en teoría se acepta este espacio físico como el más idóneo para la gestión integral de los recursos hídricos, las acciones gubernamentales, políticas y económicas siguen respondiendo a espacios físicos definidos por aspectos políticos, administrativos y económicos (Dourojeanni, 2000). Es decir, que aún no se entiende en los diversos niveles administrativos de gobierno que los procesos físicos no respetan límites administrativos.

En la vasta literatura que discute la pertinencia de este espacio territorial como unidad de análisis se pueden observar, grosso modo, dos enfoques: el oficial, esto es, el que impulsan las agencias gubernamentales (nacionales e internacionales) y; por otro lado, el independiente, esto es, el que impulsan los investigadores y/o las organizaciones no gubernamentales.

El enfoque de cuenca hidrográfica que impulsan las agencias gubernamentales tiene su mayor desarrollo a partir de la década de los setentas del siglo XX. Así, se ha insistido en que la cuenca es el área más adecuada para la gestión de los recursos hídricos y su relación con las diversas actividades sociales y económicas que realizan los diferentes grupos humanos al interior de la misma. Esto se ha discutido en conferencias internacionales como la de Naciones Unidas sobre el Agua, celebrada en Mar de Plata, Argentina en 1977; la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente “El Desarrollo en la Perspectiva del Siglo XXI”, realizada en Dublín, Irlanda, en 1992; la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, realizada en Río de Janeiro en 1992; la Conferencia internacional sobre Agua y Desarrollo Sostenible, efectuada en París, Francia, en 1998; y la Conferencia Internacional sobre el Agua Dulce “El agua: una de las claves del desarrollo sostenible”, realizada en Bonn, Alemania, en 2001.

La Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2001) señala que la cuenca es la unidad óptima de gestión territorial para la planificación y administración de los recursos hídricos. Empero, también menciona que las jurisdicciones político-administrativas no coinciden con los límites territoriales de las cuencas. Más aún, algunas de las decisiones que afectan al ciclo hidrológico, el uso del agua y a los habitantes de una cuenca se toman sin considerarla como un sistema integrado. Lo anterior también es considerado por la Asociación mundial para el agua (GWP por sus siglas en inglés, 2000) cuando indica que el manejo de los recursos hídricos y el suelo debe garantizar que se mantengan los ecosistemas de la cuenca.

Desde el ámbito teórico se sostiene que la cuenca hidrográfica es el espacio idóneo para la gestión hídrica. Así, por ejemplo, Oropeza (1999) menciona que en la reunión anual de la Asociación Mundial de Hidrología de Cuencas, celebrada en 1992, se indicó que la unidad fundamental para el manejo de los recursos agua, suelo y vegetación era la cuenca. Basterrechea et al. (1996) indican que las posibilidades de diferenciación espacial y de integración conceptual de la cuenca

hidrográfica hacen de ella un marco geográfico propicio para entender los impactos humanos y naturales. Es, además, un espacio apropiado para planificar e implementar las actividades y medidas de corrección del impacto producto del uso y manejo de los recursos.

Así, la cuenca hidrográfica es un concepto útil para planificar el aprovechamiento del agua al servicio de diversas necesidades humanas. Sin embargo, hay que admitir que esta funcionalidad conceptual no corresponde en todas las circunstancias geográficas e históricas con una viabilidad práctica. Es frecuente que en este territorio se presente una variedad de identidades sociales y de rasgos culturales asociados a los usos del agua (Melville, 2000). Melville (2000) indica que algunos datos de la ocupación humana, como son la densidad demográfica y los principales cultivos en la cuenca, son admitidos con relativa facilidad; sin embargo, existen otros datos y rasgos culturales de una región, vinculados en diversos grados a la apropiación y uso del agua, que se dejan fuera.

Dourojeanni (2002) sostiene que las cuencas son las principales formas terrestres dentro del ciclo hidrológico que captan y concentran la oferta del agua que proviene de la precipitación. Es decir, desde el punto de vista hidrológico la cuenca es el área que permite conocer y determinar en forma más adecuada la disponibilidad hídrica y, con esto, una mejor gestión del recurso. Esto se contrapone, como ya se ha mencionado, a la gestión del recurso considerando límites administrativos y a una gestión parcelada del mismo. Por otro lado, indica que la cuenca constituye un área en donde interdependen e interactúan, en un proceso permanente y dinámico, el agua con otros elementos del sistema biofísico. Finalmente, este autor sostiene que en el territorio de la cuenca se producen interrelaciones e interdependencias entre el sistema biofísico y el socioeconómico o, como se indica aquí, el sistema socioeconómico, formado por los seres humanos que interactúan sobre éstos, bien como habitantes de la cuenca o como agentes externos.

Esta polémica puede entenderse porque en México, y en la mayoría de los países de América Latina, a pesar de que en teoría se acepta este espacio físico como el más idóneo para la gestión integral de los recursos hídricos, las acciones gubernamentales, políticas y económicas, siguen respondiendo a demarcaciones definidas por aspectos políticos, administrativos y económicos (Dourojeanni, 2000).

## **2.5 Modelos hidrológicos**

La palabra modelo tiene varias acepciones y se utiliza tanto que a veces es difícil discernir el significado de la palabra (Konikow y Bredehoeft 1992). Una manera simple de definir un modelo es quizá que es la representación de un sistema o proceso real. Un modelo conceptual es una hipótesis de cómo se comporta un sistema o un proceso y puede representarse de diferentes formas. (Konikow, 2002).

Un modelo hidrológico puede ser definido como una representación matemática del flujo del agua y sus componentes sobre alguna parte de la superficie o subsuperficie de la tierra (Estrela, 1992). La cuenca hidrográfica es el objeto de estudio de la mayoría de los modelos hidrológicos, reuniendo las superficies que captan y descargan agua sobre uno o más canales de escurrimiento que desembocan en una única salida. La cuenca puede constituir una unidad espacial para los modelos agregados que consideran las propiedades medias para toda la cuenca, o bien, se puede subdividir en función a diferentes enfoques a fin de considerar sus características espacialmente distribuidas.

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar de varias maneras, una de estas clasificaciones corresponde a su aplicación, por lo que existen (Ford y Hamilton, 1996): 1. modelos de escurrimiento; 2. modelos hidráulicos para ríos; 3. de calidad del agua en ríos y presas; 4. de operación de sistemas (vasos de almacenamiento y ríos); 5. de flujo subterráneo; 6. sistemas hidráulicos para distribución del agua; y 7. modelos para la proyección de la demanda. También se pueden clasificar de acuerdo a las características de los parámetros y métodos empleados en la modelación (ver tabla 1.2). Es importante conocer estas diferencias para poder seleccionar el modelo más apropiado (Yeomans, 2004).

Tabla 2. 1 Clasificación de los modelos hidrológicos

Categoría	Descripción
Evento/Continuo	Eventos: Modelan la respuesta de la cuenca bajo una determinada tormenta.
	Continuos: Modelan la respuesta durante y entre tormentas
Agrupado / Distribuido	Distribuido: Considera las variaciones espaciales de las características y procesos involucrados.
	Agrupado: Ignora o promedia dichas variaciones
Empírico / Conceptual	Conceptual: Se basan en leyes, principio y teorías.
	Empíricos: Parten de un ajuste a las observaciones del fenómeno.
Determinístico / Estocástico	Determinístico: Los procesos y las entradas libres de variación aleatoria, se conocen con certidumbre.
	Estocástico: Describe la variación aleatoria y la incorpora en la predicción de la respuesta.
Parámetros medidos / ajustados	Parámetros medidos: Los parámetros se determinan de las propiedades del sistema por mediciones directas o indirectas.
	Parámetros ajustados: No se pueden medir y se determinan ajustando o calibrando el modelo con valores de entrada y salida.

Fuente: Ford y Hamilton, 1996.

Dentro de la modelación determinista se tienen tres tipos de modelos: modelo empíricos también llamados de caja negra, agregados y distribuidos (Salgado *et al.*, 2012).

Los modelos de caja negra o caja gris se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicados (Salgado *et al.*, 2012).

Los modelos hidrológicos agregados (MHA) son modelos conceptuales, es un esfuerzo de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia-escurrimiento, también se conocen como modelos que consideran la humedad del suelo. Constan, en general, de una parte de balance de agua, que calcula en el tiempo el balance entre lluvia, evaporación, escorrentía y almacenamiento; y

una segunda parte de tránsito de los diferentes tipos de escurrimiento. Por tanto, pueden modelar en continuo la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación (Salgado et al., 2012).

Los modelos hidrológicos distribuidos (MHD) también llamados de base física, son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca, así como la variabilidad espacial de los principales factores que intervienen. Se basan exclusivamente en parámetros físicos, por tanto medibles, con lo cual son directamente aplicables a cuencas no aforadas (Salgado et al., 2012).

### 2.5.1 Descripción de algunos Modelos Hidrológicos Distribuidos

- **HYDROTEL**

El HYDROTEL<sup>5</sup> es un modelo hidrológico distribuido que simula a intervalo diario el escurrimiento directo y base retardado, en cientos de unidades hidrológicas relativamente homogéneas (UHRH). El modelo requiere de otra plataforma (PHYSITEL) para procesar previamente la fisiografía de la cuenca. El modelo hidrológico considera mediante seis procesos de simulación y para cada unidad hidrológica relativamente homogénea: datos fisiográficos, datos meteorológicos diarios y parámetros de procesos y de calibración.

- **VIC**

El modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity)<sup>6</sup>, es parte del desarrollo denominado SEA\_BASING, que es un proyecto desarrollado conjuntamente por las universidades de Washington (USA) y Chulalongkorn (Tailandia). El objetivo del modelo es la evaluación del impacto en los recursos hídricos como consecuencia del cambio del uso del suelo, la cobertura del mismo y la climatología regional. Asimismo, describe el transporte de sedimentos hasta la zona costera.

El modelo hidrológico VIC, es un modelo hidrológico semidistribuido que parametriza los procesos hidrológicos dominantes, como la superficie del suelo y la interfaz atmosférica. Es un modelo de agua superficial y balance de energía que está representado por dos retículas o mallas, en una se representa la cobertura superficial y en la otra se representa la infiltración y la variabilidad espacial de la precipitación. El modelo usa tres capas de suelo y una capa de vegetación en las cuales existe entre ellas un intercambio de energía y humedad.

---

<sup>5</sup> <http://hydrotel.codeplex.com/>

<sup>6</sup> <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>

- **WATFLOOD**

WATFLOOD<sup>7</sup> es un modelo de base física que además contiene su base conceptual con la aplicación de métodos hidrológicos. El programa es útil para pronosticar escurrimientos máximos con riesgo de inundación en la cuenca teniendo respuesta en un rango que va de una hora hasta varias semanas.

- **TOPMODEL**

TOPMODEL (a TOPography based hydrological MODEL)<sup>8</sup>, es un conjunto de herramientas usadas para reproducir el comportamiento de la captación y distribución de agua superficial y subterránea en una cuenca, basado en una simple descripción geográfica y métodos de escurrimiento. Es adecuado para captaciones considerando la parte superficial de los suelos y una topografía moderada, que no tenga sequias extremadamente largas.

- **TOPOFLOW**

TopoFlow<sup>9</sup> es un modelo distribuido de desarrollo reciente, el propósito de éste modelo es modelar procesos físicos que representen el drenaje de la cuenca con el objetivo de predecir la variación, con respecto al tiempo, de las variables hidrológicas. Es un modelo muy robusto con una interfaz de usuario amigable. Está diseñado para que los usuarios puedan usar métodos programados dentro de la plataforma o bien adicionar nuevos métodos e incorporar éstos en la interfaz gráfica del usuario.

## **2.5.2 Modelos integrados de gestión, planificación y evaluación de recursos hídricos**

Existen diversos modelos y herramientas para la gestión, planificación y evaluación integradas de recursos hídricos que pueden clasificarse en dos categorías amplias (UNFCC, 2012).

- En primer lugar, los modelos destinados a simular los procesos hidrológicos físicos en una cuenca. Estos modelos suelen emplear métodos numéricos complejos para determinar estimaciones de picos de caudal fluvial y niveles de inundación basándose en un conjunto de parámetros de datos que representa las características de la cuenca. Estos modelos normalmente requieren una gran cantidad de datos observados para conseguir la validación y calibración del modelo.
- La segunda categoría general de modelos incluye aquellos que representan la disponibilidad temporal y espacial del agua entre diferentes usos dentro de una determinada cuenca, región o zona definida políticamente.

---

<sup>7</sup> <http://www.civil.uwaterloo.ca/watflood/>

<sup>8</sup> [http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg\\_freeware\\_top.htm](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm)

<sup>9</sup> [http://csdms.colorado.edu/wiki/Model\\_help:TopoFlow](http://csdms.colorado.edu/wiki/Model_help:TopoFlow)

Existen diversos paquetes de modelos que incorporan tanto la simulación de procesos físicos como las cuestiones de gestión de agua. Los modelos varían desde modelos unidimensionales sencillos de libre acceso a paquetes de simulación tridimensionales más avanzados (y costosos).

Existe una gran variedad de modelos disponible para la aplicación a la gestión de los recursos hídricos, pero en la tabla 2.2 se muestra un resumen de los diversos modelos que considera la Asociación Mundial para el Agua (GWP) para llevar a cabo la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos<sup>10</sup>.

Tabla 2. 2 Selección de modelos de GIRH

Modelo	Fuente	Licencias y formación	Descripción	Vínculo
WEAP	Instituto de medioambiente de Estocolmo (SEI)	Gratuito para los países en desarrollo Talleres de formación periódicos	El WEAP (Sistema de evaluación y planificación del agua) es una herramienta de simulación de recursos hidrológicos superficiales y freáticos basada en los principios contables de equilibrio del agua que puede comprobar conjuntos de condiciones alternativas tanto para la oferta como para la demanda	< <a href="http://www.weap21.org/">http://www.weap21.org/</a> >
River-Ware	Centro de apoyo avanzado para las decisiones sobre los sistemas medioambientales e hidrológicos: Universidad de Colorado	Se requiere licencia; asistencia técnica disponible	RiverWare es un modelo de optimización y simulación de cuencas y depósitos utilizado para evaluar la política operativa, la optimización del sistema, la contabilidad del agua, la administración de los derechos sobre el agua y la planificación de recursos a largo plazo.	< <a href="http://cadswe.s.colorado.edu/riverware/">http://cadswe.s.colorado.edu/riverware/</a> >
SWAT	Departamento de agricultura de EE.UU. (USDA)	Gratuito Talleres de formación periódicos	SWAT (Herramienta de evaluación del suelo y el agua) es un modelo a escala de las cuencas fluviales que cuantifica el impacto de las prácticas de gestión de la tierra en cuencas complejas de gran tamaño	< <a href="http://swatmodel.tamu.edu/">http://swatmodel.tamu.edu/</a> >
HECHMS	Cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU.	Gratuito. Asistencia técnica solo para clientes USACE Talleres de formación periódicos	HEC-HMS (Sistema de modelación hidrológica - Centro de ingeniería hidrológica) es un diseño de modelo para simular el proceso precipitación escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticos.	< <a href="http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/">http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/</a> >
USGS MMSPRMS	Encuesta geológica de EE.UU.	Gratuito Talleres de formación disponibles a través de USGS	PRMS (Sistema de modelación precipitación-escorrentía) es un modelo de cuenca de procesos físicos desarrollado para evaluar los efectos de diversas combinaciones de precipitación, clima y uso de la tierra para una cuenca.	< <a href="http://www.briar.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/software/oui_and_mms_s/prms.">http://www.briar.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/software/oui_and_mms_s/prms.</a> >

<sup>10</sup> <http://gwptoolbox.org>

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Modelo	Fuente	Licencias y formación	Descripción	Vínculo
				shtml>
MIKESHE	Instituto hidráulico danés (DHI)	Se requiere licencia Talleres de formación periódicos a escala mundial	MIKE-SHE es un sistema de modelación hidrológica integrado avanzado. Simula el flujo de agua en toda la fase terrestre del ciclo hidrológico, desde la lluvia hasta el caudal fluvial, a través de diversos procesos de flujo como la escorrentía, la infiltración en el suelo, la evapotranspiración de la vegetación y el flujo subterráneo.	<http://mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKESHE.aspx>
HYMOS	Deltares (Instituto neerlandés para cuestiones nacionales e internacionales asociadas al delta)	Se requiere licencia Talleres de formación periódicos	HYMOS es un sistema de información para la gestión de recursos hídricos en general. Incluye todos los requisitos de procesamiento y almacenamiento de datos para el análisis, planificación, diseño y funcionamiento de los sistemas de gestión del agua.	<http://www.wldelft.nl/soft/hymos/int/index.html>
HEC-RAS	Cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU.	Gratuito Asistencia técnica solo para clientes USACE Talleres de formación periódicos	HEC-RAS (Sistema de análisis fluvial - Centros de ingeniería hidrológica) es un modelo desarrollado para cuantificar el flujo constante unidimensional, el flujo no constante, los cálculos de capas móviles/transporte de sedimentos y la modelación de la temperatura del agua.	<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
MIKE21	DHI	Se requiere licencia Talleres de formación periódicos a escala mundial	MIKE21 es un diseño de modelo bidimensional para simular la hidrodinámica de costas y estuarios, el transporte de sedimentos, los sistemas ecológicos y de olas.	<http://www.dhisoftware.com/>
Delft3D	Deltares	Se requiere licencia Talleres de formación periódicos	Delt3D es un modelo tridimensional diseñado para investigar la hidrodinámica, el transporte y morfología de sedimentos y la calidad de agua para entornos fluviales, de estuarios y costeros.	<http://www.deltaessystems.com/hydro>
Aquarius	USDA	Gratuito Seminarios celebrados en los EE.UU.	Aquarius es un marco de análisis que representa la asignación temporal y espacial de los flujos de agua entre los usos de agua conflictivos tradicionales y no tradicionales en una cuenca fluvial.	<http://www.fs.fed.us/rm/value/aquarius>
RIBASIM	Deltares	Se requiere licencia Talleres de formación periódicos	RIBASIM es un paquete de modelos genérico para la simulación del comportamiento de las cuencas fluviales en diversas condiciones hidrológicas para los sistemas superficiales y subterráneos.	<http://www.wldelft.nl/soft/ribasim/int/index.html>
MIKE BASIN	DHI	Se requiere licencia	MIKE BASIN es una herramienta para tratar cuestiones relativas a la asignación del agua, el	<http://www.dhisoftware.co



Modelo	Fuente	Licencias y formación	Descripción	Vinculo
		Talleres de formación periódicos a escala mundial	uso conjuntivo, el funcionamiento de depósitos o la calidad del agua.	m/>
HECResSim	Cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU.	Gratuito Asistencia técnica solo para clientes USACE Talleres de formación periódicos	HEC-ResSim (Simulación de sistemas de depósitos – Centro de ingeniería hidrológica) es un modelo de gestión del agua diseñado para simular las operaciones con depósitos en uno o varios depósitos cuyo funcionamiento se rija por una variedad de limitaciones y objetivos operativos.	<http://www.hec.usace.army.mil/software/heccressim/>

Fuente: UNFCC, 2012.

Así que para seleccionar un modelo es necesario primeramente definir los siguientes aspectos (Wurbs,1995): 1. La participación del modelo en la gestión de los recursos hídricos y las preguntas que se buscan responder con él; 2. Las limitaciones que se tendrán al modelar las condiciones reales de los procesos con ecuaciones matemáticas simplificadas; 3. Las técnicas computacionales para resolver las ecuaciones; 4. La disponibilidad de los datos; 5. Las técnicas de verificación y calibración; 6. La disponibilidad y acceso al software y hardware necesario para la modelación así como la capacitación en las habilidades necesarias para el manejo de estas herramientas.

### 2.5.3 Conocimiento del Water Evaluation and Planning System (WEAP)

Para este trabajo se decidió trabajar con el modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation and Planning System) el cual fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI); y es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo objetivo es asistir más que sustituir al planificador experimentado. Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas sobre manejo de agua. Posiciona por un lado las condiciones de la demanda de agua, tales como patrones del uso del agua, eficiencias de equipo, estrategias de la reutilización, costos y esquemas de asignación de agua en una misma línea con los temas de la oferta de agua, tales como caudal, recursos de agua subterránea, embalses y transferencia. Presenta un enfoque integral al simular tanto de los componentes naturales (ej. las demandas por evapotranspiración, escorrentía, flujo base) como de los componentes humanos (ej. embalses, bombeo de agua subterránea) de los sistemas del agua (SEI, 2009a).

WEAP funciona usando el principio básico de balance de masa pudiendo ser utilizado para sistemas urbanos y agrícolas, a una sola cuenca o complejos sistemas de cuencas transfronterizas. Puede simular un amplio espectro de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo escorrentía por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos

de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses; generación de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad del agua; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas (SEI, 2009b).

Los usos de WEAP incluyen generalmente los siguientes pasos<sup>11</sup>:

- **Definición del Estudio:** Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema, y la configuración del problema.
- **Cuentas Corrientes:** Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- **Escenarios:** Se pueden explorar los impactos que tendría, un sistema de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y del clima, por ejemplo, en la demanda del agua, oferta de agua, hidrología, y contaminación. (Las oportunidades para la generación de escenarios se presentan en la siguiente sección).
- **Evaluación:** Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables dominantes.

### Características de WEAP

WEAP ofrece a través de un interfaz gráfico basado en SIG una manera simple, pero poderosa para construir, ver y modificar la configuración. El usuario diseña un diagrama esquemático del sistema usando el mouse "para arrastrar y soltar" (drag and drop) los elementos que se agregan al sistema. Estos elementos pueden ser sobrepuestos en un mapa construido en Arcview y otros archivos estándares de SIG y gráficos. Los datos para cualquier componente pueden ser corregidos directamente al hacer "click" en el símbolo deseado en el diagrama esquemático. El usuario puede consultar la característica de ayuda sensible al contexto en cualquier lugar dentro de WEAP. "Wizards", avisos, y mensajes de error proporcionan consejo a través del programa. Con el sistema altamente flexible y comprensivo de información de resultados de WEAP, el usuario puede preparar informes tanto como salida gráfica o tabular y seleccionar de un número de posibles opciones de formato (ej., unidades métricas o inglesas, años, niveles absolutos, partes porcentuales, o tasas de crecimiento). Las configuraciones específicas de los informes se pueden guardar como "favoritos," que se puede combinar en "vistas generales, (overviews)" o resúmenes, de los indicadores claves del sistema; estas vistas generales pueden ser recuperadas rápidamente para ser revisadas.

---

<sup>11</sup> <http://www.weap21.org/>

## Principales características

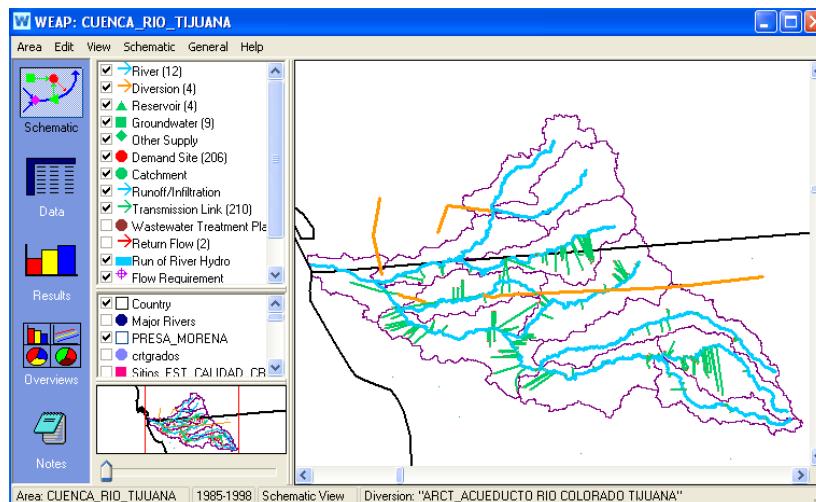
- Sistema de planificación integrado de los recursos hídricos.
- Modelos incorporados para modelación de: escurrimientos e infiltración por precipitación, evapotranspiración, requisitos y producciones de cosechas, interacciones entre agua superficial y aguas subterráneas, y calidad del agua en ríos.
- Interfaz gráfica basada en incorporación de elementos a través de “jalar y soltar”.
- Capacidad para construir modelos con un número de funciones predefinidas.
- Ecuaciones y variables definidas por el usuario.
- Conexión dinámica con planillas de cálculo y otros modelos.
- Algoritmo de programación que resuelve las ecuaciones de distribución de agua.
- Estructuras de datos flexibles y expandible.
- Poderoso sistema de información de resultados incluyendo gráficos, tablas y mapas.
- Guía de usuario y ayuda sensible al contexto.
- Requisitos mínimos: corre en Windows 2000/NT/XP/Vista/Windows 7 en un computador Core 2 Duo con 1 GB de memoria RAM.
- Estructura de WEAP.

## Estructura de WEAP

La estructura de WEAP consiste de cinco vistas principales que a continuación se describen:

**Vista de Esquema** – En esta vista, permite agregara archivos ArcView y otros archivos SIG de tipo “vector” o “raster” como capas de fondo, los cuales permiten fácil y rápidamente configurar el sistema, además se cuenta con la capacidad de “jalar y soltar” los elementos que componen el sistema. Se tiene acceso rápidamente a los datos y a los resultados para cualquier elemento colocado en la vista de esquema (figura 2.1).

Figura 2. 1 Esquema de la cuenca del río Tijuana en WEAP

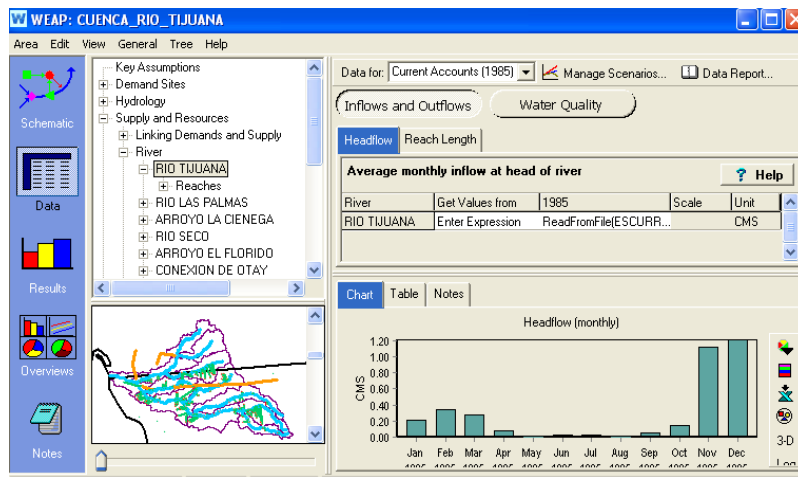


Fuente: Elaboración propia.

El Esquema es el punto de partida para todas las actividades en WEAP ya que es donde se crea la modelación de la cuenca, porque se incorporan todos los elementos que interactúan en ella como son: ríos, derivaciones, presas, acuíferos, otras fuentes, sitios de demanda, captaciones, infiltración/escorrimento, líneas de transmisión, plantas de tratamiento de aguas residuales, flujos de retorno, hidroeléctricas, requisitos de flujo y medidor de caudales.

**Vista de Datos** – En ella se ven las herramientas de construcción del modelo que ayudan a la construcción de variables y relaciones, ingresar supuestos y proyecciones usando expresiones matemáticas; y puede acoplarse dinámicamente con Excel para importación y exportación de datos; también permite dejar ver la representación de los datos en el modelo (figura 2.2).

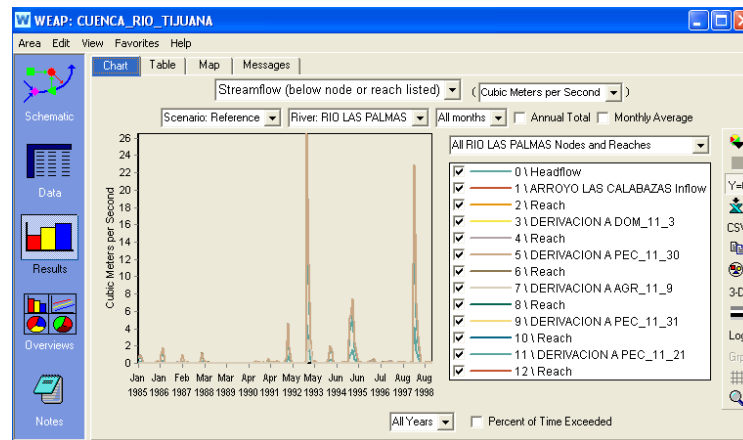
Figura 2. 2 Esquema de los datos en el modelo



Fuente: Elaboración propia.

**Vista de Resultados** - los resultados del modelo pueden ser vistos de manera detallada y flexible en gráficos, tablas o en un mapa. Los formatos de gráficas (barras, lineal, x,y etc.) y mapas permiten una visión de los resultados a través del tiempo (figura 2.3).

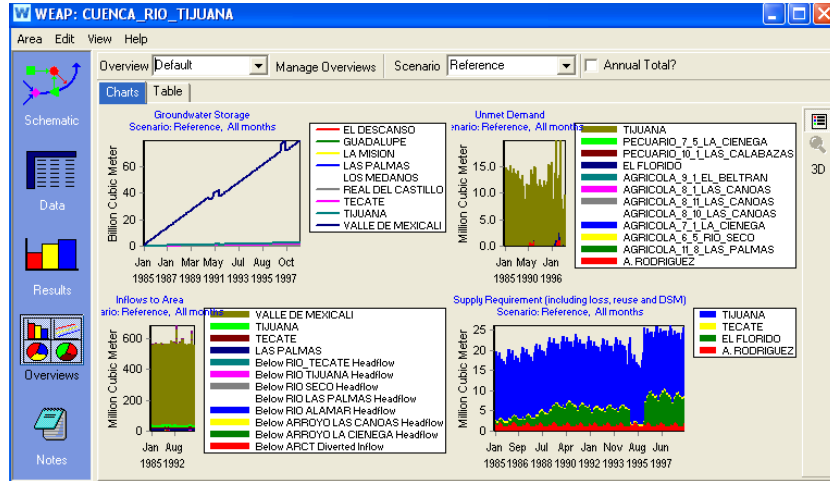
Figura 2. 3 Representación de los datos en el modelo



Fuente: Elaboración propia.

Vista Perspectiva - diseña un grupo de gráficos y resumen para destacar los indicadores claves a través de una revisión rápida (figura 2.4).

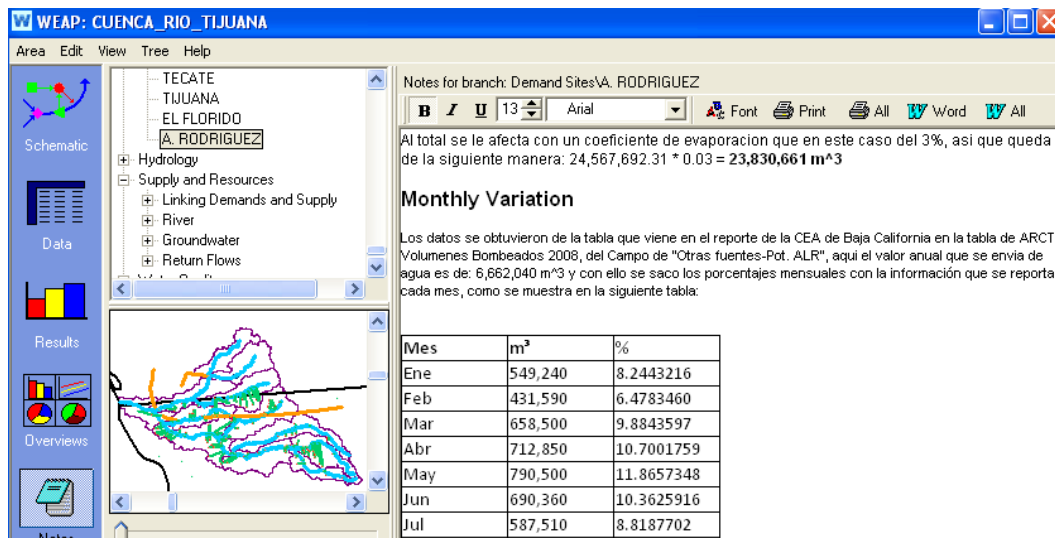
Figura 2. 4 Vistas generales de escenarios de referencia



Fuente: Elaboración propia.

Vista de Nota – Se documenta todos los datos y supuestos que se consideraron en la elaboración del modelo (figura 2.5).

Figura 2. 5 Notas de supuestos



Fuente: Elaboración propia.

**Ventajas de la Plataforma WEAP son:**

Facilidad de Uso

- Construye escenarios ajustando parámetros de entrada a través de la interface del modelo y compara los resultados sin necesidad de procesar fuera del modelo en forma individual los resultados.
- El modelo tiene una interface gráfica que permite fácilmente manipular los parámetros de las bases de datos.
- El software no tiene ningún costo para organizaciones sin fines de lucro, gubernamentales o académicas en un país en desarrollo<sup>12</sup>.

Funcionalidad y Estructura

- Los objetos de la interface gráfica son alusivos al manejo de los recursos hídricos y pueden ser comprendidos por profesionistas del ramo.
- El usuario puede seleccionar el intervalo de tiempo a utilizar (días a mensual) dependiendo del proceso simulado.

Integración

- Los resultados generados están fijos y se despliegan en formato de texto ASCII.
- El modelo puede leer datos de entrada en formatos estandarizados, así como exportar.
- El modelo puede leer información espacial en los formatos de los archivos de ArcView.

---

<sup>12</sup> País en desarrollo se define como cualquier país que no está en la lista del Banco Mundial de países con altos ingresos).

## CAPÍTULO 3 . CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 3.1 Características físicas de la Cuenca del Río Tijuana

#### 3.1.1 Localización Geográfica

El área de estudio comprendida para llevar a cabo el análisis y la modelación mediante el WEAP es la Cuenca del Río Tijuana (CRT). La CRT se localiza sobre el límite internacional entre los Estados Unidos y México y abarca un área aproximada de 4,445 Km<sup>2</sup>, con una tercera parte en California y dos terceras partes en Baja California (figura 3.1). La porción mexicana de la CRT está en su mayoría en los municipios de Tecate y Tijuana y una pequeña parte dentro del municipio de Ensenada. En el lado estadounidense de la cuenca, 93% se encuentra bajo la jurisdicción del Condado de San Diego y una pequeña parte dentro de las ciudades de San Diego (Otay Mesa y San Ysidro) e Imperial Beach. También incluye reservas indígenas como las de Campo (kumiai) y Manzanita, y porciones de La Posta y Cuyapaípe. Estas naciones tribales tienen soberanía jurídica semejante a un estado en Estados Unidos (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 1 Ubicación de la Cuenca del Río Tijuana



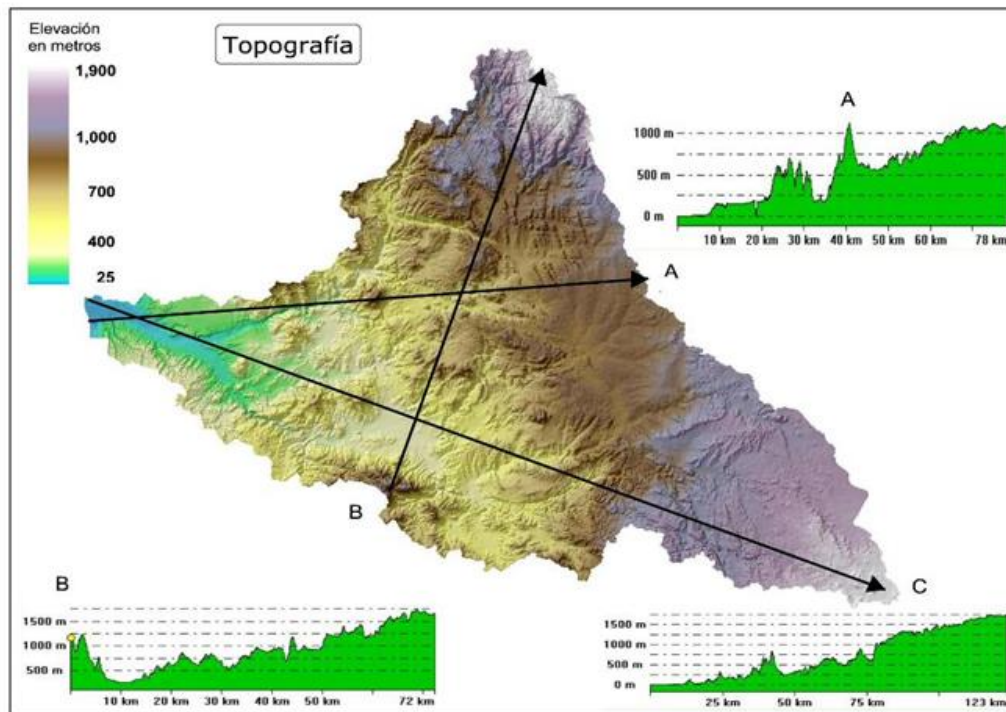
Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### 3.1.2 Aspectos Ambientales

#### *Topografía*

La superficie de la cuenca incrementa su elevación desde el nivel del mar en el occidente en la boca del río Tijuana, hasta las montañas del noroeste y sureste a más de 1,944 metros y 1,800 metros respectivamente. Sin embargo, la pendiente no es uniforme de oeste a este (figura 3.2). Esto se debe a que muchas partes de la superficie han sido sumamente fragmentadas por la acción erosiva de las corrientes de agua, especialmente en las inmediaciones de los principales valles fluviales (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 2 Topografía



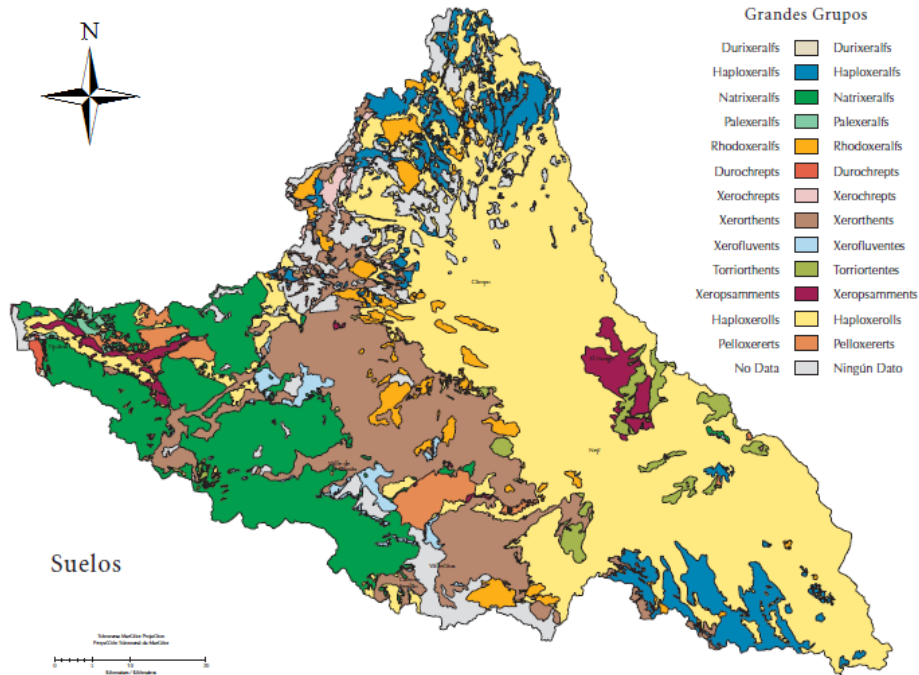
Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

#### *Suelos*

La figura 3.3 muestra los diferentes tipos de suelos que se presentan en la cuenca, donde se puede apreciar que los que predominan son los Haploxerolls en la parte este de la cuenca; y posteriormente los Natrixeralfs y Xerorthents que se encuentran en la parte oeste y centro de la cuenca.



Figura 3. 3 Suelos

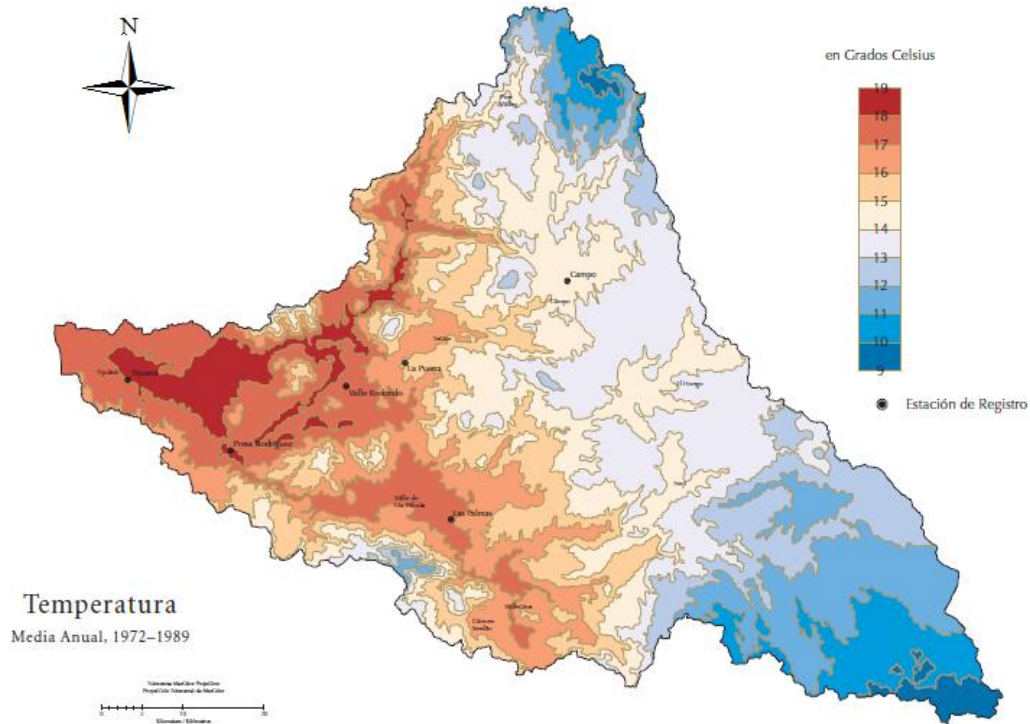


Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

## ***Temperatura***

La CRT muestra una amplia variación de temperaturas medias debido a su considerable rango altitudinal que oscila desde el nivel del mar hasta los 1,994 metros. En las áreas más bajas, las temperaturas medias anuales varían entre 16 °C a 19 °C. Las temperaturas más bajas ocurren en las elevaciones mayores ubicadas en las partes extremas del norte y sureste de la cuenca, donde las temperaturas medias anuales varían entre 9 °C a 11 °C (figura 3.4). Aunque las temperaturas diurnas en las áreas de alta elevación son algo más bajas que las de las áreas más cercanas al nivel del mar, las diferencias mayores de temperatura ocurren en la noche, especialmente durante el invierno (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 4 Temperatura

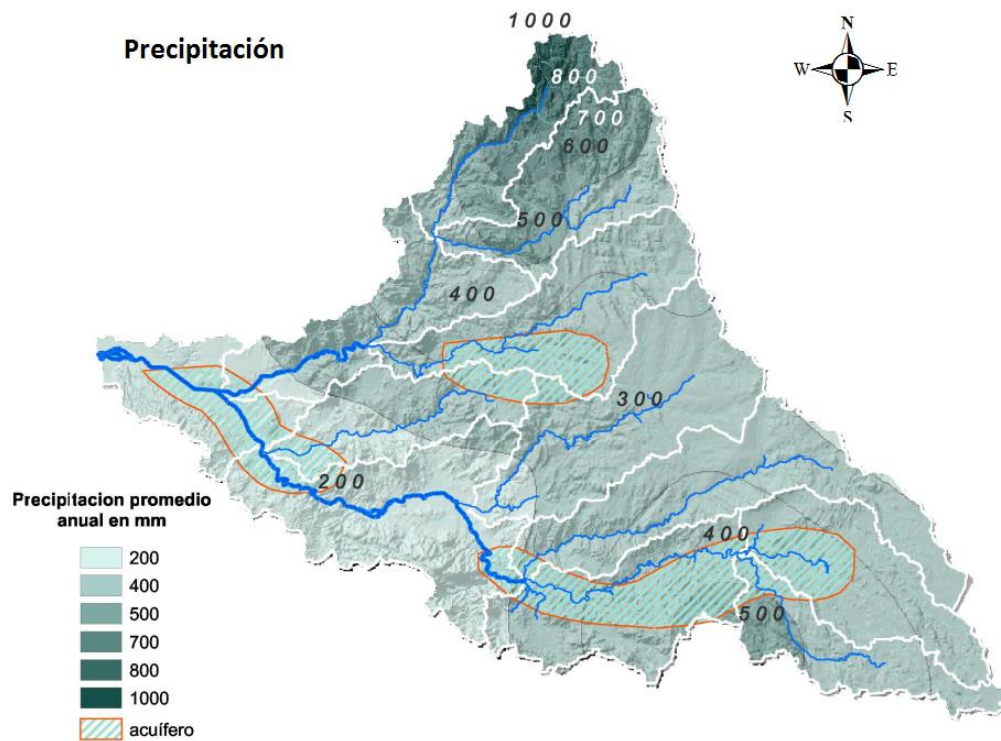


Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### ***Precipitación***

La precipitación que se presenta en la cuenca difiere mucho, con valores anuales medios que van desde apenas arriba de los 200 mm en las zonas costeras hasta casi 1,000 mm en las zonas montañosas (figura 3.5). La elevación ejerce un fuerte efecto en la precipitación en la cuenca. Al fluir el aire a través de una barrera, éste se ve forzado a elevarse, lo cual propicia la formación de nubes y precipitación. Sin embargo, no existe una correlación exacta entre la elevación y las cantidades de precipitación porque el aspecto de las pendientes relativo a los vientos prevalecientes es un factor importante. Por lo tanto, los valores de precipitación más altos que se indican en el mapa de la CRT ocurren justo hacia el oeste de las dos áreas de mayor elevación. (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 5 Precipitación



Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### ***Agua Superficial***

El río Tijuana está formado por dos redes hidrográficas, una proveniente de los Estados Unidos y otra de México, que se juntan en la ciudad de Tijuana, a unos 17 kilómetros del Océano Pacífico. El agua del río Tijuana fluye dentro de un canal de concreto a través de la ciudad de Tijuana. El agua entonces ingresa a los Estados Unidos donde es transportada en una red más natural por el estuario del río Tijuana y hacia el Océano Pacífico (figura 3.6).

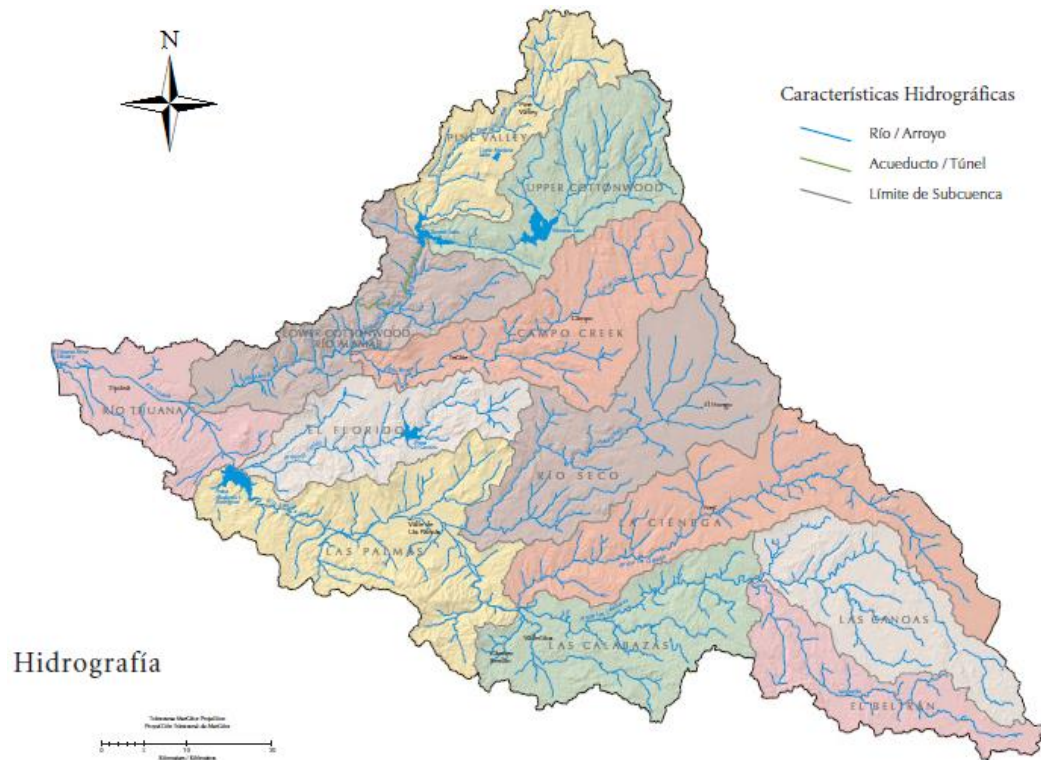
En los Estados Unidos, la red de arroyos de la cuenca fluye hacia el suroeste y está compuesta principalmente por las corrientes del Pine Creek, Cottonwood Creek y Campo Creek. Las represas de Barrett y Morena almacenan el agua proveniente del Pine Creek y de la parte alta del Cottonwood Creek la cual es transportada, desde la cuenca del río Tijuana, por el acueducto de Dulzura hacia la Cuenca del Río Otay, donde es una fuente de agua para la ciudad de San Diego (Wright y Vela, 2005).

En México, la red de ríos fluye en gran parte de Este a Oeste, lo que refleja la inclinación general del terreno hacia el oeste. La parte inferior del Cottonwood Creek (Río Alamar) se encuentra en el norte de la cuenca. En la parte sur de la cuenca, el río principal tiene diferentes nombres: arroyo Las Calabazas en la Sierra Juárez, río Las Palmas en la sección media y Río Tijuana hacia la desembocadura. De Sur a Norte, sus tributarios principales son el arroyo La Ciénega, río Seco y arroyo El Florido (o río

Matanuco). Las presas Rodríguez y El Carrizo son los principales almacenes de agua para la Ciudad de Tijuana. Ésta última es la terminal del agua importada del Río Colorado y también sirve a la Ciudad de Tecate como una reserva para casos de emergencia.

Debido a las condiciones climáticas mediterráneas y semiáridas, el flujo de las corrientes en su mayor parte es intermitente, y su máximo flujo ocurre de noviembre a abril. Las cuatro presas principales en el sistema, la alteración extendida de la cobertura del suelo natural y la extracción del agua subterránea modifican las escorrentías (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 6 Hidrografía

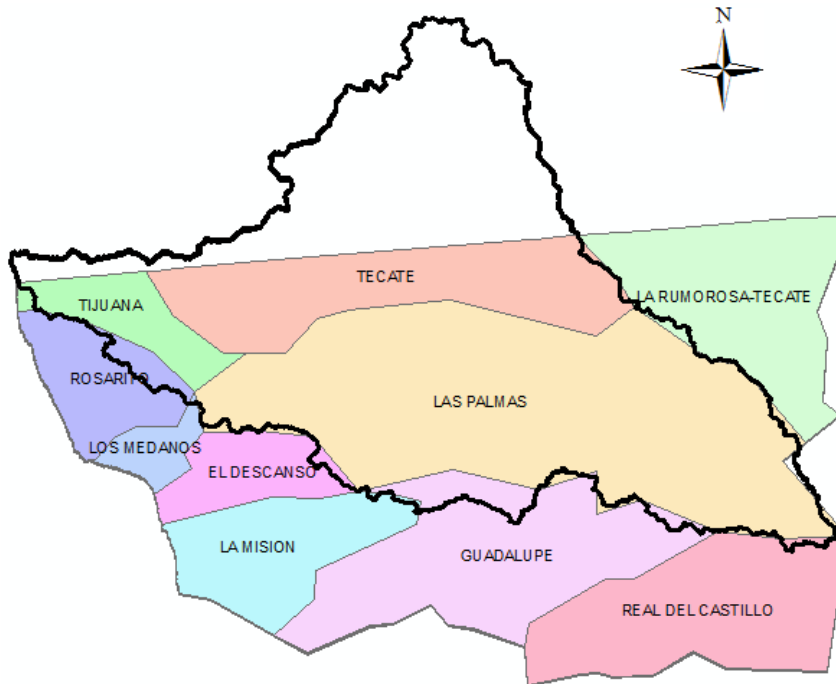


Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### ***Agua Subterránea***

Con respecto a las aguas subterráneas, en la Cuenca del Río Tijuana del lado mexicano, se localizan dentro y cerca de ésta diez acuíferos como se muestra en la figura 3.7, de los cuales solo tres son los que se ubican dentro de la cuenca como son: Tijuana, Tecate y Las Palmas.

Figura 3. 7 Acuíferos que se encuentran dentro y cerca de la CRT del lado mexicano



Fuente: Elaborado a partir de CONAGUA (2008).

La tabla 3.1 muestra el estado en el que se encuentran los diez acuíferos que se ubican dentro y fuera de la CRT, donde la mitad se encuentra con disponibilidad y la otra mitad en déficit; teniendo así una disponibilidad de 4.73 hm<sup>3</sup> y un déficit de -28.69 hm<sup>3</sup>. Desafortunadamente los tres acuíferos que se ubican dentro de la cuenca presentan en conjunto un déficit de -6.06 hm<sup>3</sup>.

Tabla 3. 1 Acuíferos que se ubican dentro y cerca de la CRT

Clave	Nombre	Disponibilidad (hm <sup>3</sup> )	Déficit (hm <sup>3</sup> )
0201	Tijuana	0.00	-0.08
0202	Tecate	0.00	-1.69
0203	El Descanso	0.45	0.00
0204	Los Medanos	0.98	0.00
0205	Las Palmas	0.00	-4.24
0206	La Misión	0.00	-2.29
0207	Guadalupe	0.00	-20.32
0236	La Rumorosa-Tecate	0.80	0.00
0245	Rosarito	1.52	0.00
0248	Real del Castillo	0.97	0.00
<b>Total</b>		<b>4.73</b>	<b>-28.69</b>

Fuente: Elaborado a partir de CONAGUA (2008).

A continuación se describe un poco de los acuíferos que se encuentran dentro de la CRT.

### **Acuífero Tijuana**

El área del acuífero Tijuana comprende una superficie aproximada de 241 km<sup>2</sup>, se localiza en la porción noroccidental del estado de Baja California, uno de sus límites es con los Estados Unidos y por el occidente el Océano Pacífico.

Las entradas al acuífero Tijuana están integradas por las recargas naturales y las recargas inducidas. La recarga natural es de 4.7 hectómetros cúbicos por año (hm<sup>3</sup>/año) y la recarga inducida es de 11.3 hm<sup>3</sup>/año, así que la recarga total del acuífero es de 16.0 hm<sup>3</sup>/año.

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al 31 de diciembre del 2006 es de 16.08 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto se tiene un déficit de 0.08 hm<sup>3</sup>/año, y su disponibilidad es cero.

### **Acuífero Tecate**

El área del acuífero Tecate comprende una superficie aproximada de 751 km<sup>2</sup>, localizada en la porción noroeste del estado de Baja California, colindando al norte con la frontera con Estados Unidos, al sur con el valle de Las Palmas, al oriente con la sierra La Rumorosa y al oeste con la ciudad de Tijuana.

El acuífero Tecate, pertenece a la Región Administrativa I Península de Baja California, así como al Consejo de Cuenca 02 Baja California. Actualmente no cuenta con un Comité Técnico de Aguas Subterráneas.

El acuífero tiene una recarga anual de 10.1 hm<sup>3</sup>, un volumen concesionado de agua subterránea de 11.79 hm<sup>3</sup> y tanto descarga natural comprometida como su disponibilidad media anual de agua subterránea es de cero. El déficit que presenta el acuífero Tecate es de -1.69 hm<sup>3</sup>.

### **Acuífero Las Palmas**

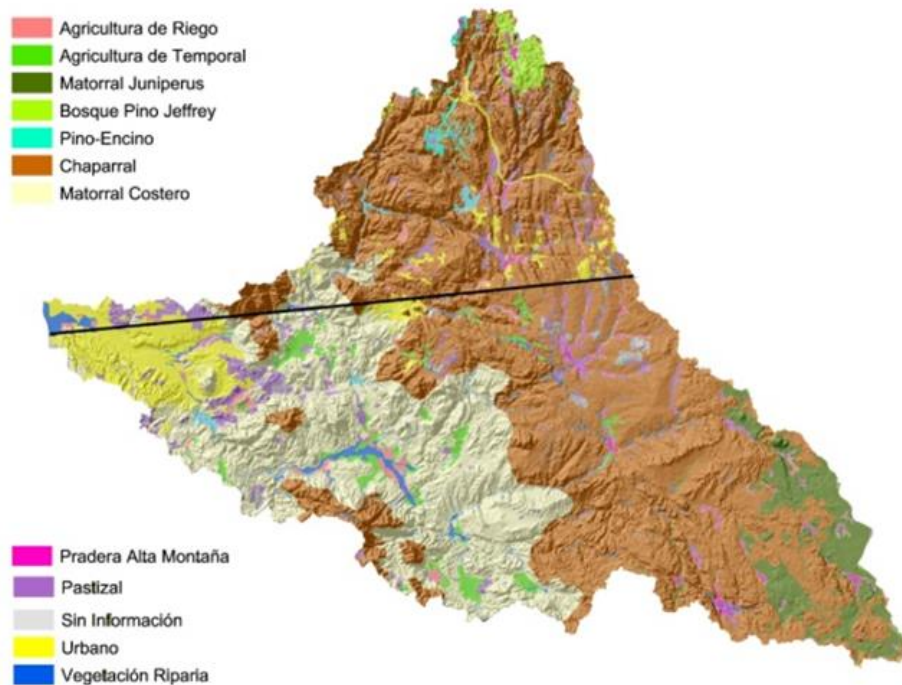
El acuífero Las Palmas se localiza en la parte Noroccidental de la Península de Baja California, cubre una superficie de 2,298 km<sup>2</sup>. El acuífero está enclavado en las subcuencas del Arroyo Las Palmas, La Ciénega, Las Calabazas, Las Canoas y el Beltrán y se encuentra limitado al Sur con los acuíferos El Descanso, Guadalupe y Real del Castillo; al Norte con el acuífero de Tecate; al Este con los acuíferos Real del Castillo y Laguna Salada; al Oeste con los acuíferos Tijuana y Los Médanos.

El acuífero de Las Palmas tiene una recarga anual de 10 hm<sup>3</sup>, una descarga natural comprometida de 3.5 hm<sup>3</sup>, volumen concesionado de agua subterránea de 11.24 hm<sup>3</sup>, su volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos es de 7.9 hm<sup>3</sup>, su disponibilidad media anual de agua subterránea es de cero y su déficit es de - 4.24 hm<sup>3</sup>.

## Vegetación

Debido a su diversidad geológica, topográfica y climatológica, la cuenca sustenta una amplia variedad de comunidades de plantas endémicas. Los tipos de vegetación varían en altura y elevación, desde el nivel del mar (por ej., marisma costera y dunas del sur) hasta la sierra con bosque mixto de conífera que se encuentra en la parte más alta al norte de la cuenca, donde la precipitación es mayor (figura 3.8). Dos tipos de vegetación cubren la mayoría de la cuenca, el matorral costero de salvia localizado en las laderas secas de poca elevación de la parte media y el chaparral que cubre cerca del 56% de la cuenca y se localiza en elevaciones superiores. Entre el matorral costero de salvia y el chaparral cubren el 74% de la cuenca (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 8 Vegetación de la Cuenca del Río Tijuana



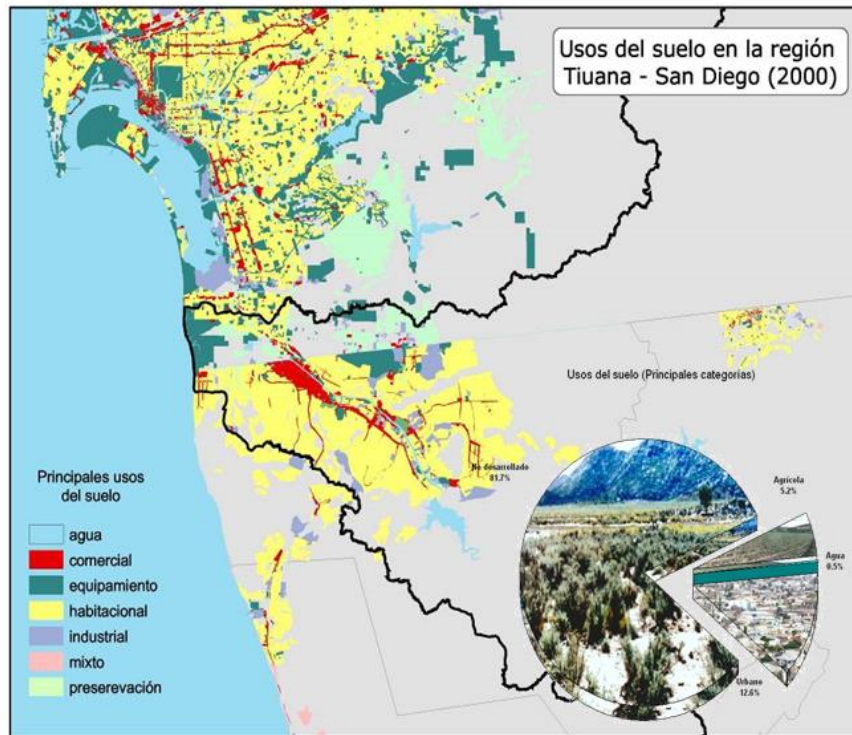
Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

## Usos del suelo

La CRT es una región que presenta usos contrastantes con respecto al suelo. Aunque los centros urbanos establecen una población cercana a 1.4 millones de habitantes, ubicados principalmente en las ciudades de Tijuana y Tecate, el uso del suelo urbano conforma aproximadamente el 10% del área de suelos de la cuenca. La mayor parte de la cuenca está sin desarrollar (84%) (figura 3.9). De los suelos que se clasifican como sin desarrollar, gran parte se utiliza para pastoreo de baja intensidad de ganado y cabras. Las áreas de agricultura más intensa están asociadas con los valles interiores donde se cuenta con fuentes contables de agua para el riego de los cultivos. La más grande de estas áreas es el Valle de Las Palmas al sureste de Tijuana. Otras áreas importantes son Carmen Serdán y Vallecitos, al sureste

del Valle de Las Palmas, y Santa Verónica, Nejí y El Hongo, en la parte este de la sección mexicana de la cuenca (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 9 Usos del suelo



Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### ***Calidad del agua***

La contaminación por bacterias fecales en el estuario del río Tijuana y en el océano cerca a la costa ha sido un problema continuo por más de medio siglo. Esta contaminación es resultado del acelerado crecimiento poblacional de Tijuana, cuya infraestructura de drenaje no ha crecido a igual ritmo que la población. Debido a la posición fisiográfica y a la cercanía de la ciudad de Tijuana con los Estados Unidos, las aguas residuales sin tratar fluyen desde México hacia los Estados Unidos por el río Tijuana y los cañones que drenan hacia el norte.

La Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PITAR), construida por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA/IBWC), proporciona tratamiento primario avanzado para los efluentes de Tijuana. Esta planta, ha reducido el problema de la contaminación de manera significativa, especialmente durante la temporada de sequía. No obstante, la PITAR no tiene la suficiente capacidad para tratar los flujos de los tiempos de lluvia, los cuales siguen contaminando el río, el estuario y las aguas costeras.



## 3.2 Infraestructura hidráulica

### 3.2.1 Presas y potabilizadoras

#### *Presas*

En la Cuenca del Río Tijuana se ubican cuatro presas, dos en el lado Mexicano y las otras dos del lado de Estados Unidos (figura 3.10). Las presas que se ubican en el lado mexicano son la presa Abelardo L. Rodríguez ubicada en el municipio de Tijuana y la presa El Carrizo ubicada en el municipio de Tecate. Las que se localizan del lado de Estados Unidos son la Presa Morena y Barrett, dichas presas se encuentran en el condado de San Diego y se emplean para captar y conducir el agua que se produce en las zonas altas del norte de la cuenca del río Tijuana, hacia la ciudad de San Diego.

Figura 3. 10 Presas que se ubican en la cuenca del río Tijuana



Fuente: Conagua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. [http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm) / <http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>

#### **Presas Abelardo L. Rodríguez**

Construida con el doble propósito de control de avenidas y de almacenamiento; tiene una capacidad de almacenamiento de 138 hm<sup>3</sup>. Así mismo cuenta con un sistema de 9 compuertas con capacidad de desfogue de 4,200 m<sup>3</sup>/seg. Por temporadas es utilizada como una fuente de abastecimiento para la ciudad de Tijuana; depende de la captación que se logre obtener de sus principales afluentes. Es considerada como una fuente no segura de abastecimiento<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Programa Estatal Hidráulico de Baja California 2003-2007

### **Presa El Carrizo**

La presa se localiza en el municipio de Tecate, sobre el arroyo del mismo nombre. El agua de esta presa se emplea para uso público-urbano en las ciudades de Tijuana y Tecate. Fue construida para almacenar el agua del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT), cubre la función de reguladora, después de recibir el agua del acueducto, se conduce a la potabilizadora El Florido; tiene una capacidad de almacenamiento de 40 hm<sup>3</sup>.

### **Presa Morena**

La presa morena se localiza en Cottonwood Creek en el condado de San Diego, California. La construcción se terminó en 1912. Su superficie normal es de 2,3 millas cuadradas (5,954.43 m<sup>2</sup>). Es propiedad de la ciudad de San Diego. Su altura es de 181 pies (55.17 m) con una longitud de 550 pies (167.64 m). Almacenamiento normal es 50,206 acres pies (61.93 hm<sup>3</sup>). Se drena un área de 114 millas cuadradas (295,132.43 m<sup>2</sup>)<sup>14</sup>.

### **Presa Barrett**

La presa Barrett se ubica en Cottonwood Creek y Pine Creek en el condado de San Diego, California. La construcción se terminó en 1922. Tiene una superficie normal de 1,4 millas cuadradas (3,624.43 m<sup>2</sup>). Es propiedad de la ciudad de San Diego. Su altura es de 161 pies (49.07 m) con una longitud de 750 pies (228.6 m). Almacenamiento normal es 44,755 acres pies (55.21 hm<sup>3</sup>). Se drena un área de 252 millas cuadradas (652,398.01 m<sup>2</sup>)<sup>15</sup>.

## ***Potabilizadoras***

En el lado mexicano en los municipios de Tijuana y Tecate se ubican seis plantas potabilizadoras (tres en Tijuana y tres en Tecate) en la tabla 3.2 se muestra sus características. Se observa que la de mayor capacidad instalada (4,000 l/s) y de caudal potabilizado (2,477.5 l/s) es El Florido la cual se encarga de potabilizar el agua que le llega del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) y que es entregada a las ciudades de Tijuana y Tecate.

---

<sup>14</sup> <http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>

<sup>15</sup> [http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm)

Tabla 3. 2 Potabilizadoras

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Potabilizado (l/s)	Observaciones
TECATE	TECATE	CUCHUMA	FILTRACIÓN DIRECTA	125.0	24.8	BUENAS CONDICIONES
TECATE	TECATE	EL HONGO	FILTRACIÓN DIRECTA	40.0	11.7	DERIVACIÓN ACUED. R. ABASTECE CERESO/EL HONGO/Y EL POBLADO VECINO
TECATE	TECATE	LAS AURAS O NOPALERA	FILTRACIÓN DIRECTA	175.0	137.7	BUENAS CONDICIONES
TIJUANA	TIJUANA	EL FLORIDO	FILTRACIÓN DIRECTA	4,000.0	2,477.5	SE AMPLIA A 5,300 L/S
TIJUANA	TIJUANA	MONTE LOS OLIVOS	REMOCIÓN DE FIERRO-MANGANESO	130.0	80.1	BUENAS CONDICIONES
TIJUANA	TIJUANA	PRESA RODRÍGUEZ	CLARIFICACIÓN CONVENCIONAL	600.0	38.7	OPERA CUANDO LA PRESA A.L. RODRÍGUEZ TIENE AGUA, BUENAS CONDICIONES
TOTAL			6	5,070.00	2,770.50	

Fuente: Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, 2008.

### 3.2.2 Acueductos

Cabe aclarar que hay más acueductos que interviene dentro de la cuenca pero para la modelación se consideraron los que se describen a continuación (ver figura 3.11):

**Acueducto Dulzura:** Este acueducto transfiere el agua que llega y se almacena en la presa Barrett a la Presa de Otay, ubicada fuera de la Cuenca del Río Tijuana. El agua que se encuentra contenida en la presa Barrett, es agua que llega del Pine Valley Creek, del Upper Cottonwood Creek y de la Presa Morena, ubicada aguas arriba sobre el cauce del Upper Cottonwood Creek<sup>16</sup>.

**Conexión de Otay:** Esta conexión fue construida en la frontera internacional con Estados Unidos en Mesa de Otay, sirve para efectuar las entregas de emergencia de aguas del Río Colorado para su uso en Tijuana, considerando los principios establecidos en el Acta Núm. 240 de la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA)<sup>17</sup>.

**Florido\_Tijuana:** Esta derivación representa el agua que es transportada de las potabilizadoras El Florido y A.L. Rodríguez, a la demanda de la ciudad de Tijuana.

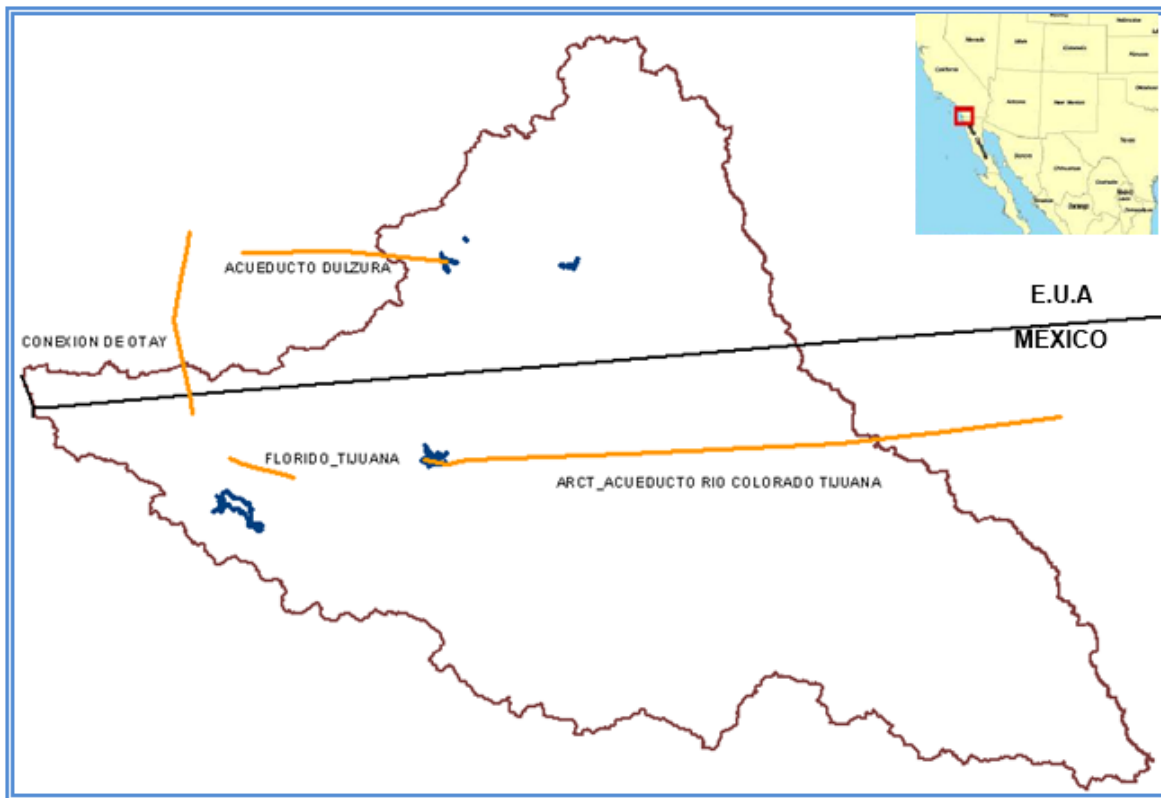
**Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT):** Este acueducto conduce agua desde el Valle de Mexicali hasta Tijuana. Vierte los volúmenes conducidos en la presa El Carrizo, que actúa como vaso regulador, desde donde se envía el agua a la potabilizadora El Florido y su capacidad es de 5.32 m<sup>3</sup>/seg<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> <http://www.sandiego.gov/water/pdf/watershedvol1.pdf>

<sup>17</sup> <http://portal.sre.gob.mx/cilanorte/pdf/310.pdf>

<sup>18</sup> Comisión Estatal del Agua de Baja California.

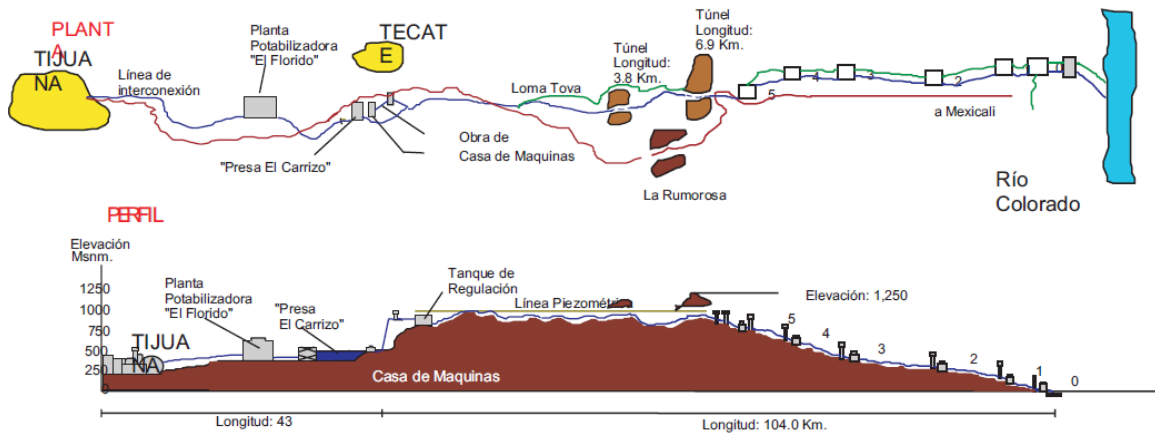
Figura 3. 11 Derivaciones en la Cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaborado con información de INEGI, [http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm) / <http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>

Este último es el más importante ya que es el proveedor principal de agua en la CRT. La configuración estructural del ARCT tiene como punto de partida la presa binacional Morelos, posteriormente transita por el Valle de Mexicali, pasando por la Rumorosa hasta llegar a la presa El Carrizo, para finalizar en la potabilizadora El Florido. En su recorrido cubre una distancia de 135.3 km. En la conducción se vence, además, en la zona de la Rumorosa, una altura de aproximadamente 1,061 metros. Esta línea de transporte de agua hasta la ciudad de Tijuana, implica, la operación de diferentes sistemas de bombeo a lo largo de la tubería, con la generación de altos costos por consumo energético, mantenimiento y operación del sistema (CESPT, 2006) (figura 3.12).

Figura 3.12 Recorrido de la línea de conducción del agua proveniente del río Colorado desde la presa Morelos (límite binacional) hasta la presa El Carrizo (Tijuana) por ARCT

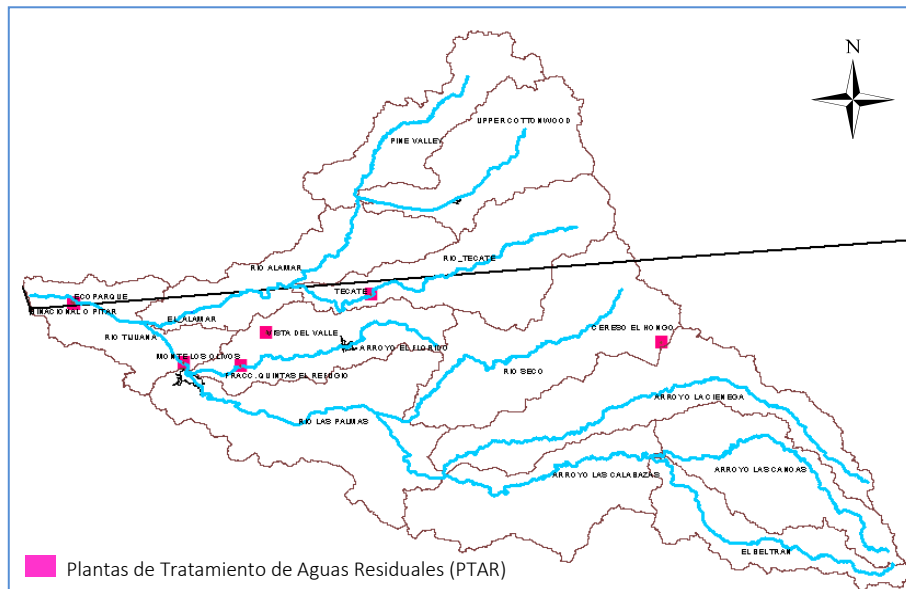


Fuente: CESPT, 2006. Historia de los Acueductos en Tijuana y Playas de Rosarito.

### 3.2.3 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

En la Cuenca del Río Tijuana se localizan siete Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (ver figura 3.13) donde cinco se ubican en el municipio de Tijuana y dos en el municipio de Tecate (ya que son estos dos municipios que abarcan toda la cuenca del lado mexicano). En la tabla 3.3 se muestra la lista de las plantas de tratamiento que se encuentran en la cuenca y sus características.

Figura 3. 13 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales



Fuente: Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, 2008.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 3. 3 Plantas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran dentro de la cuenca del río Tijuana

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Cuerpo Receptor o Reuso	Observaciones
TECATE	TECATE	CERESO EL HONGO	LODOS ACTIVADOS	18	7.4	ARROYO LAS CALABAZAS, REUSO EN EL CERESO EL HONGO	SE OBSERVA EN BUEN ESTADO.
TECATE	TECATE	TECATE	BIOLÓGICO	200	171.2	ARROYO TECATE	SE CONCLUYERON LOS TRABAJOS DE REHABILITACION, DE PRUEBAS Y ENTREGA FINAL OPERANDO A SATISFACCION. LOS FILTROS BIOLOGICOS SE CONVIRTIERON AL PROCESO DE BIOTORRE.
TIJUANA	TERRAZAS DEL VALLE	VISTA DELVALLE	LODOS ACTIVADOS	10	3.8		INICIO OPERACIÓN EN 2007
TIJUANA	TIJUANA	FRACC. EL REFUGIO	LODOS ACTIVADOS	25	13.97	ARROYO TRIBUTARIO RÍO TIJUANA	PLANTA DE FRACCIONAMIENTO PARTICULAR.
TIJUANA	TIJUANA	ECOPARQUE	FILTROS BIOLOGICOS O ROCIADORES O PERCOLADORES	5	3.7	RIEGO AREAS VERDES	LA OPERA EL COLEGIO DE LA FRONTERA NORTE (COLEF)
TIJUANA	TIJUANA	BINACIONAL O PITAR	PRIMARIO AVANZADO	1,100.00	1,053.80	OCEANO PACIFICO	POR INCUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS DE CALIFORNIA, LA CILA EU REALIZA PROPUESTAS PARA QUE EL TRATAMIENTO SECUNDARIO SEA EN MÉXICO EN CUMPLIMIENTO DE SU LEY PUBLICA Y EL ACTA 311.
TIJUANA	TIJUANA	MONTE LOS OLIVOS	LODOS ACTIVADOS	460	230	RÍO TIJUANA	SE DESCARGA EN RÍO TIJUANA, PB CILA LO VA A CAPTAR ANTES DE CRUZAR EU Y CONDUCIR HASTA EL OCÉANO
<b>TOTAL</b>			<b>7</b>	<b>1,818.00</b>	<b>1,502.20</b>		

Fuente: Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, 2008.

### 3.3 Aspectos sociales y económicos

#### 3.3.1 Población

Aunque no se conoce con exactitud el número de habitantes que hay en la cuenca, se han obtenido datos donde se puede concluir que aproximadamente 1,410,000<sup>19</sup> personas se encuentran radicando en la cuenca, cifra que anticipa se duplicará en los siguientes 20 años como resultado de una migración interna sustancial y el crecimiento natural (Wright y Vela, 2005).

La población de la cuenca se encuentra sumamente concentrada en la porción occidental en las ciudades de Tijuana y Tecate, en las comunidades mexicanas de San Luís y Terrazas del Valle, como también en partes de las comunidades de San Diego que incluyen a Imperial Beach, San Ysidro y Otay Mesa (ver figura 3.14). Del total de viviendas registradas en el Municipio de Tijuana en el censo de 2000 un 98.9% correspondió a la Ciudad de Tijuana<sup>20</sup>. La Ciudad de Tecate contó con el 67.0% de las

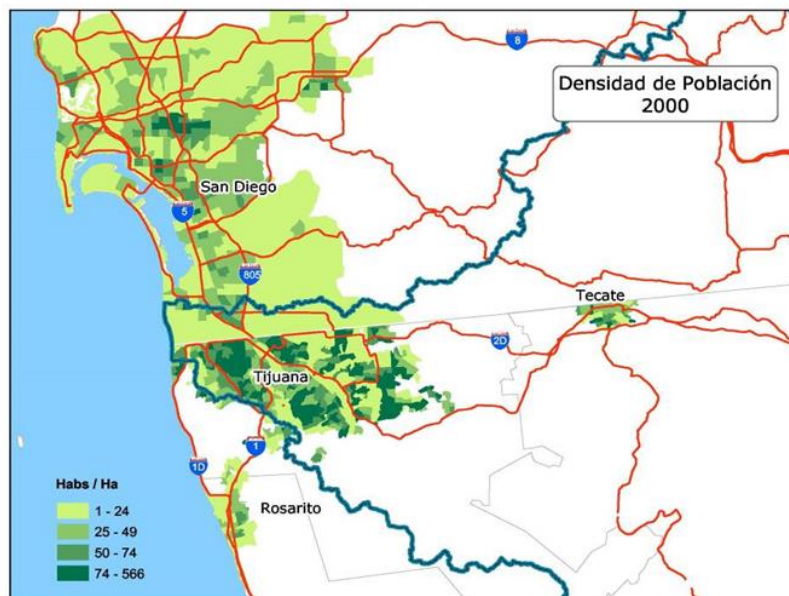
<sup>19</sup>Basado en censo general de población y vivienda 2000. INEGI

<sup>20</sup> www.inegi.gob.mx

viviendas del municipio y la cifra para Playas de Rosarito fue de 77.6%. En contraste, el promedio de la Ciudad de San Diego fue de 52.7% del total de viviendas del condado en el censo de 2000.<sup>21</sup>

En México, grupos poblacionales más pequeños se encuentran hacia el este en las comunidades Nueva Colonia Hindú, Valle de Las Palmas, Carmen Serdán, Vallecitos, Santa Verónica, Nejí y El Hongo. En el Condado de San Diego, grupos poblacionales más pequeños se encuentran en Potrero, Campo y Pine Valley. Por lo general, estas comunidades más pequeñas se ubican en respuesta a la disponibilidad de recursos de agua, tanto superficial como subterránea, que se necesitan para sostener los usos residenciales y agrícolas (Wright y Vela, 2005).

Figura 3. 14 Densidad poblacional en la Cuenca del Río Tijuana.



Fuente: Tijuana River Watershed Atlas. Department of Geography, San Diego State University and Colegio de la frontera norte.

### 3.3.2 Economía

El crecimiento económico dentro de la cuenca en los últimos 20 años se ha debido principalmente a la Industria maquiladora o plantas de ensamble. En el 2004 en Tijuana se ubican 571 maquiladoras que empleaban alrededor de 150, 000 personas y en Tecate se contaban con 106 maquiladoras empleando cerca de 9,400 personas (INEGI 2004).

Otro factor es que alrededor del 7% de la fuerza laboral de Tijuana, o unas 50,000 personas, trabaja en el otro lado de la frontera, en San Diego, y muchos consumidores de Tijuana regularmente compran “al otro lado”, apoyando al sector de venta en zonas como San Ysidro, Bonita y Chula Vista (SDSU, 2005).

<sup>21</sup> [www.census.gov/census2000/states/ca.htm](http://www.census.gov/census2000/states/ca.htm)

Los vínculos económicos y sociales entre Tijuana y San Diego pueden verificarse en la intensa actividad de los puertos de entrada en la cuenca, que son San Ysidro-Puerta México, Otay Mesa-Mesa de Otay, Tecate-Tecate, además de un nuevo cruce en la parte este de Otay Mesa, hoy en construcción. En 2008, estos puertos de entrada registraban el paso de más de 46 millones de pasajeros y peatones (SDSU, 2005).

A pesar de los vínculos económicos a través de la frontera, San Diego y Tijuana tienen niveles muy diferentes de desarrollo. San Diego presenta una economía dinámica basada en los gastos militares, el turismo, la biotecnología, la industria de software y electrónica, así como los servicios financieros. A pesar de que Tijuana es una de las regiones más prósperas de México, los contrastes económicos con San Diego son sorprendentes. Dependiendo del tipo de cambio peso-dólar, la economía regional de San Diego es aproximadamente 15 veces mayor que la de Tijuana y los salarios mínimos son cerca de diez veces mayores en San Diego. No obstante el dinámico crecimiento económico de la cuenca, especialmente durante las últimas décadas del siglo XX, la distribución del ingreso se ha vuelto más desigual. Los beneficios del Tratado de Libre Comercio y la expansión económica se han acumulado en gran medida en los grupos de ingresos medios y altos, mientras que el número de personas en situación de pobreza ha crecido. Esto implica que la participación efectiva de estos grupos cívicos en San Diego y Tijuana sea difícil (SDSU, 2005).



## **CAPÍTULO 4 . METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TIJUANA EN WEAP**

La metodología para la construcción del modelo de simulación de la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP, se desarrolló en dos partes, la primera fue en el procesamiento de datos necesarios previos antes de la elaboración del modelo como son: la delimitación de la cuenca y sus subcuencas; variación mensual del consumo de agua en los diferentes usos; cálculo de los escurrimientos naturales y flujos de cabecera. La segunda parte se llevó a cabo la construcción del modelo de la cuenca en la plataforma WEAP. A continuación se explica cada una de estas partes.

### **4.1 Preprocesamiento de datos previo a la construcción del modelo de la Cuenca del Río Tijuana**

#### **4.1.1 Delimitación de la cuenca y subcuencas del río Tijuana**

Como primer paso para la elaboración del modelo de simulación de la Cuenca del Río Tijuana para la gestión de sus recursos hídricos, es tener bien definida el área de estudio, para ello es necesario la delimitación de la cuenca así como sus subcuencas; para realizar dicha tarea se procesó el Modelo Digital de Elevación (MDE) empleando la metodología ArcHydro<sup>22</sup> y las herramientas de la extensión del mismo nombre del software ArcGis (Maidment, 2002). A partir del procesamiento del MDE se obtuvieron las corrientes principales y el parteaguas de la cuenca.

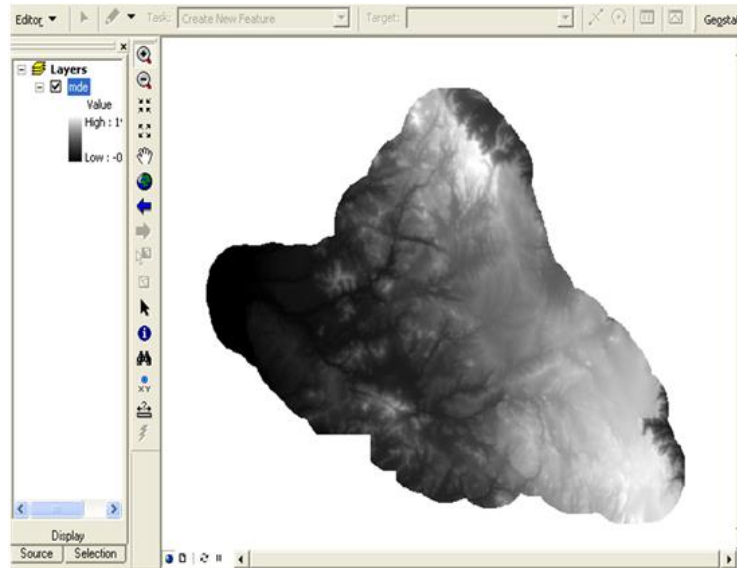
A continuación se describen los pasos a seguir para llevar a cabo la delimitación de la cuenca y subcuencas empleando la metodología ArcHydro.

Como primer elemento es necesario contar con el modelo digital de elevación (formato raster) el cual es una aproximación de la superficie de la tierra y es la herramienta de trabajo del ArcHydro (figura 4.1).

---

<sup>22</sup> El ArcHydro es un modelo de datos geoespacial y temporal para las aplicaciones de recursos de agua que opera en ArcGIS y prepara los datos para simulaciones hidrológicas.

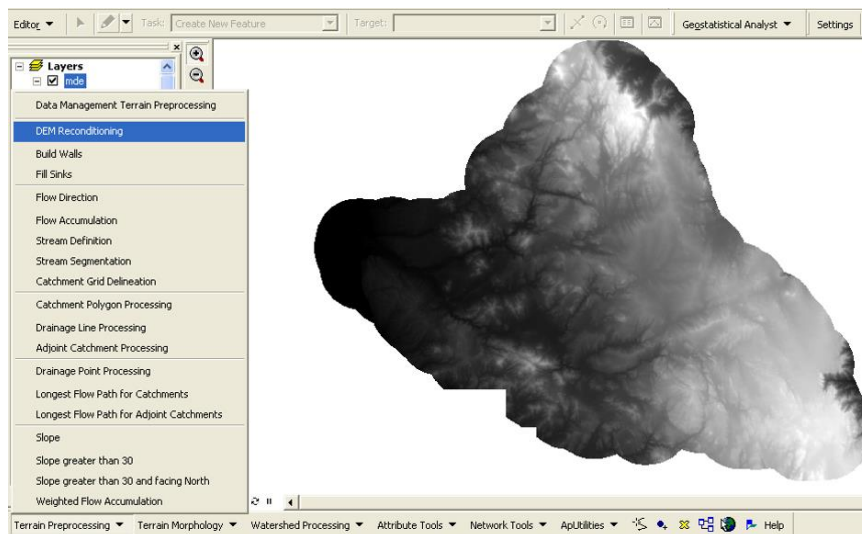
Figura 4. 1 MDE de la Cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaboración propia.

Se selecciona del Terrain Preprocessing (Preprocesamiento del Terreno) de la barra de herramientas de ArcHydro dentro de ArcMap, la opción “DEM Reconditioning” el cual genera un raster llamado “AgreeDEM” el cual representa el “quemado” de las líneas de corriente sobre el MDE (figura 4.2).

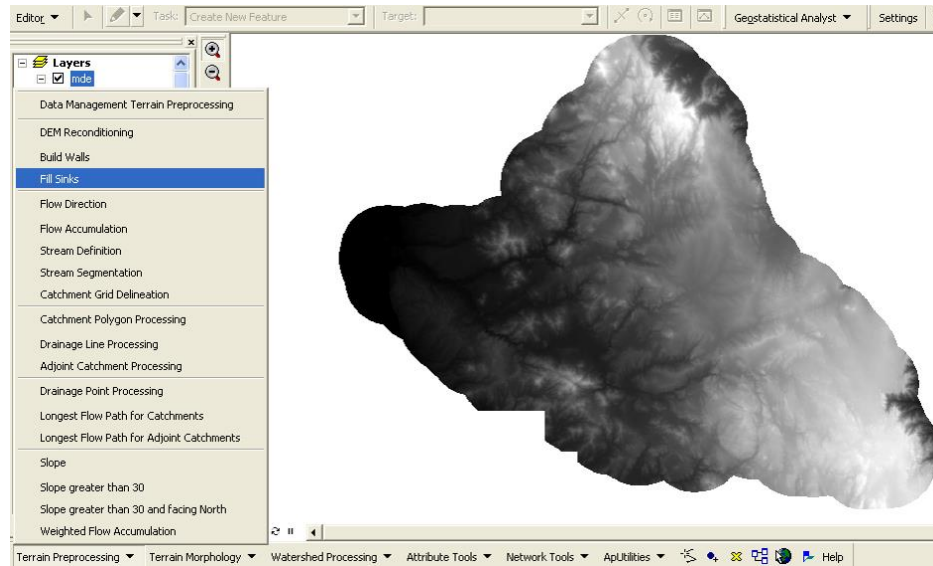
Figura 4. 2 Quemado de las líneas de corriente



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente del mismo menú se seleccionó la opción “Fill Sinks”, este proceso crea un archivo de tipo raster llamado “fil”, que representa el “llenado de huecos” en el grid, es decir, si celdas de mayor elevación rodean a una celda, el agua es atrapada en esa celda y no puede fluir, esta función modifica el valor de la elevación para eliminar este problema (figura 4.3).

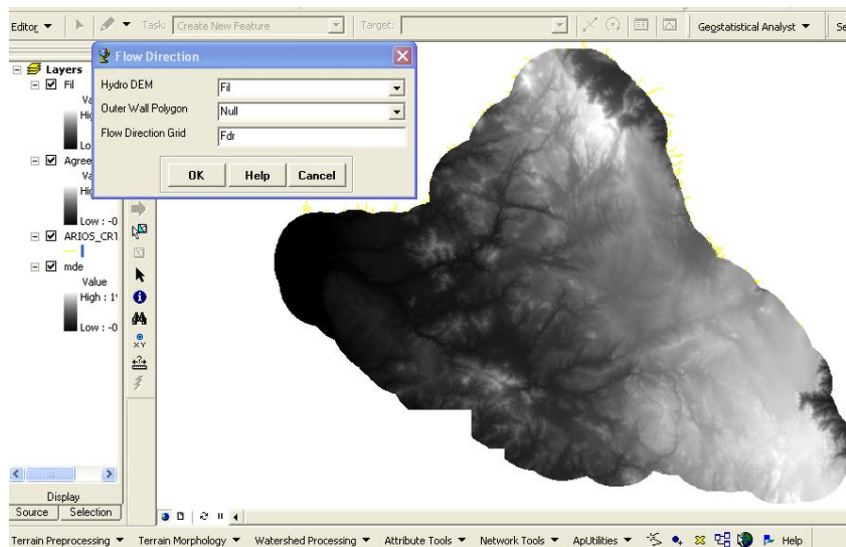
Figura 4. 3 Llenado de huecos



Fuente: Elaboración propia.

Después del menú “Terrain PreProcessing” se selecciona la opción “Flow Direction” en donde dicho proceso calcula la dirección de flujo para una malla (grid) dada. Los valores en las celdas de la malla de dirección de flujo indican la dirección del descenso máximo para cada celda (figura 4.4).

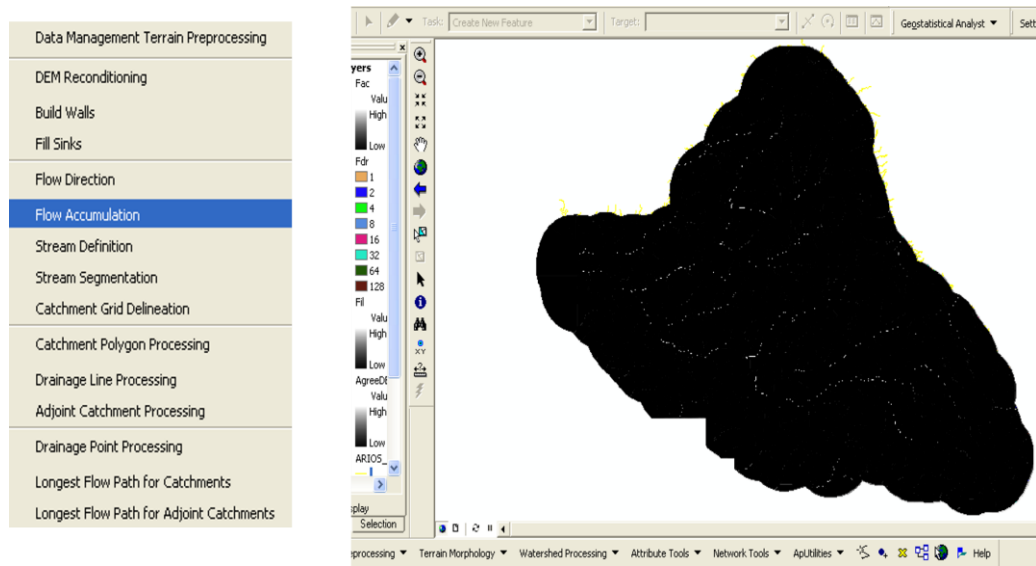
Figura 4. 4 Dirección de flujo



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se aplica la opción de “Flow Acumulación”, la cual es la función que calcula la malla de acumulación de flujo. Esta malla contiene el número acumulado de celdas localizadas aguas arriba de la celda, para cada celda de la malla de entrada (figura 4.5).

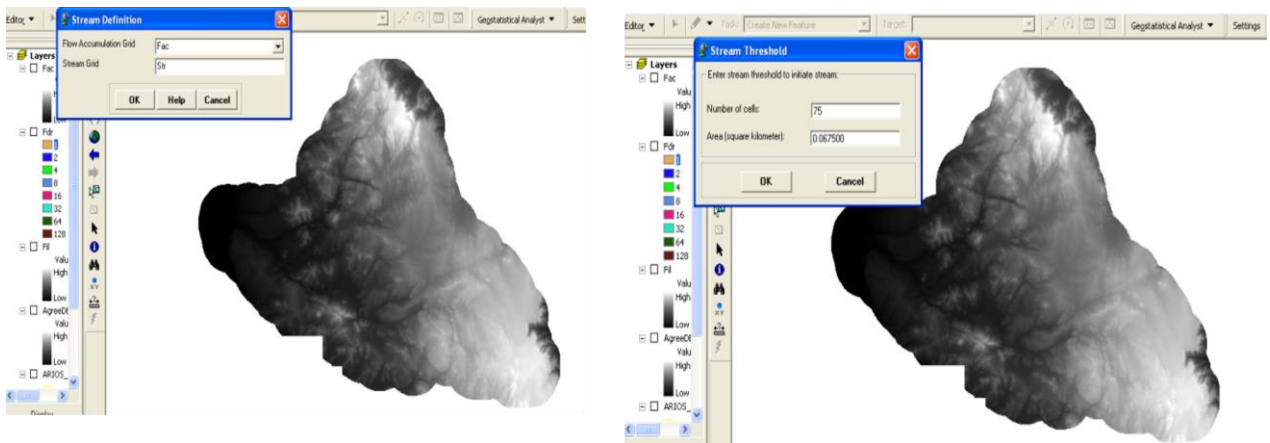
Figura 4. 5 Acumulación de flujo



Fuente: Elaboración propia.

Después le sigue la opción de “Stream Definition”, la cual calcula una malla de corrientes que contienen un valor de “1” para todas las celdas en la malla de acumulación de flujo que tienen un valor mayor que un valor umbral dado (figura 4.6).

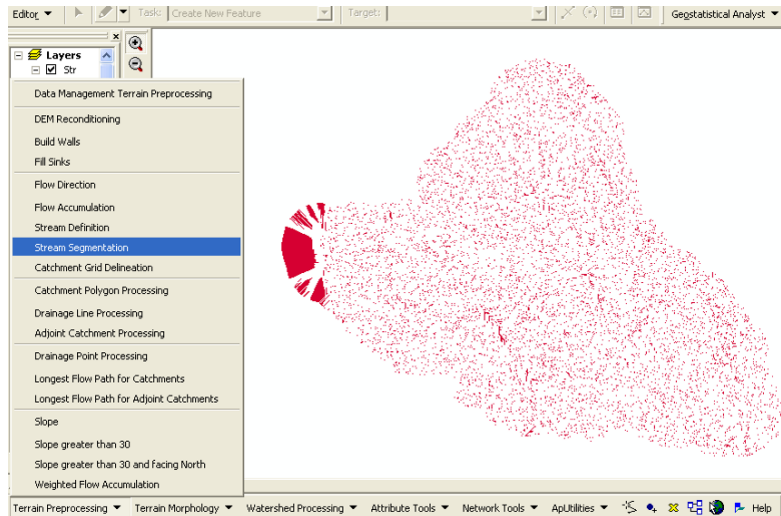
Figura 4. 6 Definición de corriente



Fuente: Elaboración propia.

La opción “Stream Segmentation” crea una malla de segmentos de corrientes que tienen una identificación única. Un segmento puede ser un segmento inicial o puede ser un segmento entre dos uniones de segmentos. Todas las celdas de un segmento particular tiene el mismo código que es específico para ese segmento (figura 4.7).

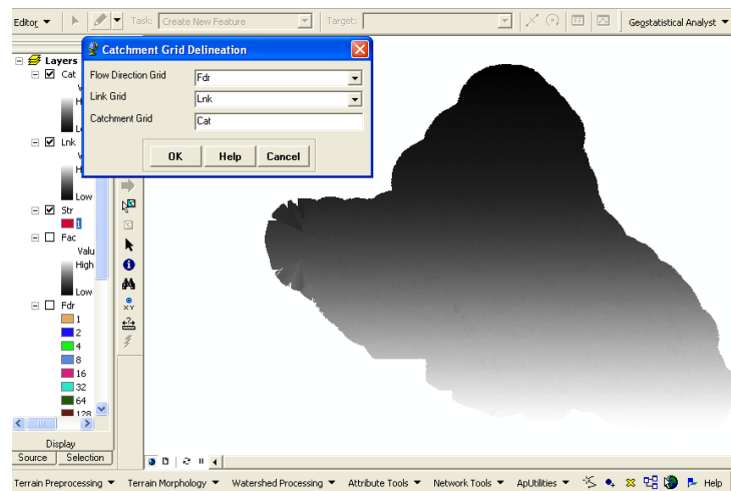
Figura 4. 7 Segmentación de corriente



Fuente: Elaboración propia.

La opción “Catchment Grid Delineation” crea una malla en la cual cada celda tiene un valor (código de malla) que indica a cual subcuenca pertenece la celda. El valor corresponde al valor que tiene el segmento de corriente que drena tal área, y que está definido en la malla de ligas de segmentos de corrientes (figura 4.8).

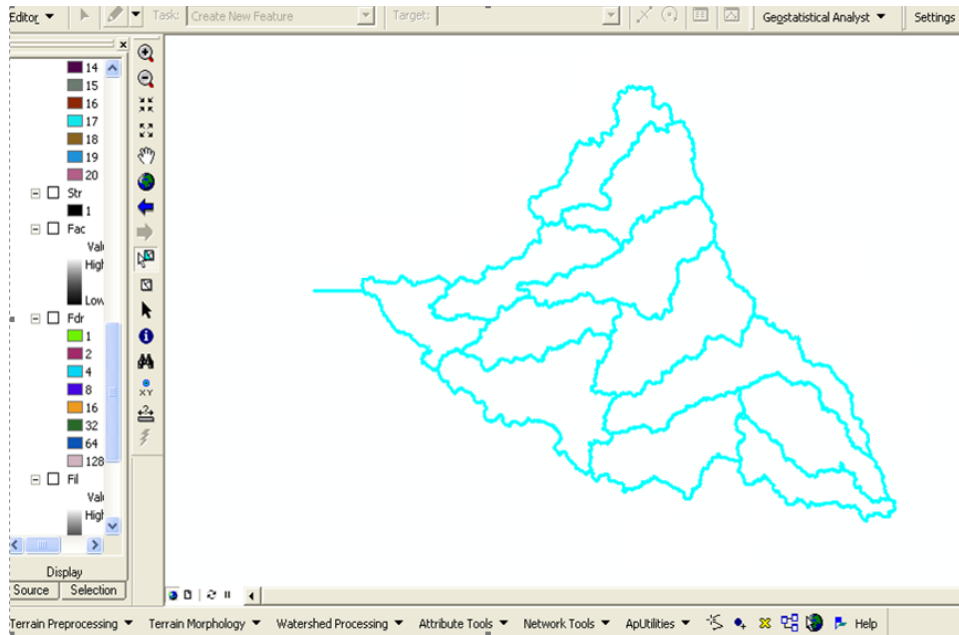
Figura 4. 8 Delineación de rejilla de captación



Fuente: Elaboración propia.

La función “Catchment Polygon Processing” convierte la malla de subcuencas en una feature de polígonos obteniendo con ello 12 subcuencas (figura 4.9).

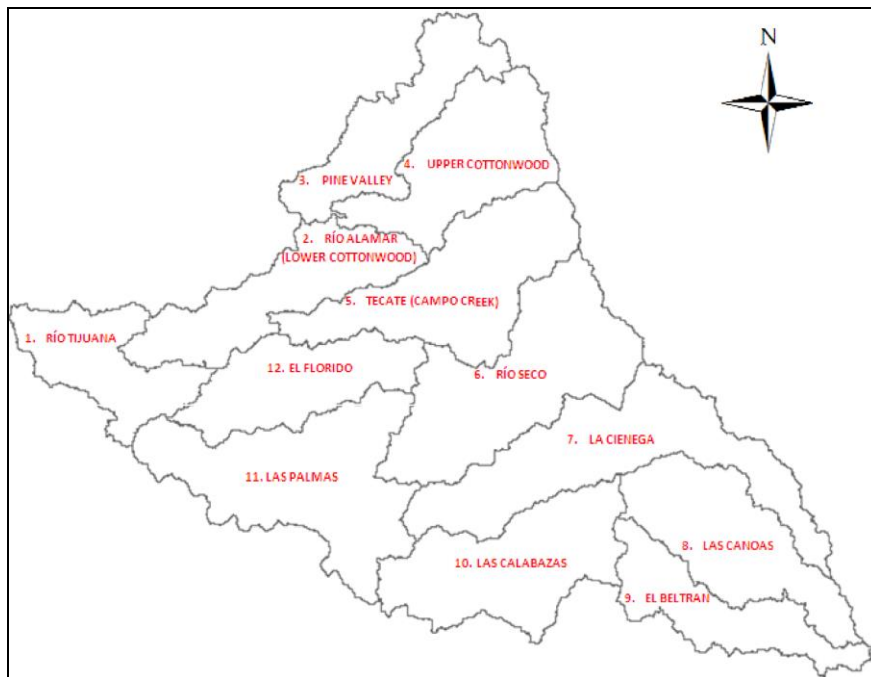
Figura 4. 9 Procesamiento de polígono de captación



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se obtiene la delimitación de la cuenca con un área de 4,444.61 Km<sup>2</sup> y de las subcuencas, que en este caso se generaron doce subcuencas. En la figura 4.10 se muestra la delimitación de la cuenca y sus subcuencas; y en la tabla 4.1 se muestra las áreas de cada una.

Figura 4. 10 Subcuencas que integran la cuenca del río Tijuana



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 1 Áreas de las subcuencas que integran la cuenca del Río Tijuana

SUBCUENCAS	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
SUBC_1 (RÍO TIJUANA)	244.98
SUBC_2 (LOWER COTTONWOOD/RÍO ALAMAR)	321.63
SUBC_3 (PINE VALLEY)	279.41
SUBC_4 (UPPER COTTONWOOD)	353.92
SUBC_5 (CAMPO CREEK/RÍO TECATE)	431.37
SUBC_6 (RÍO SECO)	502.31
SUBC_7 (LA CIENEGA)	507.92
SUBC_8 (LAS CANOAS)	358.39
SUBC_9 (EL BELTRAN)	241.24
SUBC_10 (LAS CALABAZAS)	398.57
SUBC_11 (LAS PALMAS)	521.21
SUBC_12 (EL FLORIDO)	283.66
<b>TOTAL</b>	<b>4,444.61</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Estimación del escurrimiento natural en la Cuenca del Río Tijuana

En esta sección se presenta el procedimiento realizado para llevar a cabo la estimación de escurrimientos superficiales en la Cuenca del Río Tijuana, esto debido a que no se contaba con suficientes estaciones hidrométricas, ni suficientes datos en dichas estaciones y mucho menos con escurrimientos naturales o restituidos para dicha zona.

La estimación de los escurrimientos consideró las siguientes características particulares de la cuenca:

- a) Los principales usos de agua superficial que existen en la cuenca, según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA, 2008), son público-urbano, domestico, servicios, pecuario y agrícola; siendo el público-urbano quien consume el 90% del agua superficial.
- b) En la cuenca existen únicamente dos grandes núcleos urbanos que son la ciudad de Tecate y la ciudad de Tijuana (incluyendo la zona conurbada a ésta que se localizan dentro del municipio de Rosarito), siendo esta última la mayor y encontrándose a la desembocadura de la cuenca, el resto de la cuenca se encuentra prácticamente deshabitada.
- c) El agua superficial para estos dos núcleos urbanos proviene principalmente del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) el cual emplea la presa El Carrizo (EC) para almacenamiento, control y distribución. Los almacenamientos de la presa Abelardo L. Rodríguez (ALR) únicamente son un complemento significativo en años húmedos.
- d) La agricultura en la zona es principalmente de temporal.
- e) El agua para procesos industriales proviene de agua subterránea.

- f) Únicamente se cuenta con información de escurrimientos a través de los registros de funcionamiento de vaso de las presas (ALR y EC) y en dos estaciones hidrométricas, la primera localizada sobre el río Alamar (1034 El Alamar) próxima a su confluencia con el Río Tijuana y la otra a la desembocadura del Río Tijuana (1028 Cerca de Néstor). La información es porosa con grandes periodos sin dato en los cuatro registros mencionados.
- g) Tres de los factores fundamentales que controlan el proceso lluvia-escurrimiento en una cuenca son ampliamente extendidos o distribuidos en la cuenca. estos factores son: un clima semiárido (xérico), una vegetación escasa dominada por matorrales y una geomorfología de relieves suaves a moderados compuesta por suelos arcillosos con gran tendencia a expandirse y contraerse. Lo anterior establece condiciones de escurrimiento bastante homogéneas en la cuenca.
- h) El agua captada por las presas La Morena y Barrett en los Estados Unidos se trasvasa y envía por el Acueducto Dulzura a la cuenca de Otay.
- i) Existen suficientes estaciones climatológicas distribuidas dentro y fuera de la cuenca que por su densidad permiten establecer un registro de precipitación distribuido espacialmente y continuo a partir de 1969 hasta el año 2006.

El escurrimiento superficial suele referirse al volumen de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y la infiltración. El escurrimiento superficial o directo es función de la intensidad de la precipitación y de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo (Aparicio, 2001).

Para llevar a cabo la estimación superficial del escurrimiento en la CRT se consideró la fórmula racional (Aparicio, 2001):

$$Em = A * Pm * Ce \quad (4.1)$$

donde:

Em = Escurrimiento medio

A = Área de la unidad hidrológica sobre la que se desea determinar el escurrimiento

Pm = Precipitación media sobre el área de la unidad hidrológica

Ce = Coeficiente de escurrimiento actuando en dicha unidad y que depende de la humedad antecedente.



La fórmula 4.1 es un modelo simplificado el cual estima el volumen de lluvia a través de la multiplicación del área de aportación por la altura media de la precipitación; y considera las características generales de la cuenca mediante el coeficiente de escurrimiento, esto es, el coeficiente de escurrimiento depende de la cobertura vegetal, del clima, de la geomorfología y de los suelos que componen la cuenca.

Ahora bien, para considerar la distribución temporal de la lluvia y de las condiciones climáticas, el coeficiente de escurrimiento no debe ser constante o único sino debe poder variar dentro de un rango posible de valores que tenga implícito la humedad antecedente.

La distribución espacial de la lluvia, de las condiciones climáticas y de las características de la cuenca, igualmente hace variar el coeficiente de escurrimiento, esto es, se debe considerar varias unidades de escurrimiento distribuidas espacialmente en la cuenca. Una unidad de escurrimiento es un área con condiciones de escurrimiento relativamente homogéneas. La distribución espacial se maneja subdividiendo la cuenca en subcuencas y unidades de escurrimiento.

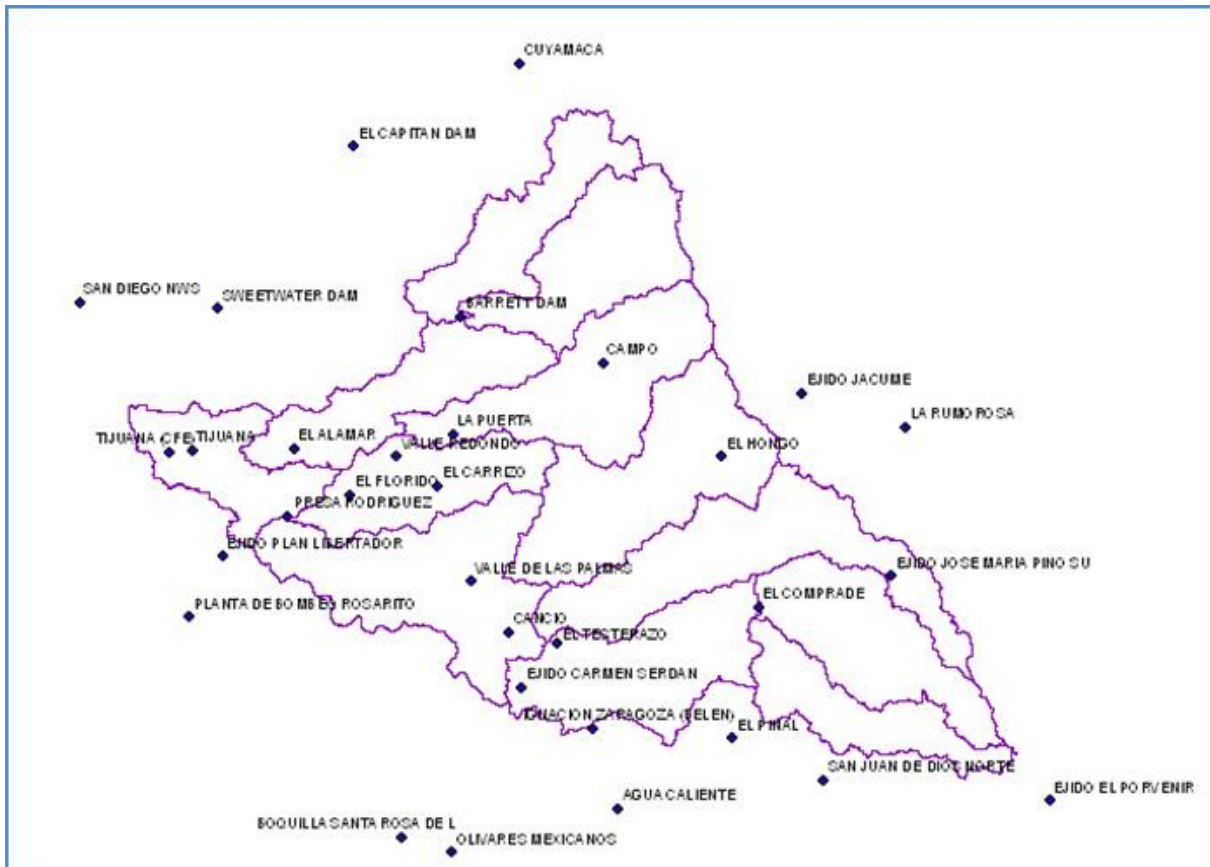
### **4.1.2.1 Área de la cuenca**

Como se muestra en la fórmula 4.1 el primer dato requerido para calcular el escurrimiento medio es saber el área de la cuenca o subcuenca sobre la cual está lloviendo, por tal motivo en la sección 4.1.1 de este capítulo ya se realizó dicha tarea y las áreas obtenidas son la que se muestran en la tabla 4.1.

### **4.1.2.2 Precipitación media**

El segundo dato requerido en la fórmula 4.1 es la precipitación media, para ello se consideraron las estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca (a una distancia no mayor de 10 Km<sup>2</sup>), de las cuales se encontraron 26 estaciones del lado Mexicano y 6 del lado de Estados Unidos (figura 4.11 y tabla 4.2).

Figura 4. 11 Ubicación de las estaciones climatológicas para el cálculo de mallas de precipitación



Fuente: <sup>23</sup>ERIC III-2007 (México) y CA. GOV Department of Water Resources. (EUA).

Tabla 4. 2 Estaciones climatológicas que se encuentran dentro y cerca de la cuenca del Río Tijuana

No.	CLAVE	NOMBRE	PAÍS	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
1	2001	AGUA CALIENTE	MÉXICO	410	32.100	-116.4500
2	2004	IGNACION ZARAGOZA (BELEN)	MÉXICO	555	32.195	-116.4860
3	2005	BOQUILLA SANTA ROSA DE L	MÉXICO	40	32.067	-116.7500
4	2017	PLANTA DE BOMBEO ROSARITO	MÉXICO	22	32.328	-117.0470
5	2019	EL COMPRADO	MÉXICO	1162	32.338	-116.2540
6	2021	EL PINAL	MÉXICO	1350	32.183	-116.2920
7	2024	EL TESTERAZO	MÉXICO	330	32.296	-116.5330
8	2030	LA PUERTA	MÉXICO	480	32.544	-116.6780
9	2031	LA RUMOROSA	MÉXICO	1232	32.549	-116.0460
10	2036	OLIVARES MEXICANOS	MÉXICO	315	32.049	-116.6810
11	2038	PRESA RODRIGUEZ	MÉXICO	120	32.447	-116.9080
12	2049	SAN JUAN DE DIOS NORTE	MÉXICO	1280	32.132	-116.1650

<sup>23</sup>ERIC III-2007 (Extractor Rápido de Información Climatológica) facilita la extracción de la información contenida en la base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

No.	CLAVE	NOMBRE	PAÍS	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
13	2068	TIJUANA	MÉXICO	55	32.525	-117.0420
14	2069	VALLE DE LAS PALMAS	MÉXICO	280	32.370	-116.6540
15	2070	VALLE REDONDO	MÉXICO	242	32.518	-116.7560
16	2073	TIJUANA (CFE)	MÉXICO	150	32.524	-117.0740
17	2079	EL ALAMAR	MÉXICO	65	32.528	-116.9000
18	2086	EJIDO JACUME	MÉXICO	888	32.591	-116.1920
19	2114	EJIDO CARMEN SERDAN	MÉXICO	455	32.244	-116.5840
20	2119	CANCIO	MÉXICO	450	32.310	-116.6000
21	2121	EL HONGO	MÉXICO	960	32.516	-116.3030
22	2124	EL CARRIZO	MÉXICO	495	32.483	-116.7000
23	2143	EJIDO PLAN LIBERTADOR	MÉXICO	140	32.400	-117.0000
24	2152	EJIDO JOSE MARIA PINO SU	MÉXICO	1355	32.373	-116.0680
25	2156	EL FLORIDO	MÉXICO	250	32.472	-116.8210
26	2164	EJIDO EL PORVENIR	MÉXICO	360	32.106	-115.8520
27	Z11051400	BARRETT DAM	EUA	495	32.683	-116.6670
28	Z11142400	CAMPO	EUA	796	32.628	-116.4690
29	Z09822601	SWEETWATER DAM	EUA	76	32.693	-117.0080
30	Z08773900	SAN DIEGO NWS	EUA	0	32.700	-117.2000
31	Z07270900	EL CAPITAN DAM	EUA	183	32.885	-116.8170
32	Z07223900	CUYAMACA	EUA	1417	32.983	-116.5830

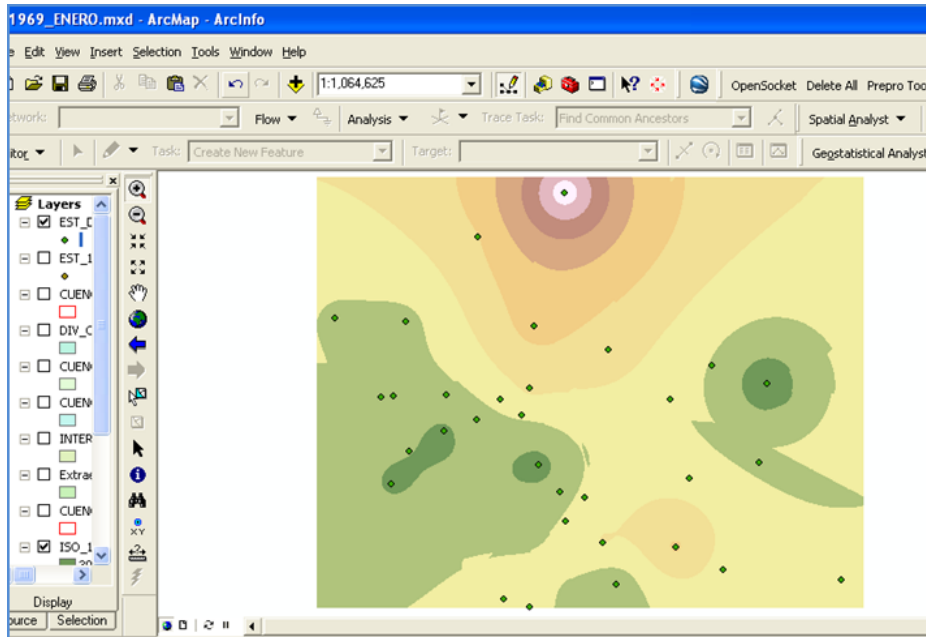
Fuente: ERIC III-2007 (México) y CA. GOV Department of Water Resources. (EUA).

La precipitación media se obtuvo sobreponiendo una malla de precipitación de tamaño de celda constante, generada previamente a partir de las precipitaciones reportadas en las estaciones climatológicas, con el área de cálculo deseada, mediante un simple promedio de los valores de lluvia, para las celdas ubicadas al interior del área.

### ***Elaboración de las mallas de precipitación***

Teniendo la localización de las estaciones climatológicas con sus respectivas series de precipitación, se procedió a crear mallas de lluvias mediante un proceso de interpolación con el método de Kriging para preservar la distribución espacial de la lluvia, esto se llevó a cabo mediante la extensión Spatial Analyst (McCoy & Johnston, 2002) del sistema ArcGIS (ver figura 4.12).

Figura 4. 12 Malla de precipitación en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia.

El método de Kriging está basado en modelos geoestadísticos que incluyen la autocorrelación espacial, esto es, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Debido a esto, estas técnicas tienen no sólo la capacidad de generar una superficie de predicción de lluvia en este caso, sino también pueden ofrecer una cierta medida de la certeza o de la exactitud de las predicciones (McCoy & Johnston, 2002).

Esta medida de las relaciones estadística entre los puntos le da un mayor soporte con referente a otros interpoladores como son el denominado “Pesado por el inverso de la distancia” “La media ponderada por la inversa de la distancia”, también llamado IDW (por sus siglas en inglés), y las curvas Spline que se basan únicamente en los valores medidos alrededor del punto a determinar a través de una función matemática determinística (McCoy & Johnston, 2002).

Kriging es similar al IDW en el sentido de que pesa los valores medidos en las estaciones, alrededor de una ubicación no medida, para derivar una predicción. La formulación matemática del modelo de Kriging al igual que en el IDW es un promedio pesado, como se muestra en la siguiente ecuación (McCoy & Johnston, 2002):

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (4.2)$$

donde:

$s_0$  = la posición de la predicción o punto a interpolación.

$Z(s_0)$  = el valor de la predicción o interpolación.

$s_i$  = la posición de la  $i$ -ésima estación.

$Z(s_i)$  = el valor medido en la  $i$ -ésima estación.

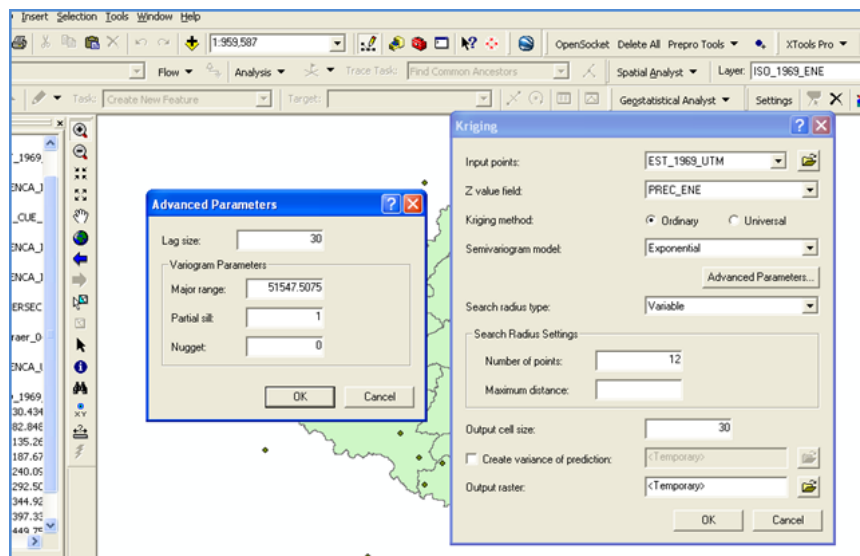
$\lambda_i$  = el peso para el valor medido en la  $i$ -ésima estación.

$N$  = el número de estaciones o valores medidos.

Sin embargo, en IDW, el peso,  $\lambda_i$ , depende únicamente de la distancia entre el punto de predicción y la ubicación de la estación. Mientras que en Kriging, las ponderaciones se basan no sólo en esta distancia, sino también en el arreglo espacial completo que se establece por la disposición espacial de las estaciones y sus valores medidos. Para utilizar el arreglo espacial en los pesos, la autocorrelación espacial debe ser cuantificada. Así, en el método de Kriging Ordinario, el peso,  $\lambda_i$ , es determinado a través de un modelo estadístico ajustado que depende de los valores medidos en las estaciones, la distancia a la posición de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos en torno a la ubicación de la predicción. Al modelo estadístico que se ajusta para fijar las reglas de dependencia entre las estaciones y sus medidas se le conoce como semivariograma pues establece la autocorrelación espacial o semivarianza que puede existir entre dos medidas separadas una determinada distancia,  $h$  (McCoy & Johnston, 2002).

La figura 4.13 muestra los parámetros que requiere el Método Kriging para generar las mallas de precipitación en ArcGIS los cuales son los siguientes (McCoy & Johnston, 2002):

Figura 4. 13 Método de Kriging en ArcGIS

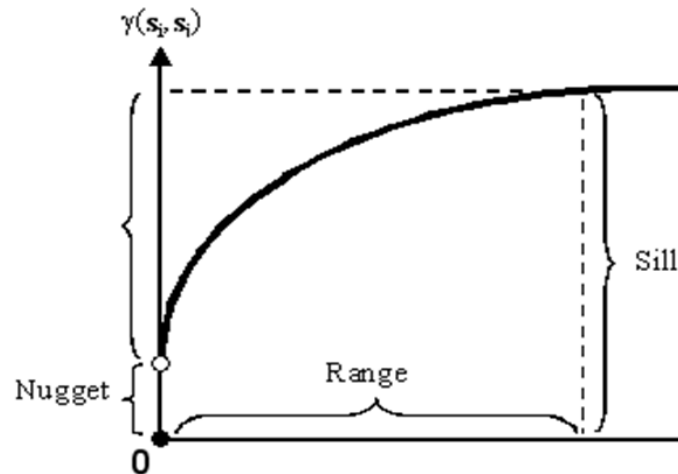


Fuente: Elaboración propia.

- **Puntos de entrada:** Estos son los puntos que establecen la posición espacial de las estaciones climatológicas (cobertura de estaciones).

- **Campo de Valores Z:** Campo de la tabla de la cobertura de estaciones, en el que se encuentran almacenados los valores de las precipitaciones registradas en cada una de las estaciones climatológicas.
- **Método Kriging:** Se seleccionó el método Ordinario debido a que es el método más utilizado en la literatura para generar superficies de precipitación.
- **Modelo de Semivariograma:** Se seleccionó el modelo “Exponencial”, debido a que éste se aplica cuando la autocorrelación espacial disminuye exponencialmente con el aumento de la distancia y desaparece completamente sólo a una distancia infinita.
- **Parametros Avanzados:** Los parámetros avanzados son los parámetros de forma del semivariograma (figura 4.13). Estos valores pueden ser proporcionados o tomar los establecidos por defecto en ArcGis. Los establecidos por defecto tienen problemas para mallas finas, como las generadas, por lo que tuvieron que ser proporcionados.
  - **Tamaño del intervalo de distancia (Lag size):** Este parámetro fue establecido como la distancia de separación entre dos nodos de la malla a generar (30 m en nuestro caso).
  - **Rango mayor:** El rango mayor o simplemente rango (figura 4.13) determina la distancia a la cual prácticamente ya no existe autocorrelación espacial entre dos estaciones o mediciones del fenómeno a predecir. Para la generación de las mallas de precipitación este valor se tomó como 51,547.5075 m que es la distancia de separación promedio existente entre todas las estaciones climatológicas consideradas.
  - **Sill parcial (Partial sill):** El sill parcial no es otra cosa que el sill menos el nugget (figura 4.14) y el sill es el valor de la semivarianza (eje **y**) a la distancia establecida por el rango. Cuando el semivariograma alcanza el valor de 1, quiere decir que ya no hay autocorrelación (significa que ya no hay una relación entre las dos muestras). Comúnmente, el semivariograma se calcula para datos normalizados de la semivarianza.
  - **Nugget:** Representa el desplazamiento del eje **y** a donde inicia la curva del semivariograma (figura 4.14). Un valor de nugget igual a 0 quiere decir que dos muestras ubicadas en la misma posición están totalmente correlacionadas.

Figura 4. 14 Gráfica de una función semivariograma mostrando los parámetros que la determinan



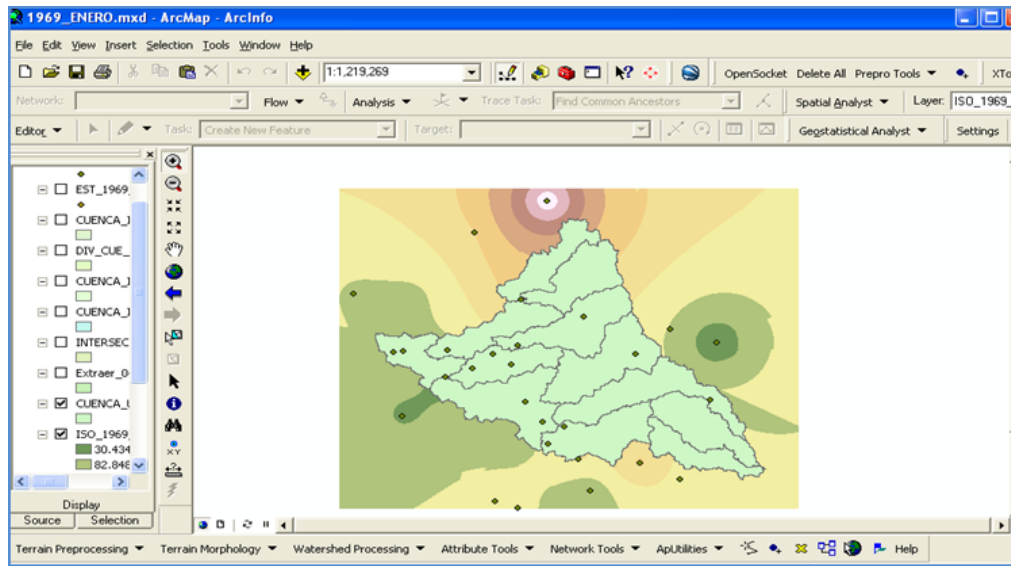
Fuente: Using ArcGIS Spatial Analyst. ESRI, USA. McCoy, H. and Johnston, K. (2002).

- **Tipo de radio de búsqueda:** el radio de búsqueda variable determina un **número de puntos (estaciones)** alrededor del punto de predicción a ser consideradas, el radio de búsqueda varía dependiendo de la densidad de estaciones, aquí se puede establecer una **distancia máxima** para evitar radios de búsqueda muy grandes.
- **Tamaño de la celda de salida:** Establece el tamaño de la celda de la malla. En este caso se estableció igual al tamaño de celda del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), esto es 30 m, para tener una sobreposición uno a uno con el MDE y con las coberturas raster generadas para la delimitación de las cuencas y las subcuencas.
- **Salida raster:** Este campo se usa para determinar el nombre de la malla de salida.

Las mallas que se generaron fue para cada mes de cada año, así que se generaron 444 mallas de lluvia que corresponden a 37 años que van desde 1969-2006. El periodo de años que se selecciono fue debido a que la mayoría de las estaciones climatológicas si contaban con información en ese periodo.

Con las mallas de precipitación se logra tener la distribución espacial de la lluvia, lo cual permite determinar la lluvia promedio de cierta área. Esto se logra sobreponiendo alguna de estas mallas a los límites de una cuenca o de un área deseada, como en nuestro caso fueron las subcuencas que integran la CRT (figura 4.15).

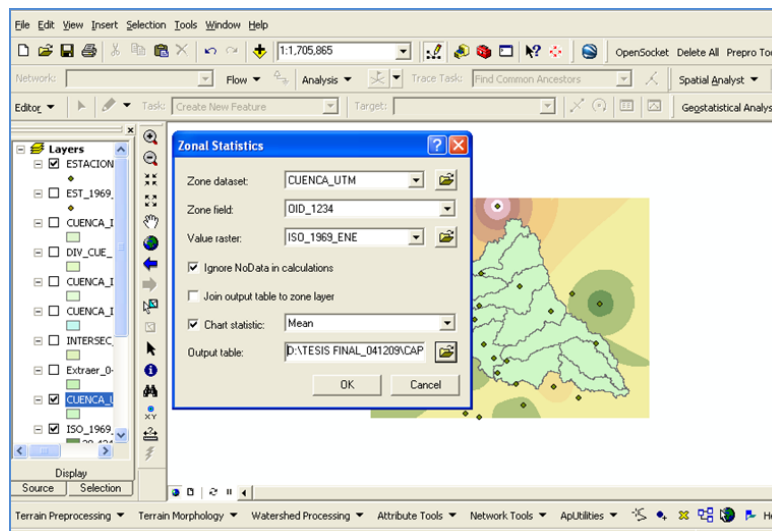
Figura 4. 15 Mallas de precipitación y subcuencas



Fuente: Elaboración propia.

En la extensión de Spatial Analyst del ArcGis se tiene la opción llamada “Zonal Statistics”, que permite delimitar un área de interés a través de un polígono dentro de una malla y obtener sus principales parámetros estadísticos para dicha área, como son en este caso la precipitación media, mínima y máxima, así como el área que le corresponde (figura 4.16), de tal modo que con esta opción se obtuvieron las precipitaciones medias de interés.

Figura 4. 16 Zonal Statistics en ArcGIS

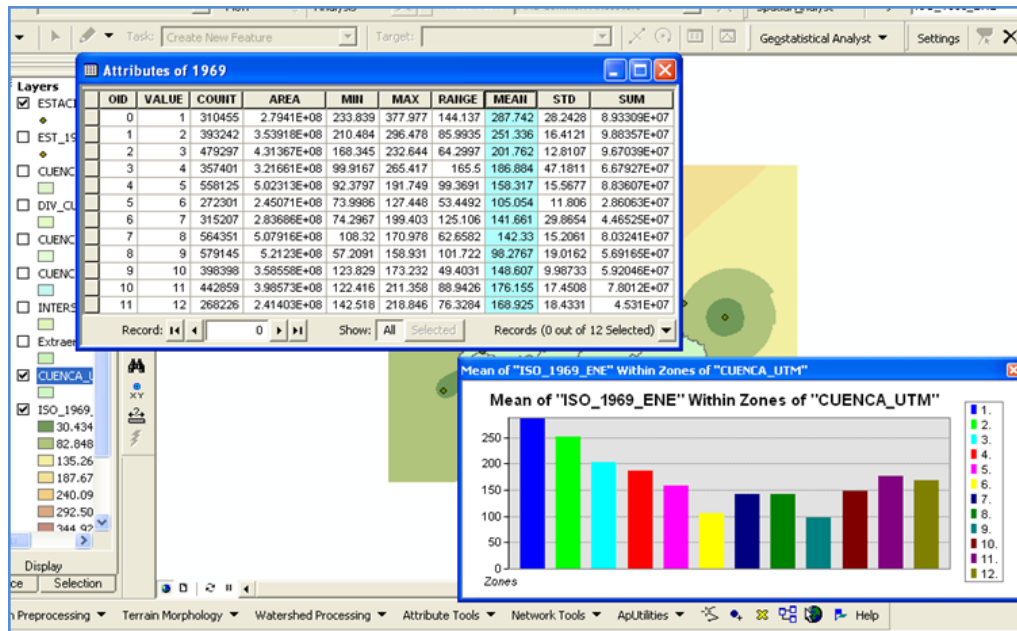


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.17 se muestran los principales parámetros estadísticos que se producen al ejecutar el “Zonal Statistics” sobre la cobertura de subcuencas para la malla del mes de enero de 1969.



Figura 4. 17 Resultados al ejecutar el comando Zonal Statistics en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia.

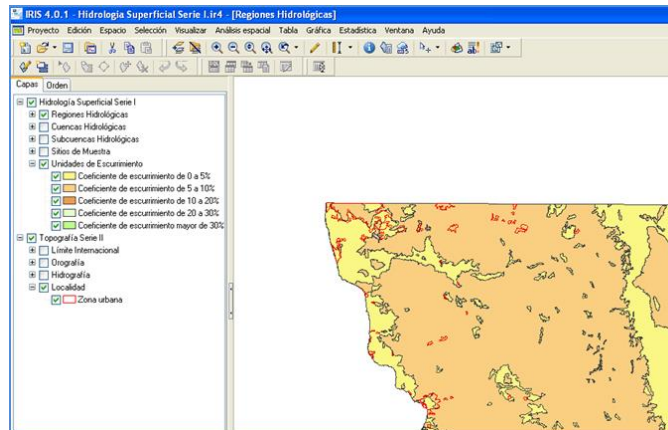
#### 4.1.2.3 Coeficientes de Escurrimientos

El tercer parámetro establecido por la fórmula 4.1, es el coeficiente de escurrimiento, el cual depende de la cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente de la zona estudiada. A partir de la distribución de esta información se pueden establecer diferentes unidades de escurrimiento que se distribuyen espacialmente en la cuenca, esto es, zonas con diferentes coeficientes de escurrimiento. Para la CRT del lado mexicano INEGI en su cartografía hidrológica tiene identificadas dos unidades de coeficientes de escurrimientos, una cuyo escurrimiento puede variar de 0 a 5% del volumen precipitado sobre ella y otra que va de 5 a 10% (figura 4.18). Para el estudio que se presenta, se estableció una tercera unidad de coeficiente de escurrimiento la cual corresponde a las zonas urbanas de Tecate y Tijuana, pues por sus dimensiones y su grado de urbanización en ellas, han modificado su coeficiente de escurrimiento natural, por lo cual se consideró que éste puede variar del 30 al 75%, según lo reportado en la literatura para zonas urbanas.

En el área de la CRT que se ubica en la zona de Estados Unidos se consideró un coeficiente de escurrimiento que va de 5 a 10%, para las subcuencas de Tecate y Río Alamar, y otro de 0 a 5% para la subcuenca de Tijuana. Las subcuencas Pine Valley y Upper Cottonwood no fueron consideradas pues sus escurrimientos son trasvasados fuera de la cuenca.

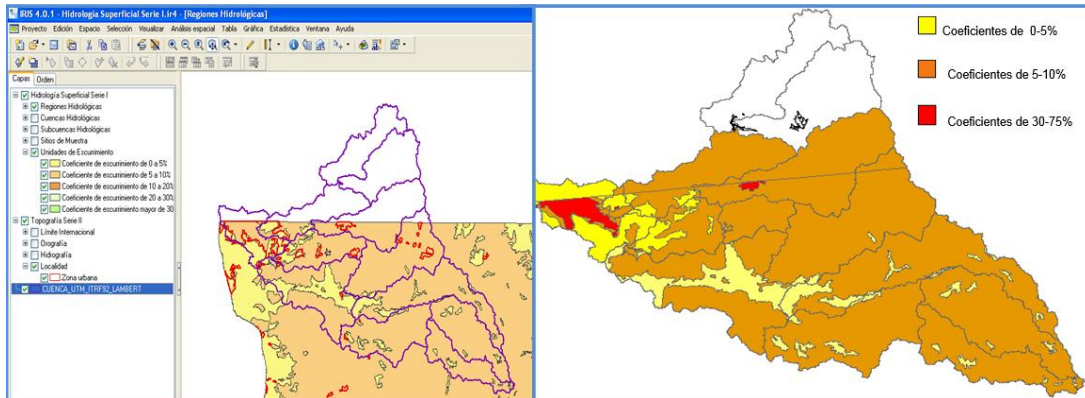
Así que en la cuenca se consideraron tres áreas que representan los tres rangos de los coeficientes de escurrimiento que se presentan en la cuenca lo cuales van de 0 a 5%, de 5 a 10% y 30 a 75%, para zonas urbanas (figura 4.19).

Figura 4. 18 Cartografía hidrológica



Fuente: Elaborado mediante el programa de IRIS versión 4.0.1 de INEGI.

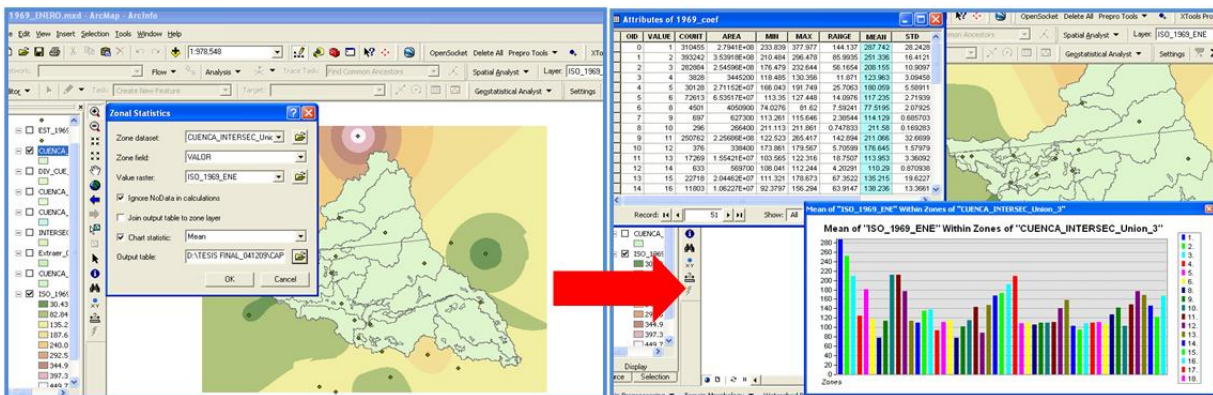
Figura 4. 19 Generación de la cobertura de unidades de escurrimiento para la cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaborado mediante el programa de IRIS versión 4.0.1 de INEGI.

Con las áreas de las diferentes unidades de los coeficientes de escurrimiento para cada subcuenca, se procedió a sacar nuevamente las precipitaciones promedio que afectan a dichas áreas; para cada mes de cada año del periodo que va de 1969 a 1998 (figura 4.20).

Figura 4. 20 Obtención de las precipitaciones promedio en cada unidad de escurrimiento de cada subcuenca

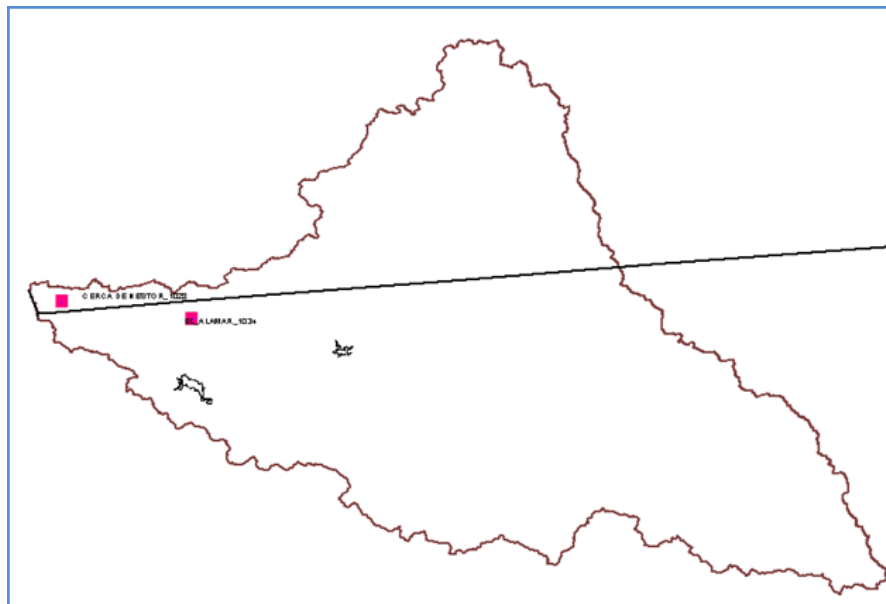


Fuente: Elaboración propia.

Debido a que se cuenta con tres rangos diferentes del coeficiente de escurrimiento es necesario determinar el valor del coeficiente de escurrimiento que actúa específicamente en cada unidad de las subcuencas, para cada mes de cada año, con el fin de estimar los escurrimientos mensuales que se dieron en las mismas. Para ello se tuvo que tomar la información de los registros de la estación hidrométrica El Alamar (1034), y las entradas por ríos del funcionamiento de vaso de las presas Abelardo L. Rodríguez y El Carrizo, para tomarlos como referencia del escurrimiento que debería pasar en dichos puntos y así poder calcular los escurrimientos que se presenta en el periodo 1969-1998.

La figura 4.21 muestra las dos estaciones hidrométricas y presas con las que cuenta la CRT del lado mexicano. Cabe mencionar que la estación hidrométrica Cerca de Néstor (1028), no se empleó pues su información mostró inconsistencias con respecto de la estación El Alamar.

Figura 4. 21 Estaciones hidrométricas que se utilizaron en la cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaboración propia.

Contando únicamente con información de una estación hidrométrica y de las dos presas, fue necesario que la cuenca se dividiera en cuatro zonas de drenaje (figura 4.22). La *zona 1* (llamada Loc\_1) la conforman la subcuencas del Río Seco (Subc\_6), La Ciénega (Subc\_7), Las Canoas (Subc\_8), El Beltrán (Subc\_9), Las Calabazas (Subc\_10) y Las Palmas (Subc\_11). La *zona 2* (llamada Loc\_2) la conforma la subcuenca de Tecate (Subc\_5) y una parte de la subcuenca del Río Alamar ya que ésta se divide donde se encuentra la estación hidrométrica. Las *zona 3* (llamada Loc\_3) la conforman la subcuenca del Río Tijuana, parte de la subcuenca del Río Alamar (la que se encuentra debajo de la estación hidrométrica El Alamar) (Subc\_2) y parte de la subcuenca de El Florido (la que se encuentra debajo de la presa el Carrizo)(Subc\_12). La *zona 4* (llamada Loc\_4) está conformada por la parte que se encuentra aguas arriba de la Presa El Carrizo, esto es la otra parte de la subcuenca de El Florido (Subc\_12). Las

subcuencas de Pine Valley (subc\_3) y Cottonwood (subc-4) no fueron consideradas para el cálculo de los escurrimientos debido a que toda su agua es trasvasada fuera de la cuenca.

Figura 4.22 Localidades en que se dividió la Cuenca del Río Tijuana para cálculo de los coeficientes de escurrimientos



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.3 se muestran las áreas que abarcan cada una de las zonas antes mencionadas.

Tabla 4. 3 Áreas de las zonas en que está dividida la cuenca del río Tijuana

ZONAS	SUBCUENCAS	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
ZONA 1 (LOC_1)	- Subc_6 Río Seco - Subc_7 La Ciénega - Subc_8 Las Canoas - Subc_9 El Beltrán - Subc_10 Las Calabazas - Subc_11 Las Palmas	2,529.65
ZONA 2 (LOC_2)	- Subc_5 Tecate - Subc_2 Río Alamar (parte ubicada antes de la estación)	721.07
ZONA 3 (LOC_3)	- Subc_1 Río Tijuana - Subc_2 Río Alamar (parte ubicada después de la estación) - Subc_12 El Florido (parte que ubicada debajo de la presa el Carrizo)	445.94
ZONA 4 (LOC_4)	- Subc_12 El Florido (parte que ubicada arriba de la presa el Carrizo)	114.63
<b>TOTAL</b>		<b>3,811.28</b>

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.4 muestra las áreas que les corresponden a cada unidad del coeficiente de escurrimiento en cada una de las cuatro zonas. Cabe mencionar que la unidad del coeficiente de escurrimiento, obtenida a partir de la información de INEGI, que va de 5 a 10% se modificó a un rango que va de 0 a 10%, ya que al momento de la estimación de los escurrimientos este rango permitió un mejor ajuste con respecto de la información registrada.

Tabla 4. 4 Áreas de las zonas y de los rangos de los coeficientes de escurrimiento

ZONAS	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
<b>ZONA 1 (LOC_1)</b>	<b>2,529.65</b>
COEFICIENTES DE 0-5%	284.88
COEFICIENTES DE 0-10%	2,244.77
<b>ZONA 2 (LOC_2)</b>	<b>721.07</b>
COEFICIENTES DE 0-5%	20.88
COEFICIENTES DE 0-10%	693.01
COEFICIENTES DE 30-75%	7.17
<b>ZONA 3 (LOC_3)</b>	<b>445.94</b>
COEFICIENTES DE 0-5%	221.22
COEFICIENTES DE 0-10%	165.18
COEFICIENTES DE 30-75%	59.54
<b>ZONA_4 (LOC_4)</b>	<b>114.63</b>
COEFICIENTES DE 0-5%	0.11
COEFICIENTES DE 0-10%	114.51
<b>TOTAL</b>	<b>3,811.28</b>

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener el escurrimiento natural en cada subcuenca, se desarrolló un programa, el cual distribuye el registro de escurrimiento de una estación en las diferentes subcuencas que le aportan, a través de determinar el valor del coeficiente de escurrimiento que actúa en cada unidad de escurrimiento. El programa lleva a cabo un proceso de optimización para minimizar la diferencia entre el escurrimiento calculado y el registrado, aplicando la fórmula 4.1 a cada unidad de escurrimiento o sea en cada subcuenca y acumulando los escurrimientos primero a nivel subcuenca y después al área de aportación total para cada punto de control (que en este caso son la estación hidrométrica y las presas).

A continuación se menciona cómo es que está desarrollado el programa que se utilizó para los cálculos de los escurrimientos.

El programa utilizado para el cálculo de los coeficientes realiza un proceso de optimización mediante el método de “Recocido Simulado” (RS), el cual es un algoritmo que surge a partir de los trabajos de Kirkpatrick et al. (1983) y Cerny (1985) de manera independiente, y es implementado como un método para la solución de problemas de optimización combinatoria, principalmente. El algoritmo está basado en una fuerte analogía con el proceso físico de recocido de sólidos y es modelado matemáticamente mediante cadenas de Markov de primer orden.

A continuación se da una breve explicación del algoritmo RS pero una explicación completa del mismo y de cómo determinar los parámetros que gobiernan su convergencia puede ser encontrada en Sanvicente-Sánchez (2003).

Si aun material fundido se le baja la temperatura, llegará a un estado en el cual la energía termal no es suficiente para prevenir el congelamiento del spin de sus átomos dentro de una configuración particular. Sin embargo, en el contexto práctico, una temperatura baja no es suficiente para encontrar estados aterrizados (ground states) de la mataría, esto es, estados en los que los átomos están distribuidos de tal manera que la energía del sistema es mínima, previa congelación.

Un estado aterrizado se logra mediante un proceso de recocido cuidadoso que se efectúa mediante un baño de calor. En el recocido primero se eleva la temperatura de un sólido para lograr su fusión total y por lo tanto su paso a una fase líquida, y entonces la temperatura es bajada muy lentamente, hasta obtener su congelamiento. Si la temperatura fue lo suficientemente alta y el decremento de la misma lo suficientemente lento para permitir el equilibrio térmico a cada temperatura dentro de la fase líquida, sus partículas alcanzarán el arreglo o configuración del estado aterrizado del sólido. De otra manera el sólido será congelado en un meta-estado (Kirkpatrick et al., 1983).

En la fase líquida todas las partículas componentes se arreglan en forma aleatoria; en el estado aterrizado, las particulares se arreglan en una configuración altamente estructurada y la energía del sistema es mínima.

A cada valor de temperatura  $T$ , se permite al líquido que alcance el equilibrio térmico. El cual, es caracterizado por la función de distribución de Boltzmann. Se puede decir que la función de distribución de Boltzmann establece la probabilidad del líquido de estar en el estado cuántico  $i$  con energía  $e_i$  a la temperatura  $T$  una vez que se alcanzó el equilibrio térmico.

Cuando la temperatura decrece, la distribución de Boltzmann se concentra sobre los estados con más baja energía y finalmente, cuando la temperatura llega a ser cero, únicamente los estados de energía mínima tienen una probabilidad de ocurrencia diferente de cero.

Figura 4. 23 Codificación general de un algoritmo de recocido simulado

```

PROCEDIMIENTO DE RECOCIDO SIMULADO
comenzar
  INICIALIZAR (i = config_inicial, c = temperatura_inicial)
  repetir
    repetir
      PERTURBACIÓN (config. i, config. j)
      si  $f(j) \leq f(i)$  entonces
        i = j
      sino si  $\exp(-\Delta f/c) > \text{random}[0,1)$  entonces
        i = j
    hasta EL EQUILIBRIO (número de iteraciones)
  c = enfriamiento (c)
  hasta CRITERIO DE PARO (alcanzar la temperatura_final)
terminar
    
```

Usando la función de costo  $f(X)$  en lugar de la energía y definiendo la configuración de átomos por medio de los valores de las variables de decisión  $X = \{x_i\}$ , se puede llevar a cabo una analogía con el sistema termodinámico y de esta forma generar una población de configuraciones de un problema de optimización combinatoria a través de perturbar una configuración inicial, en alguna temperatura efectiva. Esta temperatura es simplemente un parámetro de control en las mismas unidades que la función de costo. La figura 4.23 muestra un pseudocódigo general de un algoritmo de recocido simulado.

El conjunto de parámetros que gobiernan la convergencia del algoritmo es llamado esquema de enfriamiento y se compone de:

- **Temperatura inicial:** especifica el límite superior del parámetro de control y debe ser tal que permita el libre movimiento en el espacio de soluciones, para evitar quedar atrapado dentro de un mínimo local en una etapa temprana de la ejecución del algoritmo.
- **Función de decremento de la temperatura:** establece la razón a la cual la temperatura será reducida (razón de enfriamiento) de manera que el algoritmo converja al espacio de soluciones óptimas.

- **Temperatura final:** fija el límite inferior del parámetro de control y es especificada mediante algún criterio de paro (usualmente cuando se alcanza la temperatura de cero o si el costo después de un determinado número de temperaturas no mejora).
- **Longitud de la cadena de Markov:** define el número de transiciones requerido para alcanzar el equilibrio del sistema o estado estacionario dentro de cada temperatura.

Cabe mencionar que el algoritmo de recocido simulado es aplicable a problemas cuyas variables de decisión son discretas y no continuas, como es el presente problema, por lo que se tuvo que implementar una codificación especial para poderlo aplicar.

Para llevar a cabo la determinación de los coeficientes de escurrimiento en el programa de recocido simulado fue necesario generar archivos de texto que contuvieran información de las áreas de cada unidad de escurrimiento y el rango de variación de los coeficientes en las mismas (valor máximo y mínimo), así como la precipitación promedio sobre dichas áreas y el escurrimiento naturalizado (puede ser el que establece una estación hidrométrica o el funcionamiento de vaso de una presa) a la salida de la cuenca o zona drenada. En la tabla 4.5 se muestra un ejemplo de cómo se manejó la información para calcular los coeficientes del mes de enero del año de 1988, para la zona dos (Loc\_2, la cual está compuesta por la subcuenca de Tecate también llamada Campo Creek y una parte de la subcuenca del Río Alamar también llamada Lower Cottonwood).

Tabla 4. 5 Manera en que fueron introducidos los datos al programa de Recocido Simulado

AÑO	ÁREA_m <sup>2</sup>	MEAN_PRECIP_ENE_m	SUBCUENCA	DESCRIPCION	MAXIMO	MINIMO	ESCURRIMIENTO_m <sup>3</sup>
1988	7173868.8124090	0.090042674256371	SUBC_5_(CAMPO_CREEK)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_30_a_75%	0.75	0.30	9118100.00
1988	354172.8780240	0.060563100000000	SUBC_5_(CAMPO_CREEK)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_0_a_5%	0.05	0.00	9118100.00
1988	423839255.4260000	0.083341691769883	SUBC_5_(CAMPO_CREEK)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_0_a_10%	0.10	0.00	9118100.00
1988	0.0000000	0.000000000000000	SUBC_2_(LOWER_COTTONWOOD)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_30_a_75%	0.75	0.30	9118100.00
1988	20530167.9208000	0.043583100000000	SUBC_2_(LOWER_COTTONWOOD)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_0_a_5%	0.05	0.00	9118100.00
1988	269169111.9746000	0.077249965326672	SUBC_2_(LOWER_COTTONWOOD)	Coficiente_de_Escurrecimiento_de_0_a_10%	0.10	0.00	9118100.00

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.24 se muestra un ejemplo del cálculo de los coeficientes en el programa de Recocido Simulado para la zona 2, donde se introduce la siguiente información:

**Número de subcuencas:** Se introduce el número de subcuencas que están contenidas en determinada zona, en este caso son dos, la subcuenca del Río Alamar (sólo la parte que se encuentra en la zona 2) y Tecate.

**Número de coeficientes:** Se introduce cuantos coeficientes de escurrimientos se van a calcular, es decir, el número de unidades de escurrimiento contenidas en la zona, en el ejemplo de la zona 2 se tienen tres unidades que van de 0-5%, 0-10% y 30-75%.

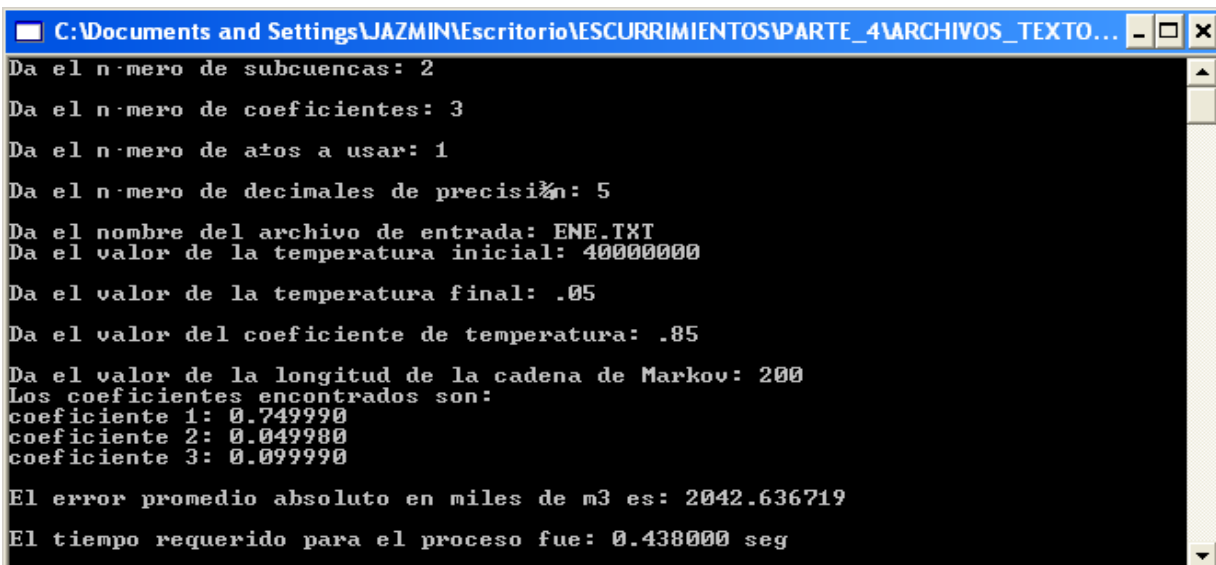
**Número de años a usar:** Se coloca el periodo de años que se considerará en la corrida, para nuestro caso se corre el programa para un solo mes de un año. Esto es, en cada corrida se determinaron los



coeficientes para el mes y año considerado y que mejor ajustaron el escurrimiento al valor registrado en la estación. En el ejemplo mostrado se determinaron los coeficientes para enero de 1988, únicamente.

**Número de decimales de precisión:** Establece el número de decimales que tendrá la determinación de cada coeficiente de escurrimiento, esto es, la precisión en la determinación de los coeficientes. Mientras más precisión en los coeficientes, el error entre el escurrimiento registrado y calculado puede ser menor. La precisión en la determinación de los coeficientes que se estableció fue de cinco decimales.

Figura 4. 24 Vista del Programa de Recocido Simulado



```
C:\Documents and Settings\JAZMIN\Escritorio\ESCURRIMIENTOS\PARTE_4\ARCHIVOS_TEXTO...
Da el número de subcuencas: 2
Da el número de coeficientes: 3
Da el número de años a usar: 1
Da el número de decimales de precisión: 5
Da el nombre del archivo de entrada: ENE.TXT
Da el valor de la temperatura inicial: 40000000
Da el valor de la temperatura final: .05
Da el valor del coeficiente de temperatura: .85
Da el valor de la longitud de la cadena de Markov: 200
Los coeficientes encontrados son:
coeficiente 1: 0.749990
coeficiente 2: 0.049980
coeficiente 3: 0.099990
El error promedio absoluto en miles de m3 es: 2042.636719
El tiempo requerido para el proceso fue: 0.438000 seg
```

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se solicitan los parámetros que gobiernan la convergencia del algoritmo de recocido simulado y que fueron determinados de la siguiente manera: La **temperatura inicial** se estableció como un valor muy alto de escurrimiento (en el ejemplo se estableció como 40,000,000), la **temperatura final** es un valor cercano a cero (en el ejemplo es 0.05), el **coeficiente de temperatura** se determinó para que en cada paso la temperatura descendiera un 15%, esto es, se conservaba el 85% de la temperatura, y la **longitud de la cadena de Markov** se estableció como 200, que es 1.5 veces el tamaño de la vecindad para configuraciones de tres coeficientes con 5 decimales de precisión.

Ejecutando el programa de recocido simulado para las diferentes zonas de drenaje y cada registro de escurrimiento mensual que se tenía a su desembocadura se obtuvieron los valores de los coeficientes de escurrimiento que actuaron en cada unidad para producir dicho escurrimiento a través de la fórmula 4.1.

Contando ya con todos los datos requeridos para la estimación de los escurrimientos, se procedió a dicho cálculo, generando así los escurrimientos de cada mes, de cada año, en cada una de las subcuencas; teniendo así un periodo de escurrimientos que van de 1969 a 1998.

La estimación de los escurrimientos realizados para el periodo de 1969-1998 en ciertas zonas, se tuvo que rellenar, debido a que los registros de las estaciones usadas presentaban huecos en algunas fechas (figura 4.25). Por tal motivo, bajo la hipótesis de la homogeneidad en los factores que determinan los valores de los coeficientes de escurrimiento en la cuenca, se realizó una extrapolación de coeficientes de escurrimiento, bajo un criterio que estableció que el juego de coeficientes a extrapolar (emplear en la zona donde no se tenía registro para determinarlo) era aquel que produjera el menor error normalizado con respecto del área de escurrimiento. Esto es, el juego de coeficientes que para un determinado mes produjera el menor error con respecto de lo que escurrió en una estación pero pesado por el inverso del área de aportación hacia ese punto.

**Error Absoluto** = Escurrimiento Registrado – Escurrimiento Calculado.

**Error Relativo** = Error Absoluto /Escurrimiento Registrado.

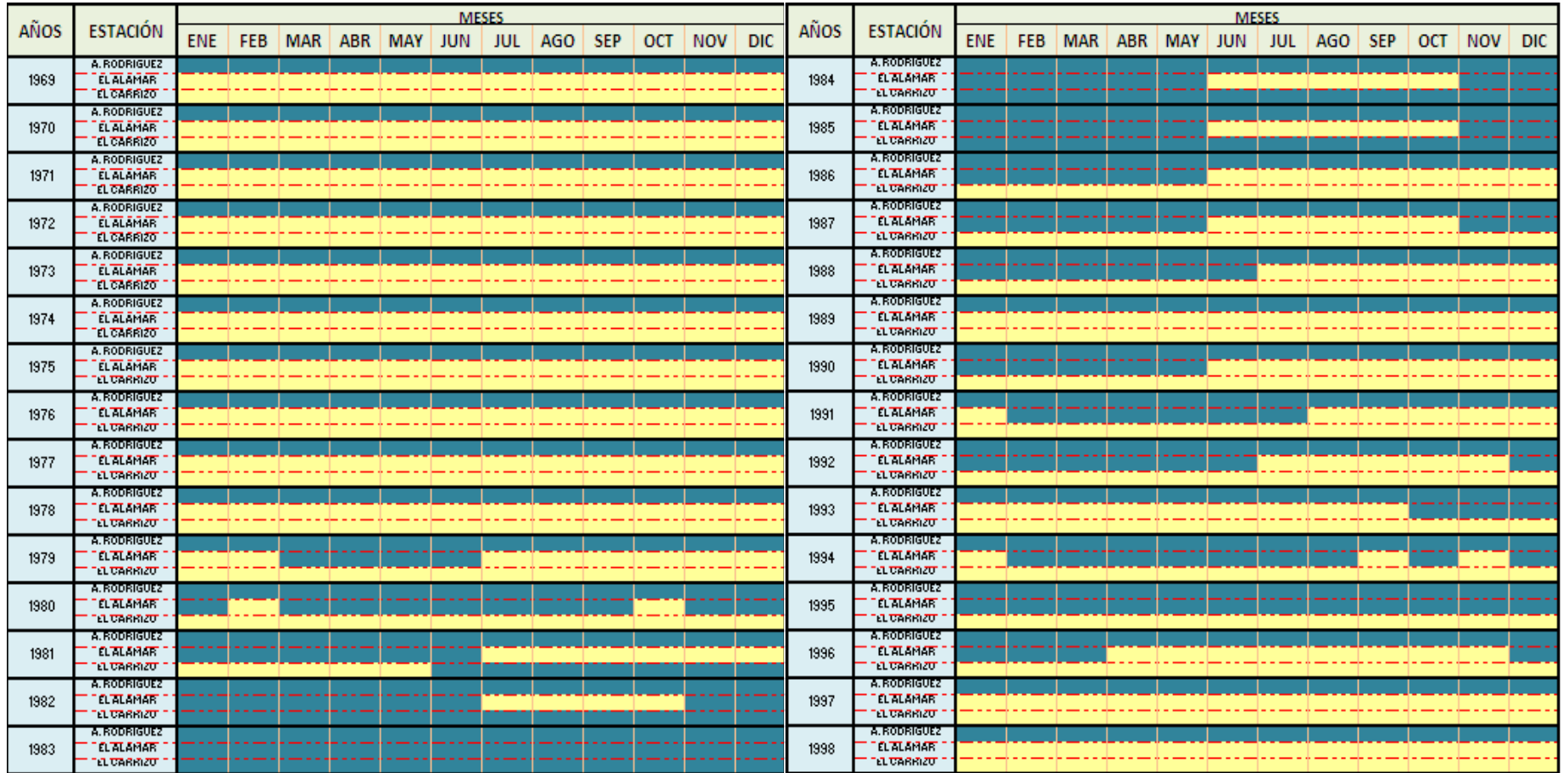
**Error Normalizado** = Error Relativo/ Área.

Como se observa en la figura 4.25 la zona de drenaje uno (Loc\_1) controlada por la presa Abelardo L. Rodríguez siempre contó con registro de escurrimiento, por lo que para todo el periodo de 1969 a 1998 siempre se contó con un juego de escurrimientos que pudo ser extrapolado. Para la zona tres (Loc-3) no se contó con un registro confiable así que siempre se le extrapolaron los coeficientes.

A manera de resumen la tabla 4.6 muestra los escurrimientos anuales, por cuenca propia, que fueron estimados para cada uno de los ríos principales que conforman la Cuenca del Río Tijuana. En el entendido de que los escurrimientos estimados por el procedimiento descrito son realmente mensuales y de que para las subcuencas del Río Alamar y el arroyo El Florido se cuenta con escurrimientos para dos segmentos de río que en la tabla han sido sumados.

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Figura 4.25 Periodos con registro de escurrimientos para las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Tijuana



Con registro de escurrimientos  
Sin registro de escurrimientos

Fuente: Elaborado a partir de: Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas), 2006

**Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP**

Tabla 4. 6 Escurrimientos anuales de cada uno de los ríos que conforman la cuenca del río Tijuana

AÑOS	ESCURRIMIENTOS ANUALES POR RIOS (hm <sup>3</sup> )									
	RÍO TIJUANA	RÍO ALAMAR	RÍO TECATE	RÍO SECO	ARROYO LA CIENEGA	ARROYO LAS CANOAS	RÍO EL BELTRAN	ARROYO LAS CALABAZAS	RÍO LAS PALMAS	ARROYO EL FLORIDO
1969	9.265	2.115	4.118	2.181	1.954	1.398	1.073	1.965	1.687	1.226
1970	7.122	0.474	1.207	0.186	0.218	0.130	0.095	0.177	0.265	0.135
1971	5.058	0.303	0.911	0.077	0.162	0.078	0.053	0.102	0.158	0.067
1972	4.514	0.346	0.877	0.097	0.142	0.089	0.063	0.121	0.176	0.123
1973	7.899	0.899	2.310	0.649	0.775	0.479	0.334	0.609	0.764	0.387
1974	5.652	0.336	0.803	0.034	0.091	0.038	0.030	0.056	0.142	0.062
1975	6.698	0.494	1.209	0.144	0.187	0.110	0.083	0.140	0.225	0.133
1976	12.777	1.154	1.960	0.484	0.742	0.434	0.322	0.563	1.242	0.597
1977	8.579	0.474	1.221	0.035	0.078	0.047	0.037	0.055	0.099	0.042
1978	15.544	9.387	14.048	12.130	11.949	9.693	7.513	12.375	10.194	6.478
1979	9.332	6.845	9.576	7.326	6.710	4.974	3.782	7.024	6.592	4.413
1980	17.166	19.956	32.509	30.657	28.078	21.167	16.130	26.488	20.267	13.064
1981	8.267	2.366	3.865	2.683	2.675	2.135	1.546	2.423	2.072	2.159
1982	8.398	4.052	6.923	6.609	6.658	4.967	3.539	5.618	4.894	3.463
1983	23.667	20.450	34.736	24.432	23.784	18.036	12.807	21.179	20.292	11.064
1984	8.030	3.469	4.992	0.993	1.087	0.679	0.483	0.958	1.245	2.895
1985	9.129	3.202	6.096	1.321	1.383	1.118	0.767	1.048	1.225	3.937
1986	10.737	4.934	8.191	1.505	1.654	1.262	0.915	1.519	1.425	1.686
1987	10.646	1.708	2.572	0.603	1.081	0.903	0.518	0.661	0.813	1.305
1988	9.221	3.213	6.032	1.259	1.216	0.814	0.586	0.896	1.266	0.679
1989	3.694	0.209	0.529	0.040	0.031	0.015	0.014	0.025	0.046	0.026
1990	4.342	0.345	0.664	0.089	0.172	0.103	0.068	0.104	0.205	0.155
1991	13.442	7.586	13.724	0.153	0.497	0.153	0.102	0.273	0.893	0.429
1992	12.208	3.787	7.009	3.729	3.927	2.693	1.897	3.361	3.920	2.899
1993	20.007	19.546	31.213	24.747	20.668	15.568	11.178	17.058	18.881	12.677
1994	10.909	6.409	11.188	2.521	2.741	1.790	1.148	1.884	2.546	1.383
1995	21.850	16.506	26.627	15.687	10.241	5.941	5.074	10.290	10.833	7.309
1996	7.371	4.118	6.868	0.863	0.973	0.549	0.387	0.786	1.032	1.513
1997	7.865	0.739	1.678	0.284	0.344	0.194	0.131	0.243	0.363	0.200
1998	20.999	15.099	22.460	20.457	17.980	12.439	7.581	13.866	17.360	10.041

### **4.1.3 Estimación de la variación mensual del consumo de agua en los diferentes usos de la cuenca**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2004) define “uso” como la aplicación del agua a una actividad que implique el consumo parcial o total de ese recurso y lo clasifica en: agrícola, ambiental o para conservación ecológica, consuntivo, doméstico, en acuacultura, industrial, pecuario y público urbano. A continuación se define cada uno de estos:

- **Uso Agrícola:** es la aplicación de agua nacional para el riego destinado a la producción agrícola y la preparación de ésta para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.
- **Uso Ambiental o Uso para conservación ecológica:** es el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema.
- **Uso Consuntivo:** es el volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo.
- **Uso Doméstico:** es la aplicación de agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa, en términos del Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- **Uso industrial:** es la aplicación de aguas nacionales en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como el agua que se utiliza en parques industriales, calderas, dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aún en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación.
- **Uso en Acuacultura:** es la aplicación de aguas nacionales para el cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier fauna y flora acuáticas.
- **Uso Pecuario:** es la aplicación de aguas nacionales para la cría y engorda de ganado aves de corral y otros animales, y su preparación para la primera enajenación siempre que no comprenda la transformación industrial; no incluye el riego de pastizales.
- **Uso Público Urbano:** es la aplicación de agua nacional para centros de población y asentamientos humanos, a través de la red municipal.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Con base al Registro Público de Derechos de Agua (REPGA, 2008) en la CRT se establece que se tienen 206 usos, donde 53 son agrícolas, 28 domésticos, 115 pecuarios, 2 públicos-urbanos (representan las ciudades de Tecate y Tijuana), 6 servicios y 2 plantas potabilizadoras (representan El Florido y A. L. Rodríguez).

Para determinar la variación de uso de consumo de agua en WEAP existen dos métodos, uno es especificar el consumo anual y su variación mensual; y el otro es especificar el consumo mensual directamente.

Para los usos de tipo doméstico, pecuario y servicios se consideró emplear el método donde se especifica la demanda anual y su variación mensual, esto debido a que se consideró que presentan un consumo constante durante todo el año, así que se toma el volumen anual y se distribuye en todos los meses del año al 8.33%.

En el caso de los usos Público Urbano y Potabilizadoras también se empleó el método del consumo anual y variación mensual, pero para especificar la variación mensual se tuvo que determinar con base en información proporcionada por la Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEA, 2007 y 2008).

A continuación se explica cómo se determinó la variación mensual para el uso Público Urbano que representan las ciudades de Tijuana y Tecate.

La variación mensual del consumo para la ciudad de Tijuana, se estableció con base en información proporcionada por la CEA referente al volumen bombeado por el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) de manera mensual para los años 2007 y 2008. La tabla 4.7 muestra los porcentajes empleados para cada mes de los dos años, así como el promedio de estos, el cual se empleó para aplicar la variación mensual del consumo de agua en la ciudad para el periodo de 1985 a 2006 que corresponde a los volúmenes entregados a la ciudad de Tijuana por el ARCT (ver tabla 4.8).

Tabla 4. 7 Variación mensual de consumo de la ciudad de Tijuana

Año	Periodo	Bombeo A.R.C.T.			Año	Periodo	Bombeo A.R.C.T.			Promedio de los %*
		m <sup>3</sup>	l/s	%			Mes	m <sup>3</sup>	l/s	
2007	Mes				2008	Mes				
	Enero	10,849,655	4,051	9.70		Enero	10,793,649	4,030	9.50	9.60
	Febrero	9,817,061	4,058	8.70		Febrero	9,874,931	3,941	8.70	8.70
	Marzo	8,980,757	3,353	8.00		Marzo	10,621,598	3,966	9.40	8.70
	Abril	10,343,439	3,991	9.20		Abril	10,275,954	3,964	9.10	9.10
	Mayo	8,734,906	3,261	7.80		Mayo	8,052,541	3,006	7.10	7.40
	Junio	8,883,058	3,427	7.90		Junio	9,555,390	3,686	8.40	8.20
	Julio	8,510,314	3,177	7.60		Julio	9,523,526	3,556	8.40	8.00
	Agosto	8,962,959	3,346	8.00		Agosto	9,442,441	3,525	8.30	8.10
	Sept.	8,950,466	3,453	8.00		Septiembre	8,607,289	3,321	7.60	7.80
	Octubre	7,766,481	2,900	6.90		Octubre	5,204,177	1,943	4.60	5.70
	Noviembre	9,809,840	3,785	8.70		Noviembre	10,582,837	4,083	9.30	9.00
Diciembre	10,812,253	4,171	9.60	Diciembre	10,957,561	4,091	9.70	9.60		
<b>TOTAL</b>	<b>112,421,189</b>	<b>42,973</b>	<b>100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>113,491,894</b>	<b>43,113</b>	<b>100</b>	<b>100</b>		

\*Porcentaje que se utiliza para determinar el consumo de la ciudad de Tijuana.

Fuente: Elaboración propia con base en información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California 2007 y 2008.

La tabla 4.8 muestra los volúmenes bombeados y entregados a cada una de las ciudades por el ARCT.

Tabla 4. 8 Volumen bombeado y entregado por el Acueducto Río Colorado-Tijuana

Año	Volumen total bombeado por ARCT	Volumen entregado	
		Tijuana**	Tecate
1982		729,250	
1983		4,767,206	
1984		7,594,260	
1985	2,182,572	10,365,355	
1986	8,543,459	18,247,457	
1987	28,830,095	21,541,000	
1988	34,817,398	34,529,000	
1989	68,969,420	54,626,000	
1990	62,435,062	59,465,000	
1991	28,838,700	53,722,000	
1992	41,480,468	44,470,000	1,414,991
1993	17,244,169	47,761,000	759,875
1994	15,925,535	48,745,000	176,301
1995	*1,417,187	1,201,000	216,187
1996	24,946,659	85,501,173	122,892
1997	69,944,206	87,629,190	963,110
1998	24,793,631	81,349,259	292,030
1999	32,802,024	97,974,014	5,761
2000	110,626,657	102,897,094	2,746,395
2001	112,681,624	100,017,268	4,191,434
2002	105,758,369	98,830,402	5,169,411
2003	103,140,236	97,289,082	5,741,361
2004	114,863,575	100,923,941	6,033,039
2005	84,853,329	98,055,310	4,780,882
2006	100,911,994	106,301,375	4,976,381
2007	112,421,189	102,831,790	6,131,688
2008	113,491,894	96,822,186	6,424,558

\*Cantidad que se obtuvo al sumar volúmenes entregado a Tijuana y Tecate (debido a que la tabla original no mostraba información).  
 \*\*El acueducto inicio su operación hasta 1985 pero debido a la captación de agua de lluvia en la presa el carrizo, se pudo entregar agua a partir de 1982 a la ciudad de Tijuana, utilizando la potabilizadora El Florido.  
 Fuente: Elaboración propia con base en la información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008.

La variación mensual del consumo para la ciudad de Tecate, se estableció con base en información proporcionada por la CEA referente al volumen bombeado por el ARCT a la ciudad de Tecate de manera mensual para los años 2007 y 2008. La tabla 4.9 muestra los porcentajes empleados para cada uno de los meses, de los dos años así como el promedio de estos, el cual se empleó para aplicar la variación mensual del consumo de agua en la ciudad para el periodo de 1992 a 2006 que corresponde a los volúmenes entregados a la ciudad de Tecate por el ARCT.

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 9 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la cd. Tecate

Año	Periodo	Bombeo A.R.C.T. A Tecate			Año	Periodo	Bombeo A.R.C.T. a Tecate			Promedio de los %*
		m <sup>3</sup>	l/s	%			Mes	m <sup>3</sup>	l/s	
2007	Mes				2008	Mes				
	Enero	403,029	150	6.60		Enero	466,813	174	7.30	6.90
	Febrero	339,540	140	5.50		Febrero	421,906	168	6.60	6.10
	Marzo	445,261	166	7.30		Marzo	475,299	177	7.40	7.30
	Abril	432,921	167	7.10		Abril	508,076	196	7.90	7.50
	Mayo	506,005	189	8.30		Mayo	484,921	181	7.50	7.90
	Junio	556,432	215	9.10		Junio	603,584	233	9.40	9.20
	Julio	639,390	239	10.40		Julio	645,447	241	10.00	10.20
	Agosto	676,647	253	11.00		Agosto	647,667	242	10.10	10.60
	Septiembre	583,074	218	9.50		Septiembre	602,409	232	9.40	9.40
	Octubre	582,238	217	9.50		Octubre	588,350	220	9.20	9.30
	Noviembre	509,471	190	8.30		Noviembre	513,028	198	8.00	8.10
Diciembre	457,680	171	7.50	Diciembre	467,058	174	7.30	7.40		
<b>TOTAL</b>		<b>6,131,688</b>	<b>2,315</b>	<b>100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>6,424,558</b>	<b>2,437</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

\*Estos porcentajes son los utilizados para determinar las demandas mensuales de la ciudad de Tecate.  
Fuente: Elaboración propia con base en información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California 2007 y 2008.

Para determinar la variación mensual para las potabilizadoras se realizó lo siguiente:

La potabilizadora El Florido se le asignó el método de la demanda mensual, donde para determinar las series de tiempo de los requerimientos mensuales, se consideraron los volúmenes anuales entregados a Tijuana (ver tabla 4.8) que llegan a la Presa El Carrizo por el ARCT. La tabla 4.10 muestra los porcentajes empleados para cada mes de los años 2007 y 2008, y el promedio de estos, el cual se empleó para determinar el consumo mensual para el periodo de 1985 a 2006.

Tabla 4. 10 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la potabilizadora El Florido

AÑO	PERIODO	BOMBEO A.R.C.T. A TIJUANA			AÑO	PERIODO	BOMBEO A.R.C.T. A TIJUANA			PROMEDIO DE LOS %*
		M <sup>3</sup>	L/S	%			Mes	M <sup>3</sup>	L/S	
2007	MES				2008	Mes				
	Enero	7,678,717	2,867	7.50		Enero	7,781,647	2,905	8.00	7.80
	Febrero	6,797,687	2,810	6.60		Febrero	6,777,937	2,705	7.00	6.80
	Marzo	7,878,953	2,942	7.70		Marzo	6,961,789	2,599	7.20	7.40
	Abril	7,868,392	3,036	7.70		Abril	7,534,682	2,907	7.80	7.70
	Mayo	9,047,576	3,378	8.80		Mayo	7,651,133	2,857	7.90	8.40
	Junio	9,120,445	3,519	8.90		Junio	8,137,323	3,139	8.40	8.60
	Julio	9,808,374	3,662	9.50		Julio	9,438,951	3,524	9.70	9.60
	Agosto	10,009,743	3,737	9.70		Agosto	9,679,691	3,614	10.00	9.90
	Septiembre	9,536,582	3,561	9.30		Septiembre	8,466,480	3,266	8.70	9.00
	Octubre	9,163,027	3,421	8.90		Octubre	8,552,736	3,193	8.80	8.90
	Noviembre	8,134,413	3,037	7.90		Noviembre	8,402,849	3,242	8.70	8.30
Diciembre	7,787,882	2,908	7.60	Diciembre	7,436,968	2,777	7.70	7.60		
<b>TOTAL</b>		<b>102,831,791</b>	<b>38,878</b>	<b>100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>96,822,186</b>	<b>36,729</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

Fuente: Elaboración propia.



La variación mensual del consumo de la potabilizadora Abelardo L. Rodríguez se determinó con base en información proporcionada por la CEA del volumen que es potabilizado en el año del 2008 (tabla 4.11).

Tabla 4. 11 Porcentajes utilizados para determinar los consumos mensuales de la potabilizadora A.L. Rodríguez

Año	Periodo	Potabilizadora A.L. Rodríguez		%
		m <sup>3</sup>	l/s	
2008	Mes			
	Enero	549,240	205.063	8.20
	Febrero	431,590	178.402	6.50
	Marzo	658,500	245.856	9.90
	Abril	712,850	275.019	10.70
	Mayo	790,500	295.139	11.90
	Junio	690,360	266.343	10.40
	Julio	587,510	219.351	8.80
	Agosto	417,030	155.701	6.30
	Septiembre	370,360	142.886	5.60
	Octubre	382,990	142.992	5.70
	Noviembre	385,100	148.573	5.80
Diciembre	686,010	256.127	10.30	
<b>TOTAL</b>		<b>6,662,040</b>	<b>2,531</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia con base en información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008.

Ahora bien, para el uso agrícola la determinación de la variación mensual de consumo de agua es diferente, ya que el consumo de agua depende del tipo de cultivo y del periodo de siembra (que va de octubre a marzo).

A continuación se explica cómo se determinó la variación mensual de consumo de agua para el uso agrícola que se presenta en la CRT.

#### 4.1.3.1 Determinación de la variación mensual de consumo de agua para el uso agrícola

Para determina el consumo de agua para uso agrícola es necesario considerar los siguientes tres factores: clima, tipo de cultivo y estado de desarrollo de las plantas (Fuentes y Cruz, 1990).

En el clima la insolación, la temperatura, la humedad y el viento son los elementos climáticos que influyen más decisivamente en las necesidades de agua (Fuentes y Cruz, 1990).

En el tipo de cultivo las necesidades de agua se consideran bajo dos formas:

- Necesidades diarias. Para un mismo estado de desarrollo, algunas plantas necesitan más agua que otras.
- Necesidades estacionales o por temporada de cultivo. Las necesidades de agua durante toda la estación depende de las necesidades diarias y de la duración del periodo de crecimiento; algunos cultivos tienen un periodo de crecimiento de 90 días, mientras que otras variedades de 150 días.

Por otra parte, la estación del año durante la cual tiene lugar el crecimiento influye también en el consumo de agua. Si un cultivo desarrolla una buena parte de su crecimiento durante los meses fríos necesita menos agua que si crece exclusivamente durante los meses cálidos (Fuentes y Cruz, 1990).

En cuanto al estado de desarrollo de las plantas las necesidades de agua van aumentando progresivamente conforme se desarrolla el cultivo, hasta llegar a un máximo que suele coincidir con la mayor velocidad de crecimiento o con la floración y la fructificación (Fuentes y Cruz, 1990).

### Cálculo de la evaporación del cultivo de referencia

Las necesidades de agua de un cultivo comprenden la transpiración de las plantas y la evaporación ocurrida en la superficie del suelo. Ambos procesos constituyen la evapotranspiración de ese cultivo, que se expresa en milímetros de agua por día, por mes o por estación o temporada de cultivo. Cuando la planta está en las primeras fases de su desarrollo, la evaporación predomina sobre la transpiración, pero cuando la planta está muy desarrollada, la transpiración es más importante que la evaporación (Aparicio Mijares, F.J., 2002).

Para calcular la evapotranspiración de un cultivo cualquiera que se pretenda regar, se valora la evapotranspiración de un cultivo de referencia y después se comparan las necesidades de este cultivo de referencia con el cultivo que se pretende regar. Esta evapotranspiración del cultivo de referencia la llamamos ETo (Aparicio Mijares, F.J., 2002).

El cálculo de ETo puede hacerse mediante métodos experimentales efectuados en la zona regable (método del evaporímetro de cubeta) o mediante fórmulas que relacionan datos climáticos fáciles de obtener (Blaney-Criddle, radiación). En este estudio para el cálculo de la ETo se consideró el método de Blaney-Criddle, donde su fórmula es la siguiente:

$$ETo = p(0.46 t + 8.13)$$

(4.3)

**ETo = Evaporación del cultivo de referencia, expresada en mm por día.**  
**p = Porcentaje medio diario de horas diurnas.**  
**t = Temperatura media mensual, expresada en grados centígrados.**

Para iniciar con el cálculo de la evaporación del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) es necesario determinar el porcentaje medio diario de horas diurnas (p), este dato se obtiene conociendo la latitud del lugar donde se lleva a cabo el cultivo, en el caso de la Cuenca del Río Tijuana se consideró que se encuentra a una latitud norte de 32.50°. Los valores que se utilizaron para calcular el porcentaje medio diario de horas diurnas fue de los valores que se encuentra en la tabla 4.12, donde se interpolaron los valores que corresponden a la Latitud Norte de 33° y 32°, para obtener los de la latitud norte de 32.50°.

Tabla 4. 12 Porcentajes medios diarios de horas diurnas

LAT_NORTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
33	23.1	24.8	27.0	29.3	31.2	32.2	31.7	30.0	27.8	25.6	23.6	22.5
32	23.2	24.9	27.0	29.2	31.0	32.0	31.5	29.9	27.8	25.6	23.7	22.7
<b>32.5</b>	<b>23.1</b>	<b>24.8</b>	<b>27.0</b>	<b>29.2</b>	<b>31.1</b>	<b>32.1</b>	<b>31.6</b>	<b>30.0</b>	<b>27.8</b>	<b>25.6</b>	<b>23.6</b>	<b>22.6</b>

Fuente: Elaboración propia con base en la información contenida en los Fundamentos de hidrología de superficie, Aparicio 2002.

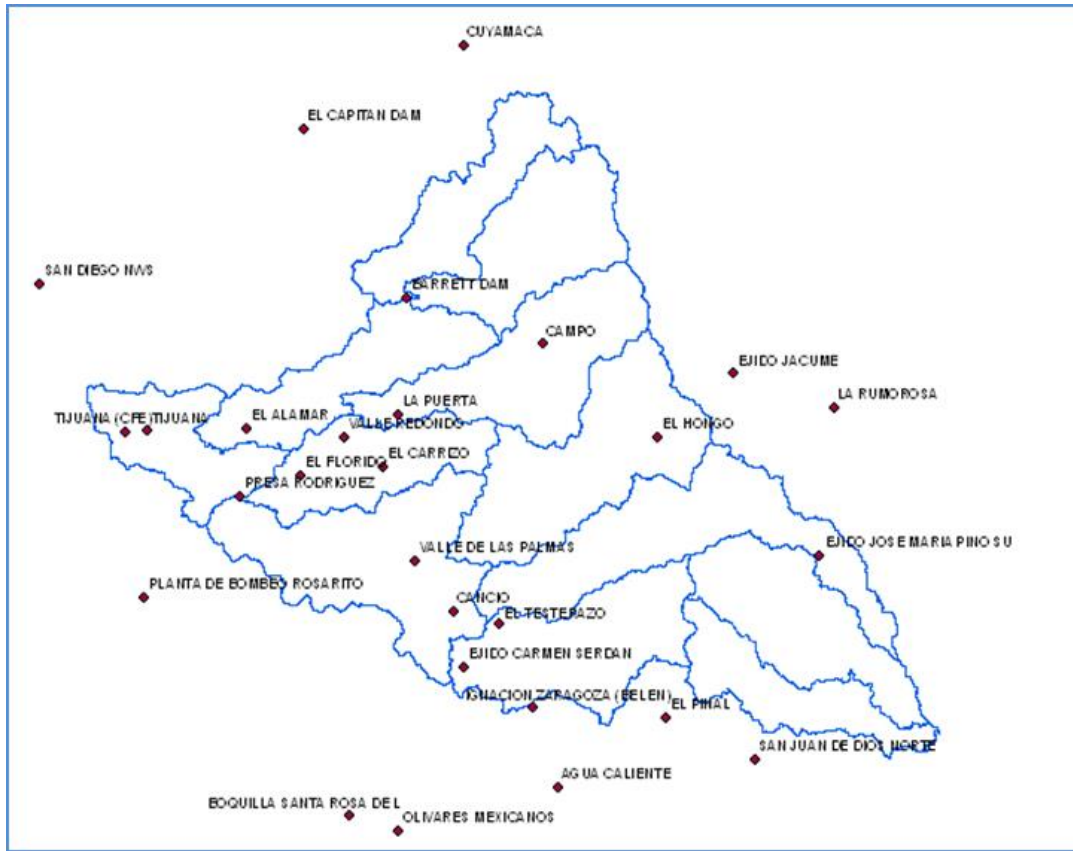
La temperatura media mensual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$t = (T \text{ máxima media} + T \text{ mínima media})/2$$

(4.4)

Para obtener las temperaturas máximas y mínimas medias, se recurrió a las estaciones climatológicas que se encuentran dentro y cerca de la cuenca (figura 4.26, tabla 4.13), donde se sacó un primer promedio entre las temperaturas máximas y mínimas de cada mes del año, posteriormente habiendo sacado la temperatura promedio antes dicha, se llevó a cabo un segundo promedio, en donde se toman todas la temperaturas promedio de los meses que se encuentran en el rango de años que van de 1969 a 2006 (este rango se estableció, debido a que es el periodo en el que se cuenta con datos de temperatura), esto con el fin de obtener sólo una temperatura promedio para cada mes. Estos cálculos fueron realizados para cada una de las estaciones climatológicas, ya que posteriormente se ocuparon para elaborar mallas de temperatura, las cuales ayudaron a determinar la temperatura promedio en cada una de las subcuencas.

Figura 4. 26 Ubicación de las estaciones climatológicas para la obtención de temperaturas promedio



Fuente: ERIC III-2007 (México) y CA. GOV Department of Water Resources. (EUA).

Tabla 4. 13 Estaciones climatológicas que se encuentran dentro y cerca de la cuenca del río Tijuana

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS						
No.	CLAVE	NOMBRE	PAÍS	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
1	2001	AGUA CALIENTE	MÉXICO	410	32.100	-116.4500
2	2004	IGNACION ZARAGOZA (BELEN)	MÉXICO	555	32.195	-116.4860
3	2005	BOQUILLA SANTA ROSA DE L	MÉXICO	40	32.067	-116.7500
4	2017	PLANTA DE BOMBEO ROSARITO	MÉXICO	22	32.328	-117.0470
5	2021	EL PINAL	MÉXICO	1350	32.183	-116.2920
6	2024	EL TESTERAZO	MÉXICO	330	32.296	-116.5330
7	2030	LA PUERTA	MÉXICO	480	32.544	-116.6780
8	2031	LA RUMOROSA	MÉXICO	1232	32.549	-116.0460
9	2036	OLIVARES MEXICANOS	MÉXICO	315	32.049	-116.6810
10	2038	PRESA RODRIGUEZ	MÉXICO	120	32.447	-116.9080
11	2049	SAN JUAN DE DIOS NORTE	MÉXICO	1280	32.132	-116.1650
12	2068	TIJUANA	MÉXICO	55	32.525	-117.0420
13	2069	VALLE DE LAS PALMAS	MÉXICO	280	32.370	-116.6540
14	2070	VALLE REDONDO	MÉXICO	242	32.518	-116.7560
15	2073	TIJUANA (CFE)	MÉXICO	150	32.524	-117.0740
16	2079	EL ALAMAR	MÉXICO	65	32.528	-116.9000

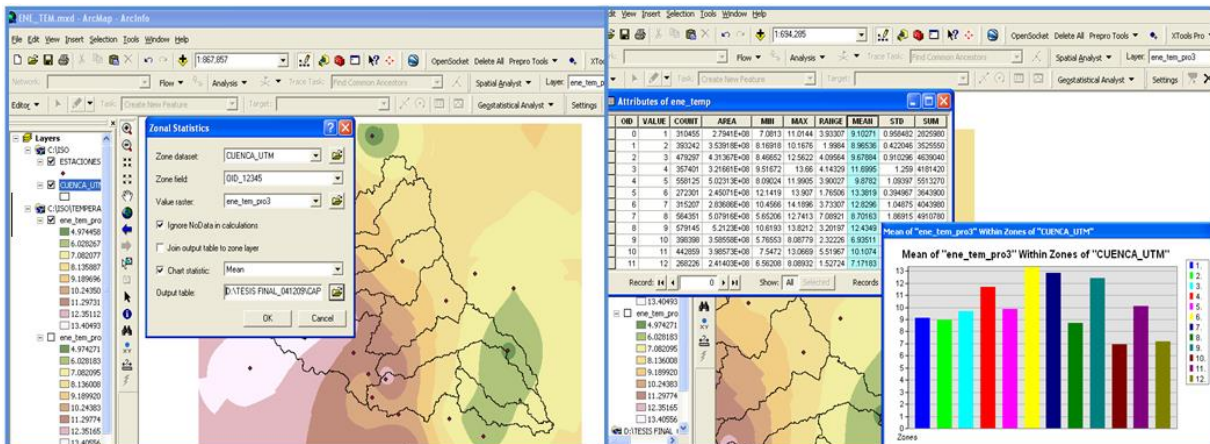
ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS						
No.	CLAVE	NOMBRE	PAÍS	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
17	2086	EJIDO JACUME	MÉXICO	888	32.591	-116.1920
18	2114	EJIDO CARMEN SERDAN	MÉXICO	455	32.244	-116.5840
19	2119	CANCIO	MÉXICO	450	32.310	-116.6000
20	2121	EL HONGO	MÉXICO	960	32.516	-116.3030
21	2124	EL CARRIZO	MÉXICO	495	32.483	-116.7000
22	2152	EJIDO JOSE MARIA PINO SU	MÉXICO	1355	32.373	-116.0680
23	2156	EL FLORIDO	MÉXICO	250	32.472	-116.8210
24	Z11051400	BARRETT DAM	EUA	495	32.683	-116.6670
25	Z11142400	CAMPO	EUA	796	32.628	-116.4690
26	Z08773900	SAN DIEGO NWS	EUA	0	32.700	-117.2000
27	Z07270900	EL CAPITAN DAM	EUA	183	32.885	-116.8170
28	Z07223900	CUYAMACA	EUA	1417	32.983	-116.5830

Fuente: ERIC III-2007 (México) y CA. GOV Department of Water Resources. (EUA).

Para realizar las mallas de temperatura se siguió el mismo procedimiento que se utilizó para la elaboración de las mallas de precipitación que se menciona en la sección 4.1.2.2 nada más que aquí se presenta una modificación de los datos que requiere la Interpolación de Kriging en la opción avanzada, esto es debido a que disminuyó el número de estaciones climatológicas de 32 a 28, así que la distancia promedio entre las estaciones cambio de 51,547.51 m a 49,154.69 m y además aquí sólo se realizaron doce mallas, esto quiere decir una malla para cada uno de los meses del año.

Contando con las mallas de la temperatura promedio, se procede de igual manera que en la sección 4.1.2.2, para determinar la temperatura promedio para cada subcuenca, que es sobreponiendo alguna de estas mallas a los límites de una subcuenca o de un área deseada y aplicando el “Zonal Statistical” que se encuentra en la herramienta de “Spatial Analyst” de ArcGIS (ver figura 4.27).

Figura 4. 27 Extracción de la temperatura promedio por subcuenca en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Las temperaturas promedio que se obtuvieron para cada una de las subcuencas son las que se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4. 14 Temperaturas promedio en centígrados de cada una de las subcuencas

SUBCUENCAS	TEMPERATURA MEDIA EXPRESADA EN CENTIGRADOS											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SUBC_3 (PINE VALLEY)	9.102	9.725	10.822	12.957	15.833	19.809	23.298	23.38	21.12	16.58	12.04	9.089
SUBC_4 (COTTONWOOD)	8.965	9.589	10.702	12.810	15.782	19.779	23.285	23.4	20.99	16.37	11.81	8.877
SUBC_5 (CAMPO CREEK)	9.679	10.240	11.295	13.271	16.255	19.979	23.474	23.75	21.41	16.87	12.42	9.65
SUBC_2 (RIO ALAMAR)	11.70	12.241	13.083	14.960	17.381	20.364	23.621	23.85	22.33	18.57	14.52	11.92
SUBC_6 (RIO SECO)	9.878	10.383	11.513	13.594	16.877	20.868	24.304	24.65	22.03	17.21	12.73	9.914
SUBC_1 (RIO TIJUANA)	13.38	13.994	14.498	15.920	17.719	19.702	22.297	22.89	21.7	18.89	16.06	13.46
SUBC_12 (EL FLORIDO)	12.83	13.293	13.833	15.740	17.892	20.451	23.218	23.81	22.67	19.27	15.7	13.04
SUBC_7 (LA CIENEGA)	8.702	9.177	10.181	12.235	15.489	19.645	23.330	23.23	20.43	15.7	11.39	8.69
SUBC_11 (LAS PALMAS)	12.43	12.919	13.628	15.534	17.807	20.458	23.288	24	22.35	18.96	15.15	12.48
SUBC_8 (LAS CANOAS)	6.935	7.795	8.447	10.462	13.457	17.768	21.713	21.2	18.35	13.72	9.658	7.156
SUBC_10 (LAS CALABAZAS)	10.10	10.085	11.020	12.918	15.730	19.437	22.952	22.96	20.73	16.48	12.43	9.883
SUBC_9 (EL BELTRAN)	7.172	8.032	8.504	10.495	13.329	17.700	21.528	20.98	18.52	13.81	9.948	7.573

Fuente: Elaboración propia.

Ya contando con el porcentaje promedio diario de horas diurnas y con la temperatura media mensual de cada subcuenca, se calculó la evaporación del cultivo de referencia para cada subcuenca, aplicando la fórmula 4.3.

Ejemplo para calcular la ETo para la subcuenca tres en el mes de enero:

$$ETo = p(0.46 t + 8.13)$$

$$ETo = 0.2314516(0.46 * 9.10271 + 8.13)$$

$$ETo = 2.8508$$

Los resultados de ETo para cada subcuenca y en cada uno de los meses son los que se muestra en la tabla 4.15.

Tabla 4. 15 ETo para cada subcuenca en sus respectivos meses

SUBCUENCAS	EVAPORACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA, EXPRESADA EN mm POR DÍA (ETo)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SUBC_3	2.8508	3.1306	3.5371	4.1191	4.798	5.529	5.955	5.6589	4.964	4.0384	3.2298	2.7859
SUBC_4	2.8362	3.1151	3.5221	4.0993	4.7907	5.5245	5.9531	5.6622	4.947	4.0133	3.2052	2.7638
SUBC_5	2.9122	3.1895	3.5957	4.1613	4.8585	5.554	5.9806	5.7105	5.0006	4.0726	3.2716	2.8442
SUBC_2	3.1273	3.4181	3.8177	4.3884	5.0196	5.6109	6.002	5.7236	5.1184	4.2725	3.4996	3.0808
SUBC_6	2.9334	3.2058	3.6228	4.2046	4.9475	5.6851	6.1012	5.834	5.0805	4.1124	3.3049	2.8717
SUBC_1	3.3064	3.6184	3.9934	4.5175	5.0681	5.5131	5.8095	5.5912	5.0385	4.3106	3.6675	3.2404
SUBC_12	3.2476	3.5383	3.9108	4.4933	5.0928	5.6237	5.9435	5.7191	5.1623	4.3557	3.6286	3.1966
SUBC_7	2.8081	3.0681	3.4576	4.0219	4.7487	5.5048	5.9597	5.638	4.8762	3.9343	3.1594	2.7444
SUBC_11	3.2056	3.4956	3.8854	4.4655	5.0806	5.6247	5.9537	5.7448	5.122	4.3188	3.5686	3.1393
SUBC_8	2.6201	2.91	3.2423	3.7836	4.4577	5.2279	5.7246	5.3591	4.6093	3.7007	2.9714	2.5847
SUBC_10	2.9578	3.1718	3.5617	4.1138	4.7833	5.474	5.9048	5.6017	4.9137	4.0267	3.2722	2.8685
SUBC_9	2.6453	2.9372	3.2494	3.788	4.4394	5.2178	5.6979	5.3278	4.6309	3.7118	3.0029	2.628

Fuente: Elaboración propia.

## Evapotranspiración de un cultivo cualquiera

La ET (cultivo) se refiere a la evapotranspiración de un cultivo sin enfermedades que crece en un suelo fértil y con suficiente cantidad de agua para dar una producción plena (Fuentes y Cruz, 1990).

La evaporación de cualquier cultivo se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$ET (\text{cultivo}) = ETo \times Kc \quad (4.5)$$

ET (cultivo) = Evapotranspiración de cultivo, expresado en mm por día.

ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm por día.

K<sub>c</sub> = Coeficiente de cultivo.

El valor del coeficiente de cultivo K<sub>c</sub> varía con el propio cultivo y el período vegetativo.

### 1.1 Fases en el periodo vegetativo de un cultivo.

El periodo vegetativo de un cultivo, que abarca desde la siembra hasta la recolección, comprende cuatro fases (Fuentes y Cruz, 1990):

- **Fase inicial:** Abarca desde la siembra hasta que el cultivo cubre un 10% del suelo.
- **Fase de desarrollo del cultivo:** Abarca desde el final de la fase inicial hasta que el cultivo cubre la máxima superficie de suelo, aunque las plantas no hayan alcanzado todavía la altura máxima.
- **Fase de media estación:** En los cultivos que se recolectan maduros abarca desde el final de la fase anterior hasta la maduración. comprende la floración y la formación del fruto.
- **Fase de última estación:** Abarca desde la maduración hasta la recolección.

En el modelo se consideraron los cultivos de maíz de grano, cebada y avena, la duración aproximada de las fases que se consideraron para los tres tipos de cultivo son los valores, máximos que se muestran en la tabla 4.16.

Tabla 4. 16 Duración aproximada de las fases en el periodo vegetativo

DURACIÓN APROXIMADA DE LAS FASES EN EL PERIODO VEGETATIVO					
Cultivo	Total	Fase Inicial	Fase de desarrollo	Fase de media estación	Fase de última estación
Avena	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Cabada	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Maíz de grano	125-180	20-30	35-50	40-60	30-40

Fuente: Curso elemental de Riego, Fuentes y Cruz 1990.

## Determinación del coeficiente de cultivo.

Los coeficientes de cultivo en cada una de las cuatro fases de los cultivos antes mencionados se indican en la tabla 4.17.

Tabla 4. 17 Coeficientes de cultivo (Kc)

COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc)				
Cultivo	Fase Inicial	Fase de desarrollo	Fase de media estación	Fase de última estación
Avena	0.35	0.75	1.15	0.8
Cabada	0.35	0.75	1.15	0.45
Maíz de grano	0.4	0.8	1.15	0.7

Fuente: Curso elemental de Riego, Fuentes y Cruz 1990.

Los cultivos de avena (tabla 4.18), cebada (tabla 4.19) y maíz de grano (tabla 4.20), se siembran en el periodo de otoño-invierno que va de los meses de octubre a marzo, así que los cultivos se dividen en las cuatro fases del periodo vegetativo como se muestra en las tablas.

Tabla 4. 18 Fases del periodo vegetativo de la avena

AVENA	DURACIÓN	FECHA	Kc
Fase Inicial	15	De 20 octubre a 3 noviembre	0.35
Fase de desarrollo de cultivo	30	De 4 noviembre a 3 diciembre	0.75
Fase de media estación	65	De 4 diciembre a 6 febrero	1.15
Fase de última estación	40	De 7 febrero a 18 marzo	0.45
<b>Total</b>	<b>150</b>		

Fuente: Curso elemental de Riego, Fuentes y Cruz 1990.

Tabla 4. 19 Fases del periodo vegetativo de la cebada

CEBADA	DURACIÓN	FECHA	Kc
Fase Inicial	15	De 20 octubre a 3 noviembre	0.35
Fase de desarrollo de cultivo	30	De 4 noviembre a 3 diciembre	0.75
Fase de media estación	65	De 4 diciembre a 6 febrero	1.15
Fase de última estación	40	De 7 febrero a 18 marzo	0.45
<b>Total</b>	<b>150</b>		

Fuente: Curso elemental de Riego, Fuentes y Cruz 1990.

Tabla 4. 20 Fases del periodo vegetativo del maíz de grano

MAIZ DE GRANO	DURACIÓN	FECHA	Kc
Fase Inicial	30	De 01 octubre a 30 octubre	0.4
Fase de desarrollo de cultivo	50	De 31 octubre a 19 diciembre	0.8
Fase de media estación	60	De 20 diciembre a 17 febrero	1.15
Fase de última estación	40	De 18 febrero a 29 marzo	0.7
<b>Total</b>	<b>180</b>		

Fuente: Curso elemental de Riego, Fuentes y Cruz 1990.



### Cálculo de las necesidades de agua de un cultivo.

Ya contando con todos los datos se procedió al cálculo de las necesidades de agua de cultivo aplicando la formula 4.5 para cada subcuenca en cada mes. Para muestra de cómo se calcularon dichos datos se tomó la subcuenca Río Tijuana (Subc\_1) para los tres tipos de cultivos (tabla 4.21 y tabla 4.22).

Tabla 4. 21 Cálculo de las necesidades de agua durante el periodo vegetativo de la avena y cebada, para la subcuenca río Tijuana (subc\_1)

AVENA Y CEBADA						
Fecha	Duración días	Kc	ETo SUBC_1	ET (cultivo)mm por día	Necesidades por periodo	Necesidades por mes
De 20-10 a 31-10	12	0.35	4.3106	1.5087	18.1043	18.1043
De 01-11 a 03-11	3	0.35	3.6675	1.2836	3.8509	
De 04-11 a 30-11	27	0.75	3.6675	2.7506	74.2669	78.1178
De 01-12 a 03-12	3	0.75	3.2404	2.4303	7.2910	
De 04-12 a 31-12	28	1.15	3.2404	3.7265	104.3420	111.6329
De 01-01 a 31-01	31	1.15	3.3064	3.8024	117.8747	117.8747
De 01-02 a 06-02	6	1.15	3.6184	4.1611	24.9666	
De 07-02 a 28-02	22	0.45	3.6184	1.6283	35.8217	60.7883
De 01-03 a 18-03	18	0.45	3.9934	1.7970	32.3466	32.3466

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 22 Cálculo de las necesidades de agua durante el periodo vegetativo del maíz de grano, para la subcuenca de río Tijuana (subc\_1)

MAIZ DE GRANO						
Fecha	Duración días	Kc	ETo SUBC_1	ET (cultivo)mm por día	Necesidades por periodo	Necesidades por mes
De 1-10 a 30-10	30	0.4	4.3106	1.7242	51.7267	
De 31-10 a 31-10	1	0.8	4.3106	3.4484	3.4484	55.1751
De 01-11 a 30-11	30	0.8	3.6675	2.9340	88.0200	88.0200
De 01-12 a 19-12	19	0.8	3.2404	2.5923	49.2546	
De 20-12 a 31-12	12	1.15	3.2404	3.7265	44.7180	93.9726
De 01-01 a 31-01	31	1.15	3.3064	3.8024	117.8747	117.8747
De 01-02 a 17-02	17	1.15	3.6184	4.1611	70.7388	
De 18-02 a 28-02	11	0.7	3.6184	2.5328	27.8613	98.6001
De 01-03 a 29-03	29	0.7	3.9934	2.7954	81.0661	81.0661

Fuente: Elaboración propia.

## AVENA Y CEBADA

En la tabla 4.23 muestra las necesidades de agua por mes para los cultivos de avena y cebada, para cada subcuenca. Las subcuencas que están marcadas de color amarillo son a las que se les asignó estos cultivos.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 23 Necesidades de agua durante el periodo vegetativo de la avena y cebada para todas las subcuencas

Subcuencas	Necesidades por mes en mm						Suma
	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	
SUBC_3	16.961	68.795	95.973	101.633	52.595	28.650	364.607
SUBC_4	16.856	68.272	95.212	101.111	52.333	28.529	362.313
SUBC_5	17.105	69.685	97.984	103.819	53.583	29.125	371.301
SUBC_2	17.944	74.542	106.135	111.489	57.424	30.923	398.457
SUBC_6	17.272	70.394	98.930	104.576	53.857	29.345	374.374
SUBC_1	18.104	78.118	111.633	117.875	60.788	32.347	418.865
SUBC_12	18.294	77.288	110.123	115.778	59.443	31.678	412.604
SUBC_7	16.524	67.296	94.543	100.110	51.543	28.006	358.023
SUBC_11	18.139	76.012	108.150	114.280	58.725	31.471	406.778
SUBC_8	15.543	63.291	89.042	93.405	48.889	26.262	336.432
SUBC_10	16.912	69.697	98.820	105.446	53.286	28.850	373.011
SUBC_9	15.590	63.962	90.536	94.304	49.345	26.320	340.056

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.24 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para los cultivos de la avena y cebada para cada subcuenca. Estos porcentajes de requerimientos de agua representan la variación mensual, durante el periodo vegetativo, para las demandas agrícolas que se encuentran dentro de las subcuencas asignadas con dichos cultivos. Las subcuencas que están marcadas de color amarillo son a las que se les fijó estos cultivos.

Tabla 4. 24 Porcentajes de requerimientos para el periodo vegetativo de la avena y cebada para todas las subcuencas

Subcuencas	Porcentaje de requerimientos					
	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)
SUBC_3	4.65	18.87	26.32	27.87	14.43	7.86
SUBC_4	4.65	18.84	26.28	27.91	14.44	7.87
SUBC_5	4.61	18.77	26.39	27.96	14.43	7.84
SUBC_2	4.50	18.71	26.64	27.98	14.41	7.76
SUBC_6	4.61	18.80	26.43	27.93	14.39	7.84
SUBC_1	4.32	18.65	26.65	28.14	14.51	7.72
SUBC_12	4.43	18.73	26.69	28.06	14.41	7.68
SUBC_7	4.62	18.80	26.41	27.96	14.40	7.82
SUBC_11	4.46	18.69	26.59	28.09	14.44	7.74
SUBC_8	4.62	18.81	26.47	27.76	14.53	7.81
SUBC_10	4.53	18.69	26.49	28.27	14.29	7.73
SUBC_9	4.58	18.81	26.62	27.73	14.51	7.74

Fuente: Elaboración propia.

## MAÍZ DE GRANO

La tabla 4.25 muestra las necesidades de agua por mes para el cultivo de maíz de grano, para cada una de las subcuencas. Las subcuencas que están marcadas de color amarillo son a las que se les asignó este cultivo.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 25 Necesidades de agua durante el periodo vegetativo del maíz de grano para todas las subcuencas

Subcuencas	Necesidades por mes en mm						Suma
	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	
SUBC_3	51.691	77.516	80.790	101.633	85.310	71.803	468.743
SUBC_4	51.370	76.926	80.149	101.111	84.886	71.500	465.942
SUBC_5	52.129	78.518	82.483	103.819	86.913	72.993	476.855
SUBC_2	54.688	83.990	89.344	111.489	93.143	77.500	510.154
SUBC_6	52.639	79.317	83.279	104.576	87.358	73.543	480.712
SUBC_1	55.175	88.020	93.973	117.875	98.600	81.066	534.709
SUBC_12	55.753	87.085	92.702	115.778	96.417	79.390	527.126
SUBC_7	50.358	75.826	79.586	100.110	83.604	70.189	459.674
SUBC_11	55.280	85.648	91.041	114.280	95.254	78.873	520.376
SUBC_8	47.369	71.313	74.955	93.405	79.299	65.818	432.160
SUBC_10	51.542	78.532	83.187	105.446	86.431	72.302	477.440
SUBC_9	47.511	72.069	76.213	94.304	80.039	65.962	436.098

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.26 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para cada subcuenca. Estos porcentajes de requerimientos de agua representan la variación mensual, durante el periodo vegetativo, para las demandas agrícolas que se encuentran dentro de las subcuencas asignadas con dichos cultivos. Las subcuencas que están marcadas de color amarillo son a las que se les fijó este cultivo.

Tabla 4. 26 Porcentajes de requerimientos para el periodo vegetativo del maíz de grano para todas las subcuencas

Subcuencas	Porcentaje de requerimientos					
	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)
SUBC_3	11.03	16.54	17.24	21.68	18.20	15.32
SUBC_4	11.03	16.51	17.20	21.70	18.22	15.35
SUBC_5	10.93	16.47	17.30	21.77	18.23	15.31
SUBC_2	10.72	16.46	17.51	21.85	18.26	15.19
SUBC_6	10.95	16.50	17.32	21.75	18.17	15.30
SUBC_1	10.32	16.46	17.57	22.04	18.44	15.16
SUBC_12	10.58	16.52	17.59	21.96	18.29	15.06
SUBC_7	10.96	16.50	17.31	21.78	18.19	15.27
SUBC_11	10.62	16.46	17.50	21.96	18.30	15.16
SUBC_8	10.96	16.50	17.34	21.61	18.35	15.23
SUBC_10	10.80	16.45	17.42	22.09	18.10	15.14
SUBC_9	10.89	16.53	17.48	21.62	18.35	15.13

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.27 muestra el porcentaje de variación mensual que le corresponde a los tres tipos de cultivos en el periodo de siembra que va de octubre a marzo.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 27 Porcentajes de la variación mensual de agua para cada subcuenca de los diferentes cultivos

Cultivo	Subcuencas	Nombre	Porcentaje de requerimientos					
			ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)
Cebada y avena	SUBC_2	Río Alamar	4.5	18.71	26.64	27.98	14.41	7.76
	SUBC_5	Río Tecate	4.61	18.77	26.39	27.96	14.43	7.84
	SUBC_6	Río Seco	4.61	18.8	26.43	27.93	14.39	7.84
	SUBC_12	El Florido	4.43	18.73	26.69	28.06	14.41	7.68
Maíz de grano	SUBC_1	Río Tijuana	10.32	16.46	17.57	22.04	18.44	15.16
	SUBC_7	La Ciénega	10.96	16.5	17.31	21.78	18.19	15.27
	SUBC_8	Las Canoas	10.96	16.5	17.34	21.61	18.35	15.23
	SUBC_9	El Beltrán	10.89	16.53	17.48	21.62	18.35	15.13
	SUBC_10	Las Calabazas	10.8	16.45	17.42	22.09	18.1	15.14
	SUBC_11	Las Palmas	10.62	16.46	17.5	21.96	18.3	15.16

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.28 muestra el requerimiento mensual de agua que requiere para cada subcuenca, tomando los porcentajes de la tabla 4.27.

Tabla 4. 28 Volumen mensual de agua para cada subcuenca de los diferentes cultivos

Cultivo	Subcuencas	Nombre	Uso	requerimientos mensuales en m <sup>3</sup>					
			Agrícola m <sup>3</sup>	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
Cebada y avena	SUBC_2	Río Alamar	6,000	270.21	1,122.45	1,598.19	1,678.81	864.7	465.65
	SUBC_5	Río Tecate	164,360	7,571.59	30,846.59	43,373.40	45,956.68	23,719.12	12,892.64
	SUBC_6	Río Seco	96,495	4,451.88	18,144.05	25,499.21	26,954.50	13,881.77	7,563.62
	SUBC_12	El Florido	6,000	266.02	1,123.91	1,601.39	1,683.62	864.4	460.65
Maíz de grano	SUBC_1	Río Tijuana	0	0	0	0	0	0	0
	SUBC_7	La Ciénega	202,000	22,129.58	33,321.31	34,973.51	43,992.66	36,739.24	30,843.77
	SUBC_8	Las Canoas	984,000	107,855.55	162,375.74	170,668.21	212,678.13	180,558.20	149,864.02
	SUBC_9	El Beltrán	84,000	9,151.46	13,881.76	14,679.95	18,164.55	15,416.86	12,705.39
	SUBC_10	Las Calabazas	72,000	7,772.77	11,842.92	12,544.91	15,901.72	13,034.15	10,903.50
	SUBC_11	Las Palmas	329,000	34,950.26	54,149.45	57,559.21	72,252.02	60,222.90	49,866.22
<b>Total</b>			<b>1,943,855</b>	<b>194,419</b>	<b>326,808</b>	<b>362,498</b>	<b>439,263</b>	<b>345,301</b>	<b>275,565</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4 Determinación de los flujos de cabecera de los ríos que conforman la CRT

En esta sección se explica cómo se calcularon los flujos de cabecera de los ríos principales que conforman la Cuenca del Río Tijuana (CRT).

A continuación se presentan ejemplos de cómo se calcularon los flujos que se introdujeron en las cabeceras de los ríos principales que conforman la CRT, refiriéndose sólo para el año de 1969.

##### *Río Alamar (Subc\_2 Zona\_2)*

La tabla 4.29 muestra los volúmenes concesionados para cada uno de los diferentes tipos de usos que se encuentran en la subcuenca 2 ubicada en la zona 2, los cuales dan un volumen total de 30,353 m<sup>3</sup>. Para determinar el volumen mensual de una manera sencilla en la subcuenca se aplica la variación mensual constante a todos los usos, excepto el agrícola, ya que su consumo es invariable durante todo el año y por lo tal se aplica el 8.33%, que es lo mismo dividir entre los meses del año, dando un volumen mensual de 2,029.42 m<sup>3</sup>.

En cuanto al volumen que concierne para el uso agrícola se le asignan los porcentajes de requerimientos de agua por el tipo de cultivo que se aplicó en la subcuenca, que en este caso fue el de Avena y Cebada para el periodo de cultivo que va de octubre a marzo (tabla 4.30).

Tabla 4. 29 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca río Alamar de la Zona 2

Agrícola	Domestico	Pecuario	Pub- Urb.	Servicios	Total	Total - Agrícola	Mensual
6,000	1,220	3,713	16,500	2,920	30,353	24,353	2,029.42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 30 Requerimientos de agua para el cultivo de la avena y cebada en la subcuenca del Río Alamar

REQUERIMIENTOS EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	TOTAL
AVENA Y CEBADA (%)	4.5	18.71	26.64	27.98	14.41	7.76	100
REQ. AGRIC. (m <sup>3</sup> )	270.209	1,122.452	1,598.186	1,678.809	864.696	465.648	6,000

Fuente: Elaboración propia.

Ya contando con los requerimientos mensuales de todos los usuarios, se procede a sumar todos estos para que se introduzcan como escurrimientos de cabecera.

Los escurrimientos que se introducen en la cabecera de los ríos están compuestos como se muestra en la tabla 4.31, donde se observa que se suman los escurrimientos por ríos (calculados en la sección

3.2), requerimiento mensual de los usuarios y el requerimiento agrícola (que va de octubre a marzo). Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca:

Tabla 4. 31 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Alamar (zona 2) para el año de 1969

Año 1969		Escurrimientos por río	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurrimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurrimientos (m³)				
ENE	134,200.776	134,200.776 +	2,029.417 +	1,678.809 =	137,909.0
FEB	1,108,401.00	1,108,401.0 +	2,029.417 +	864.696 =	1,111,295
MAR	193,119.111	193,119.111 +	2,029.417 +	465.648 =	195,614
ABR	65,067.881	65,067.881 +	2,029.417 +	0 =	67,097.3
MAY	11,894.759	11,894.759 +	2,029.417 +	0 =	13,924.2
JUN	21,939.844	21,939.844 +	2,029.417 +	0 =	23,969.3
JUL	15,174.074	15,174.074 +	2,029.417 +	0 =	17,203.5
AGO	11,427.005	11,427.005 +	2,029.417 +	0 =	13,456.4
SEP	1,422.586	1,422.586 +	2,029.417 +	0 =	3,452.0
OCT	22,269.864	22,269.864 +	2,029.417 +	270.209 =	24,569.5
NOV	2,797.621	2,797.621 +	2,029.417 +	1,122.452 =	5,949.49
DIC	8,882.548	8,882.548 +	2,029.417 +	1,598.186 =	12,510.2

Fuente: Elaboración propia.

### Río Alamar (Subc\_2 Zona\_3)

En esta parte de la subcuenca del Río Alamar, no se encuentra uso agrícola, sólo se encuentra el de servicios, así que el volumen anual es de 900,000 m<sup>3</sup> y por lo tanto da un volumen mensual de 75,000 m<sup>3</sup> (tabla 4.32).

Tabla 4. 32 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca río Alamar de la parte de la Zona 3

Servicios	Total	Mensual
900,000	900,000	75,000

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.33):

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 33 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Alamar (zona 3) para el año de 1969

Año 1969		Escurreimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurreimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurreimientos (m³)				
ENE	196,425.02	196,425.02	75,000	0	271,425.02
FEB	198,853.959	198,853.959	75,000	0	273,853.959
MAR	54,784.826	54,784.826	75,000	0	129,784.826
ABR	5,284.586	5,284.586	75,000	0	80,284.586
MAY	8,485.102	8,485.102	75,000	0	83,485.102
JUN	2,499.657	2,499.657	75,000	0	77,499.657
JUL	269.789	269.789	75,000	0	75,269.789
AGO	2,417.702	2,417.702	75,000	0	77,417.702
SEP	63.459	63.459	75,000	0	75,063.459
OCT	991.378	991.378	75,000	0	75,991.378
NOV	31,480.969	31,480.969	75,000	0	106,480.969
DIC	17,287.612	17,287.612	75,000	0	92,287.612

Fuente: Elaboración propia.

**Tecate (Subc\_5)**

En la subcuenca de Tecate se tiene un volumen total anual de 172,245 m³ y su volumen mensual es de 657.08 m³ (tabla 4.34).

Tabla 4. 34 Volúmenes anuales (m³) de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Tecate.

Agrícola	Domestico	Pecuario	Total	Total - Agrícola	Mensual
164,360	3,895	3,990	172,245	7,885	657.08

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.35 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada para la subcuenca de Tecate así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 35 Requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada en la subcuenca Tecate

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
AVENA Y CEBADA (%)	4.61	18.77	26.39	27.96	14.43	7.84	100
REQ. AGRIC. (m³)	7,571.59	30,846.562	43,373.410	45,956.68	23,719.1	12,893	164,360

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.36):

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 36 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Tecate para el año de 1969

Año 1969		Escurreimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurreimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurreimientos (m³)				
ENE	922,250.196	922,250.196 +	657.083 +	45,956.68 =	968,863.959
FEB	2,235,570.22	2,235,570.22 +	657.083 +	23,719.1 =	2,259,946.421
MAR	498,872.851	498,872.851 +	657.083 +	12,893 =	512,422.573
ABR	109,225.668	109,225.668 +	657.083 +	0 =	109,882.752
MAY	48,745.233	48,745.233 +	657.083 +	0 =	49,402.316
JUN	52,010.774	52,010.774 +	657.083 +	0 =	52,667.858
JUL	12,501.004	12,501.004 +	657.083 +	0 =	13,158.088
AGO	4,000.248	4,000.248 +	657.083 +	0 =	4,657.330
SEP	19,802.646	19,802.646 +	657.083 +	0 =	20,459.730
OCT	42,830.378	42,830.378 +	657.083 +	7,571.591 =	51,059.053
NOV	74,036.740	74,036.740 +	657.083 +	30,846.562 =	105,540.386
DIC	98,554.40	98,554.40 +	657.083 +	43,373.410 =	142,584.894

Fuente: Elaboración propia.

### **Río Seco (Subc\_6)**

En la subcuenca de Río Seco se tiene un volumen total anual de 110,058 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 1,130.25 m<sup>3</sup> (tabla 4.37).

Tabla 4. 37 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca del río Seco

Agrícola	Domestico	Pecuario	Acuacultura	Total	Total - Agrícola	Mensual
96,495	360	7,978	5,225	110,058	13,563	1,130.25

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.38 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada para la subcuenca de Río Seco, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 38 Requerimientos de agua para el cultivo de avena y cebada en la subcuenca río Seco

REQUERIMIENTOS AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
AVENA Y CEBADA (%)	4.61	18.8	26.43	27.93	14.39	7.84	100
REQ. AGRIC. (m³)	4,451.879	18,144.021	25,499.211	26,954.5	13,881.771	7,563.618	96,495

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.39):



Tabla 4. 39 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del río Seco para el año de 1969

Año 1969		Escurremientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurremientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurremientos (m³)				
ENE	149,909.762	149,909.762 +	1,130.25 +	26,954.50 =	177,994.5
FEB	1,563,790.735	1,563,790.735 +	1,130.25 +	13,881.771 =	1,578,803.0
MAR	274,835.41	274,835.410 +	1,130.25 +	7,563.618 =	283529.3
ABR	65,486.129	65,486.129 +	1,130.25 +	0 =	66,616.38
MAY	19,468.098	19,468.098 +	1,130.25 +	0 =	20,598.35
JUN	25,611.919	25,611.919 +	1,130.25 +	0 =	26,742.17
JUL	8,415.027	8,415.027 +	1,130.25 +	0 =	9,545.277
AGO	7,414.028	7,414.028 +	1,130.25 +	0 =	8,544.278
SEP	24,712.359	24,712.359 +	1,130.25 +	0 =	25,842.61
OCT	27,155.144	27,155.144 +	1,130.25 +	4,451.879 =	32,737.27
NOV	3,977.472	3,977.472 +	1,130.25 +	18,144.021 =	23,251.74
DIC	9,905.221	9,905.221 +	1,130.25 +	25,499.211 =	36,534.68

Fuente: Elaboración propia.

### La Ciénega (Subc\_7)

En la subcuenca La Ciénega se tiene un volumen total anual de 257,985 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 4,665.42 m<sup>3</sup> (tabla 4.40).

Tabla 4. 40 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca La Ciénega

Agrícola	Domestico	Pecuario	Total	Total - Agrícola	Mensual
202,000	605	55,380	257,985	55,985	4,665.42

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.41 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para la subcuenca La Ciénega, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 41 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca La Ciénega

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
MAÍZ (%)	10.96	16.5	17.31	21.78	18.19	15.27	100
REQ. AGRIC. (m³)	22,129.58	33,321.229	34,973.509	43,992.663	36,739.246	30,843.77	202,000

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.42):

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 42 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo la Ciénega para el año de 1969

Año 1969		Escurremientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurremientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurremientos (m³)				
ENE	265,143.202	265,143.202 +	4665.42 +	43,992.663 =	313,801.281
FEB	1,291,816.568	1,291,816.57 +	4665.42 +	36,739.246 =	1,333,221.231
MAR	222,521.392	222,521.392 +	4665.42 +	30,843.77 =	258,030.577
ABR	50,624.041	50,624.041 +	4665.42 +	0 =	55,289.458
MAY	25,870.722	25,870.722 +	4665.42 +	0 =	30,536.139
JUN	12,385.634	12,385.634 +	4665.42 +	0 =	17,051.050
JUL	8,063.512	8,063.512 +	4665.42 +	0 =	12,728.928
AGO	6,551.276	6,551.276 +	4665.42 +	0 =	11,216.693
SEP	33,837.866	33,837.866 +	4665.42 +	0 =	38,503.283
OCT	10,159.154	10,159.154 +	4665.42 +	22,129.58 =	36,954.155
NOV	14,590.854	14,590.854 +	4665.42 +	33,321.229 =	52,577.50
DIC	12,550.698	12,550.698 +	4665.42 +	34,973.509 =	52,189.623

Fuente: Elaboración propia.

### Las Canoas (Subc\_8)

En la subcuenca Las Canoas se tiene un volumen total anual de 1, 008,385 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 2,032.08 m<sup>3</sup> (tabla 4.43).

Tabla 4. 43 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Canoas

Agrícola	Domestico	Pecuario	Total	Total - Agrícola	Mensual
984,000	1,100	23,285	1,008,385	24,385	2,032.08

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.44 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para la subcuenca Las Canoas, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 44 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca Las Canoas

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
MAÍZ (%)	10.96	16.5	17.34	21.61	18.35	15.23	100
REQ. AGRIC.(m³)	107,855.523	162,375.926	170,668.2	212,678	180,558	149,864	984,000

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.45):

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 45 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo Las Canoas para el año de 1969

Año 1969		Escurremientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurremientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurremientos (m³)				
ENE	122,493.734	122,493.734 +	2,032.08 +	212,678 =	337,203.9472
FEB	972,604.428	972,604.428 +	2,032.08 +	180,558 =	1,155,194.718
MAR	180,850.907	180,850.907 +	2,032.08 +	149,864 =	332,747.003
ABR	39,744.510	39,744.510 +	2,032.08 +	0 =	41,776.594
MAY	15,251.383	15,251.383 +	2,032.08 +	0 =	17,283.467
JUN	6,301.740	6,301.740 +	2,032.08 +	0 =	8,333.824
JUL	3,894.389	3,894.389 +	2,032.08 +	0 =	5,926.472
AGO	7,695.814	7,695.814 +	2,032.08 +	0 =	9,727.897
SEP	31,783.735	31,783.735 +	2,032.08 +	0 =	33,815.818
OCT	4,860.336	4,860.336 +	2,032.08 +	107,855.523 =	114,747.942
NOV	6,662.075	6,662.075 +	2,032.08 +	162,375.926 =	171,070.084
DIC	6,165.824	6,165.824 +	2,032.08 +	170,668.2 =	178,866.110

Fuente: Elaboración propia.

**El Beltrán (Subc\_9)**

En la subcuenca El Beltrán se tiene un volumen total anual de 92,150 m³ y su volumen mensual es de 679.17 m³ (tabla 4.46).

Tabla 4. 46 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Beltrán

Agrícola	Domestico	Pecuario	Total	Total - Agrícola	Mensual
84,000	275	7,875	92,150	8,150	679.17

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.47 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para la subcuenca El Beltrán, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 47 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca El Beltrán

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
MAÍZ (%)	10.89	16.53	17.48	21.62	18.35	15.13	100
REQ. AGRIC. m³	9,151.466	13,881.79	14,679.95	18,164.549	15,416.9	12,705.39	84,000

Fuente: Elaboración propia.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.48):

Tabla 4. 48 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Beltrán para el año de 1969

Año 1969		Escurrimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurrimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurrimientos (m³)				
ENE	92,143.763	92,143.763 +	679.17 +	18,164.549 =	110,987.479
FEB	752,093.45	752,093.45 +	679.17 +	15,416.9 =	768,189.477
MAR	142,399.062	142,399.062 +	679.17 +	12,705.39 =	155,783.619
ABR	31,180.468	31,180.468 +	679.17 +	0 =	31,859.635
MAY	10,319.864	10,319.864 +	679.17 +	0 =	10,999.031
JUN	3,110.608	3,110.608 +	679.17 +	0 =	3,789.774
JUL	2,070.669	2,070.669 +	679.17 +	0 =	2,749.836
AGO	5,193.030	5,193.030 +	679.17 +	0 =	5,872.197
SEP	24,238.947	24,238.947 +	679.17 +	0 =	24,918.113
OCT	2,408.888	2,408.888 +	679.17 +	9,151.466 =	12,239.521
NOV	3,529.262	3,529.262 +	679.17 +	13,881.79 =	18,090.216
DIC	4,169.287	4,169.287 +	679.17 +	14,679.95 =	19,528.400

Fuente: Elaboración propia.

### Las Calabazas (Subc\_10)

En la subcuenca Las Calabazas se tiene un volumen total anual de 97,630 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 2,135.833 m<sup>3</sup> (tabla 4.49).

Tabla 4. 49 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Calabazas

Agrícola	Domestico	Pecuario	Total	Total - Agrícola	Mensual
72,000	385	25,245	97,630	25,630	2,135.83

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.50 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para la subcuenca Las Calabazas, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 50 Requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano en la subcuenca Las Calabazas

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
MAÍZ (%)	10.8	16.45	17.42	22.09	18.1	15.14	100
REQ. AGRIC. (m³)	7,772.77	11,842.952	12,544.908	15,901.72	13,034.15	10,903.5	72,000

Fuente: Elaboración propia.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.51):

Tabla 4. 51 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo Las Calabazas para el año de 1969

Año 1969		Escurremientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurremientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurremientos (m³)				
ENE	193,893.164	193,893.164 +	2,135.83 +	15,901.72 =	211,930.715
FEB	1,403,959.22	1,403,959.22 +	2,135.83 +	13,034.15 =	1,419,129.201
MAR	233,693.8	233,693.80 +	2,135.83 +	10,903.5 =	246,733.138
ABR	55,849.691	55,849.691 +	2,135.83 +	0 =	57,985.525
MAY	17,449.091	17,449.091 +	2,135.83 +	0 =	19,584.924
JUN	4,597.091	4,597.091 +	2,135.83 +	0 =	6,732.924
JUL	13,975.684	13,975.684 +	2,135.83 +	0 =	16,111.517
AGO	3,854.954	3,854.954 +	2,135.83 +	0 =	5,990.788
SEP	21,784.044	21,784.044 +	2,135.83 +	0 =	23,919.878
OCT	2,976.892	2,976.892 +	2,135.83 +	7,772.77 =	12,885.495
NOV	5,835.077	5,835.077 +	2,135.83 +	11,842.952 =	19,813.863
DIC	7,341.774	7,341.774 +	2,135.83 +	12,544.908 =	22,022.515

Fuente: Elaboración propia.

### ***Las Palmas (Subc\_11)***

En la subcuenca Las Calabazas se tiene un volumen total anual de 369,799 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 3,399.92 m<sup>3</sup> (tabla 4.52).

La tabla 4.53 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para el cultivo de maíz de grano para la subcuenca Las Calabazas, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 52 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca Las Palmas

Agrícola	Domestico	Pecuario	Pub. Urb.	Servicios	Total	Total - Agrícola	Mensual
329,000	110,058	29,272	80,100,000	10,500	369,799	40,799	3,399.92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 53 Requerimientos de agua para el cultivo del maíz de grano en la subcuenca Las Palmas

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
MAÍZ (%)	10.62	16.46	17.5	21.96	18.3	15.16	100
REQ. AGRIC. (m³)	34,950.25	54,149.399	57,559	72,252	60,222.9	49,866.22	<b>329,000</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.54):

Tabla 4. 54 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Las Palmas para el año de 1969

Año 1969		Escurrimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurrimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurrimientos (m³)				
ENE	296,426.544	296,426.544 +	3,399.92 +	72,252 =	372,078.484
FEB	1,075,738.75	1,075,738.75 +	3,399.92 +	60,222.9 =	1,139,361.565
MAR	175,699.617	175,699.617 +	3,399.92 +	49,866.22 =	228,965.749
ABR	47,114.899	47,114.899 +	3,399.92 +	0 =	50,514.816
MAY	31,641.010	31,641.010 +	3,399.92 +	0 =	35,040.927
JUN	17,992.878	17,992.878 +	3,399.92 +	0 =	21,392.794
JUL	3,580.713	3,580.713 +	3,399.92 +	0 =	6,980.630
AGO	7,129.539	7,129.539 +	3,399.92 +	0 =	10,529.456
SEP	3,643.448	3,643.448 +	3,399.92 +	0 =	7,043.364
OCT	2,439.486	2,439.486 +	3,399.92 +	34,950.25 =	40,789.651
NOV	15,402.259	15,402.259 +	3,399.92 +	54,149.399 =	72,951.574
DIC	9,869.797	9,869.797 +	3,399.92 +	57,559 =	70,828.928

Fuente: Elaboración propia.

### *El Florido (Subc\_12\_Loc\_3)*

En esta parte de la subcuenca de El Florido (zona 3) se tiene un volumen total anual de 6,767 m<sup>3</sup> y su volumen mensual es de 63.92 m<sup>3</sup> (tabla 4.55).

Tabla 4. 55 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Florido en la zona 3

Agrícola	Domestico	Pecuario	Servicios	Total	Total - Agrícola	Mensual
6,000	0	767	0	6,767	767	63.92

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.56 muestra los porcentajes de requerimientos de agua para los cultivos de avena y cebada para la subcuenca El Florido en la parte de la zona 3, así como el volumen que les corresponde para cada mes del periodo agrícola (este volumen se obtuvo multiplicando el volumen anual concesionado para uso agrícola por los porcentajes de requerimiento).

Tabla 4. 56 Requerimientos de agua para los cultivos de la avena y cebada en la subcuenca El Florido en la zona 3

REQUERIMIENTOS DE AGUA EN EL USO AGRÍCOLA							
CULTIVO	ET (oct.)	ET (nov.)	ET (dic.)	ET (ene.)	ET (feb.)	ET (mar.)	Total
AVENA Y CEBADA (%)	4.43	18.73	26.69	28.06	14.41	7.68	100
REQ. AGRIC. (m³)	266.024	1,123.910	1,601.39	1,683.6	864.4	460.652	6,000

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cómo se calcularon los escurrimientos que se introdujeron en WEAP para el año de 1969 en esta subcuenca (tabla 4.57):

Tabla 4. 57 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Florido en la zona 3 para el año de 1969

Año 1969		Escurreimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurreimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurreimientos (m³)				
ENE	24,807.576	24,807.576 +	63.92 +	1,683.6 =	121,200.738
FEB	359,016.968	359,016.968 +	63.92 +	864.4 =	411,299.313
MAR	66,970.275	66,970.275 +	63.92 +	460.6524 =	72,098.378
ABR	23,938.220	23,938.220 +	63.92 +	0 =	25,556.914
MAY	33,08.859	3,308.859 +	63.92 +	0 =	9,199.847
JUN	9,054.568	9,054.568 +	63.92 +	0 =	12,392.075
JUL	573.642	573.642 +	63.92 +	0 =	734.706
AGO	2,443.660	2,443.660 +	63.92 +	0 =	3,020.900
SEP	66.600	66.600 +	63.92 +	0 =	150.843
OCT	1,031.828	1,031.828 +	63.92 +	266.024 =	1,597.004
NOV	308.070	308.070 +	63.92 +	1,123.9096 =	6,161.387
DIC	944.036	944.036 +	63.92 +	1,601.39 =	6,107.725

Fuente: Elaboración propia.

### *El Florido (Subc\_12\_Loc\_4)*

En esta parte de la subcuenca de El Florido (zona 4) se tiene un volumen total anual concesionado de 126,166,672 m<sup>3</sup>, este volumen está considerando el volumen asignado para G.E. Hidroeléctrica, el cual no se consideró pues no es un uso consuntivo por lo que se resta para obtener un volumen anual de 22,672 m<sup>3</sup> y un volumen mensual de 1,889.33 m<sup>3</sup> (tabla 4.58). En esta parte de subcuenca no se tiene ningún uso agrícola.

Tabla 4. 58 Volúmenes anuales de los diferentes tipos de usos en la subcuenca El Florido en la zona 4

Agr.	Dom.	Pecuario	Servicio	G.E. Hidroeléctrica	Total	SUMA-G.E.	Mensual
0	0	2,672	20,000	126,144,000	126,166,672	22,672	1,889.33

Fuente: Elaboración propia.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 59 Cálculo de los escurrimientos introducidos en la cabecera del Arroyo El Florido en la zona 4 para el año de 1969

Año 1969		Escurrimientos por ríos	Requerimiento por usos no agrícolas	Requerimiento Agrícola	Escurrimientos por ríos más usos (m³)
Meses	Escurrimientos (m³)				
ENE	30,741.235	30,741.24 +	1,889.33 +	0	= 32,630.568
FEB	406,663.274	406,663.27 +	1,889.33 +	0	= 408,552.607
MAR	76,008.594	76,008.59 +	1,889.33 +	0	= 77,897.927
ABR	28,400.797	28,400.797 +	1,889.33 +	0	= 30,290.130
MAY	3,571.248	3,571.248 +	1,889.33 +	0	= 5,460.581
JUN	11,460.522	11,460.522 +	1,889.33 +	0	= 13,349.856
JUL	918.688	918.688 +	1,889.33 +	0	= 2,808.021
AGO	439.325	439.325 +	1,889.33 +	0	= 2,328.658
SEP	1,136.912	1,136.912 +	1,889.33 +	0	= 3,026.246
OCT	2,244.244	2,244.244 +	1,889.33 +	0	= 4,133.577
NOV	313.825	313.825 +	1,889.33 +	0	= 2,203.158
DIC	1,384.748	1,384.748 +	1,889.33 +	0	= 3,274.081

Fuente: Elaboración propia.

### ***Río Tijuana (Subc\_1)***

En la subcuenca del Río Tijuana sólo se consideran los escurrimientos por río (tabla 4.60), debido a que no se localizan demandas que extraigan agua directamente del río.

Tabla 4. 60 Escurrimientos introducidos en la cabecera del Río Tijuana para el año de 1969

Escurrimientos por río (m³)		Escurrimientos por río (m³)	
AÑO	1969	AÑO	1969
ENE	3,689,129.36	JUL	843.595587
FEB	3,142,375.98	AGO	12,344.9137
MAR	861,202.786	SEP	1,459.41377
ABR	131,128.389	OCT	15,973.2139
MAY	187,818.275	NOV	743,395.228
JUN	132,519.104	DIC	346,897.52

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente la tabla 4.61 muestra los flujos de cabecera anuales, de los ríos que se ubican en la CRT para un periodo que va de 1969 a 1998.



Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 61 Flujos de cabecera de los ríos que conforman la cuenca del río Tijuana

AÑOS	FLUJOS DE CABECERA (hm <sup>3</sup> )									
	RÍO TIJUANA	RÍO ALAMAR	RÍO TECATE	RÍO SECO	ARROYO LA CIENEGA	ARROYO LAS CANOAS	RÍO EL BELTRAN	ARROYO LAS CALABAZAS	RÍO LAS PALMAS	ARROYO EL FLORIDO
1969	9.265	3.046	4.291	2.291	2.212	2.407	1.165	2.063	2.056	1.255
1970	7.122	1.404	1.379	0.296	0.476	1.138	0.187	0.275	0.635	0.163
1971	5.058	1.233	1.084	0.188	0.420	1.087	0.145	0.200	0.528	0.095
1972	4.514	1.277	1.049	0.207	0.400	1.098	0.155	0.219	0.546	0.152
1973	7.899	1.830	2.482	0.759	1.033	1.487	0.427	0.707	1.134	0.416
1974	5.652	1.266	0.975	0.144	0.349	1.046	0.122	0.153	0.512	0.090
1975	6.698	1.425	1.381	0.254	0.445	1.118	0.175	0.238	0.595	0.162
1976	12.777	2.085	2.132	0.594	1.000	1.443	0.414	0.661	1.612	0.625
1977	8.579	1.404	1.393	0.145	0.336	1.055	0.129	0.152	0.468	0.071
1978	15.544	10.317	14.220	12.240	12.207	10.701	7.605	12.473	10.564	6.506
1979	9.332	7.775	9.749	7.436	6.968	5.982	3.875	7.122	6.962	4.442
1980	17.166	20.886	32.682	30.767	28.336	22.175	16.223	26.585	20.637	13.093
1981	8.267	3.297	4.038	2.793	2.933	3.143	1.638	2.520	2.442	2.188
1982	8.398	4.983	7.095	6.719	6.916	5.975	3.631	5.716	5.264	3.491
1983	23.667	21.381	34.908	24.542	24.042	19.045	12.899	21.276	20.662	11.093
1984	8.030	4.399	5.165	1.103	1.345	1.687	0.575	1.056	1.615	2.923
1985	9.129	4.132	6.269	1.431	1.641	2.126	0.859	1.146	1.594	3.966
1986	10.737	5.864	8.363	1.615	1.912	2.271	1.007	1.616	1.795	1.715
1987	10.646	2.638	2.745	0.714	1.339	1.912	0.611	0.759	1.182	1.334
1988	9.221	4.143	6.205	1.369	1.474	1.823	0.679	0.993	1.636	0.707
1989	3.694	1.140	0.701	0.150	0.289	1.023	0.106	0.122	0.416	0.054
1990	4.342	1.275	0.836	0.199	0.430	1.111	0.160	0.201	1.179	0.184
1991	13.442	8.516	13.896	0.263	0.755	1.161	0.194	0.370	2.029	0.458
1992	12.208	4.717	7.181	3.839	4.185	3.702	1.990	3.458	4.375	2.927
1993	20.007	20.476	31.385	24.857	20.926	16.576	11.270	17.156	19.251	12.706
1994	10.909	7.340	11.360	2.631	2.999	2.798	1.240	1.982	2.915	1.412
1995	21.850	17.436	26.799	15.797	10.499	6.949	5.166	10.387	11.203	7.338
1996	7.371	5.048	7.041	0.973	1.231	1.557	0.479	0.884	1.402	1.541
1997	7.865	1.669	1.850	0.394	0.602	1.202	0.223	0.341	1.430	0.228
1998	20.999	16.029	22.633	20.567	18.238	13.447	7.673	13.964	17.730	10.070

Fuente: Elaboración propia.

## **4.2 Modelación de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP**

En esta segunda parte se llevó a cabo la realización del modelo de gestión de los recursos hídricos de la Cuenca del Río Tijuana (CRT) en la plataforma WEAP.

El WEAP, como se comentó anteriormente, fue desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI por sus siglas en inglés), es una herramienta práctica para la planificación de recursos hídricos, se distingue por su enfoque integrado para simular sistemas de abastecimiento de agua. Los modelos WEAP permiten especificar escenarios de cantidad, calidad, demandas (escenarios de manejo de agua) y simular el comportamiento del sistema de manejo de cuenca a lo largo del tiempo (Yates et al, 2005a y 2005b). Pero para este trabajo en particular solo nos concretaremos en la creación del modelo con todos sus recursos hídricos y su validación.

Para realizar el modelo de la cuenca en WEAP es necesario considerar una serie de actividades de forma secuencial y ordenada. Entre ellas es posible resaltar las siguientes:

1. Revisión del sistema de modelación Water Evaluation And Planning System (WEAP), para definir la información necesaria para la construcción del modelo de simulación de la gestión de las aguas superficiales de la CRT;
2. Recopilación de información espacial, tabular, series de tiempo y de derechos de agua de la cuenca (hidrografía, climatología, acuíferos, embalses, usos, etc.).
3. Establecer la red esquemática del sistema en WEAP mediante la determinación de ríos, presas, sitios de demanda, acueductos, acuíferos, etc. y el establecimiento de todas las ligas y relaciones entre ellos.
4. Análisis y procesamiento de la información, series de tiempo (hidrometría, evaporación, etc.), cálculo de escurrimientos naturales, análisis de la demanda, etc.
5. Generar escenario de referencia del modelo mediante la alimentación de las condiciones actuales y la configuración del periodo de simulación y el paso de tiempo (mensual en este caso).
6. Validar el modelo para un periodo determinado.

### 4.2.1 Información Requerida para Construir el Modelo en WEAP

Para modelar la gestión de las aguas superficiales de una cuenca a través de WEAP y en este caso de la CRT es necesario disponer de la siguiente información:

1. **Ríos o corrientes naturales** (mapa en formato shape que servirá para la digitalización de la red de ríos en el entorno de trabajo del WEAP y con ello definir su ubicación espacial):
  - a) Volumen de escurrimientos acumulado mensual en la cabecera de los ríos o puntos de interés como embalses o aportaciones intermedias (intercuencas).
2. **Derivaciones** (mapa en formato shape con la ubicación de las diferentes infraestructuras de derivación para definir su ubicación espacial):
  - a) Punto de salida;
  - b) Punto de retorno;
  - c) Capacidad máxima de derivación (capacidad de transporte de la infraestructura) o volúmenes máximos derivados mensualmente.
3. **Embalses** (mapa en formato shape con la ubicación de las diferentes infraestructuras de almacenamiento para definir su ubicación espacial):
  - a) Flujos mensuales de entradas a los embalses (si no están conectados a ningún río);
  - b) Capacidad de almacenamiento (NAME);
  - c) Volumen de Almacenamiento inicial;
  - d) Curva elevación-área-capacidad;
  - e) Lámina de evaporación neta media mensual;
  - f) Volumen máximo de agua (nivel de conservación);
  - g) Nivel máximo de operación (NAMO);
  - h) Nivel mínimo de operación (NAMINO);
  - i) Fracción de agua disponible mensualmente para extraer.
4. **Otras fuentes** (plantas desalinizadoras, trasvasos)
  - a) Fuentes (número y ubicación espacial);
  - b) Volumen mensual de entrada.
5. **Sitios de demanda existentes** (agrícolas, urbanos, industriales, etc.)
  - a) Sitios de demanda (número, ubicación espacial y prioridad de suministro);
  - b) Usos del Agua;
  - c) Volumen anual concesionado o asignado;
  - d) Distribución mensual de la demanda anual;
  - e) Volumen consumido;
  - f) Superficie regada;
  - g) Población servida;
  - h) Pérdidas y reusos;

- i) Pérdidas en los sitios de demanda (perdidas en red de agua potable);
- j) Reuso de agua en los sitios de demanda.

**6. Líneas de conducción de agua entre fuentes y sitios de demanda**

- a) Preferencia de suministro de una fuente a un sitio de demanda asignada a la línea de conducción;
- b) Volumen máximo mensual que puede suministrar la línea de conducción;
- c) Porcentaje máximo mensual de la demanda que debe suministrar la línea de conducción;
- d) Pérdidas en la conducción.

**7. Generación de energía (hidroeléctricas) (en el presente estudio no se llevó a cabo la modelación de generación de energía eléctrica)**

- a) Presas hidro-eléctricas (número y ubicación espacial);
- b) Mini hidro-eléctricas a lo largo del río (número y ubicación espacial);
- c) Flujo mínimo de turbinado;
- d) Flujo máximo de turbinado;
- e) Carga de trabajo de las turbinas;
- f) Carga en el tramo de río de la mini-eléctrica;
- g) Porcentaje mensual de trabajo de las turbinas;
- h) Eficiencia de generación de las turbinas.

**8. Flujos de retorno**

- a) Rutas de retorno para un mismo sitio de demanda;
- b) Porcentaje de flujo retornando por cada ruta;
- c) Pérdidas por evaporación y percolación en una ruta de retorno.

**9. Requerimientos de flujo**

- a) Flujo mínimo ambiental promedio mensual;
- b) Flujo mínimo social o recreativo promedio mensual;
- c) Prioridad del flujo.

**10. Estaciones hidrométricas**

- a) Estaciones hidrométricas (número y ubicación espacial);
- b) Series de tiempo de escurrimientos en las estaciones.

**11. Plantas de tratamiento de agua residuales**

- a) Capacidad instalada.
- b) Eficiencia de operación.

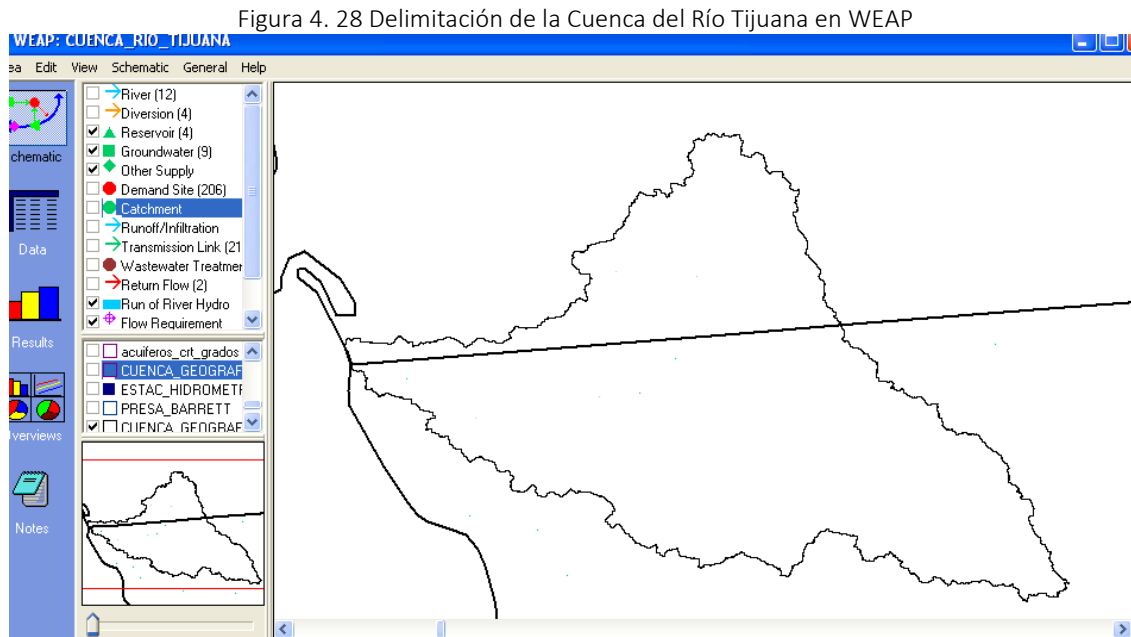
## 4.2.2 Modelación en WEAP de la Cuenca Río Tijuana

Para llevar a cabo la modelación de la Cuenca del Río Tijuana es necesario recopilar la información requerida en WEAP, para que posteriormente se realice el modelo en forma esquemática, y así introducir la información.

### 4.2.2.1 Elaboración del esquema en WEAP

Como paso inicial es necesario crear en WEAP los primeros elementos como la delimitación de la cuenca, los ríos principales y sus tributarios, las presas, las demandas, etc. Esta información se obtuvo por el Colegio de la Frontera Norte (COLEF), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

La delimitación de la cuenca y subcuencas como se explicó en la sección 4.1.1, se obtuvo del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante la metodología ArcHydro y las herramientas de la extensión del mismo nombre del software ArcGis. La delimitación de la cuenca únicamente se adhiere como un mapa dentro de la simulación de WEAP (figura 4.28).



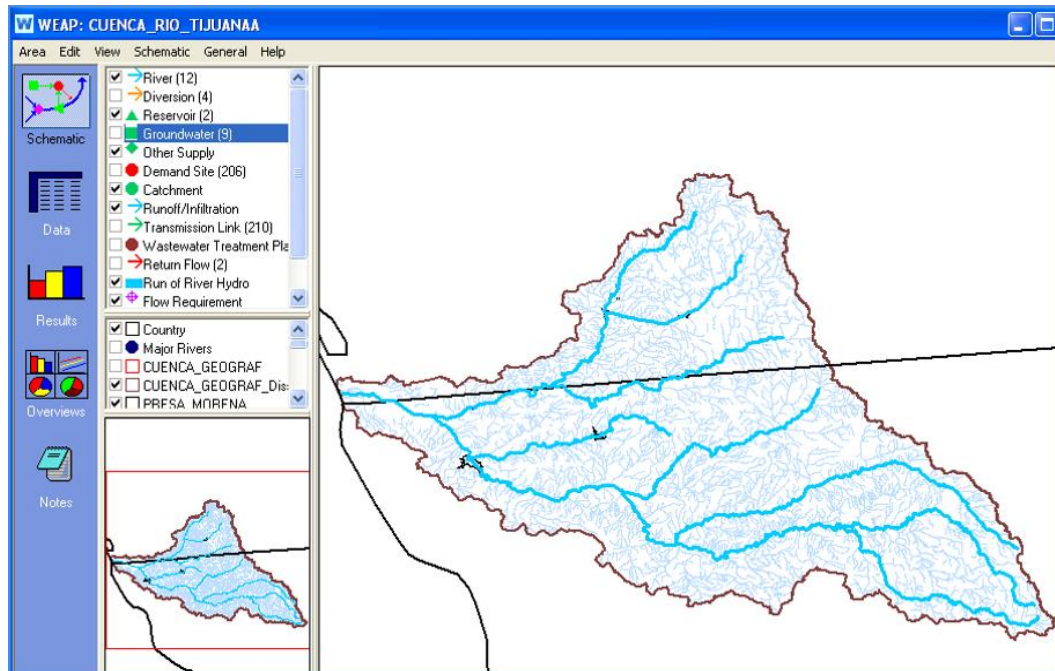
Fuente: Elaboración propia.

La vista esquemática es el punto de partida para todas las actividades realizadas en WEAP. Una característica central en WEAP es que su interfaz gráfica del tipo “arrastrar y soltar” permite una gran facilidad para describir y visualizar las características físicas de los sistemas de suministro y demanda de agua. Capas de SIG pueden agregarse para proporcionar más claridad.

#### 4.2.2.2 Ríos o corrientes naturales

Como se comentó anteriormente, la información principal para llevar a cabo el modelo es conocer y ubicar los ríos o corrientes naturales que se encuentran en la CRT. Para ello se obtuvo la información del USGS e INEGI y dicha información se introdujo a WEAP mediante una capa SIG que se utilizó como una plantilla para crear los ríos en WEAP como se muestra en la figura 4.29.

Figura 4. 29 Creación de los ríos principales de la CRT en WEAP



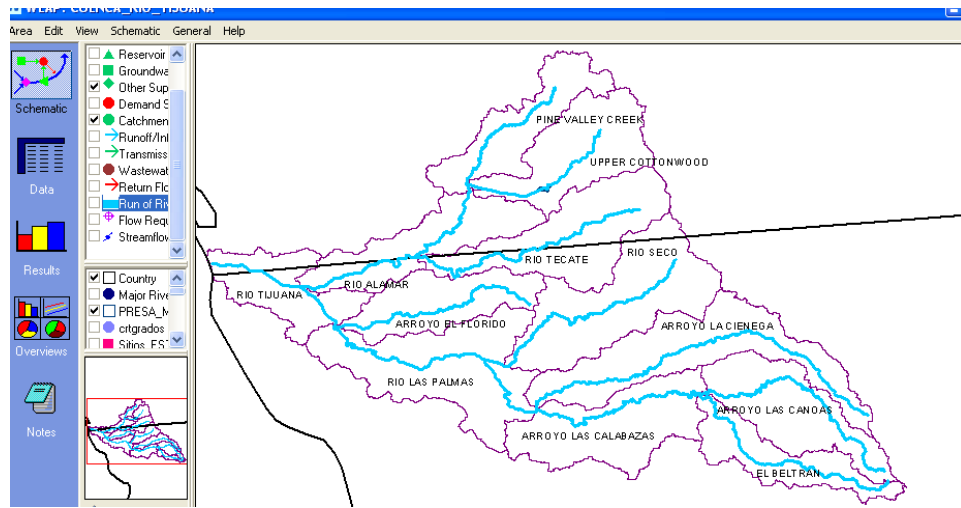
Fuente: Elaborado a partir de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

Los ríos y arroyos más importantes que se encuentran en la Cuenca del Río Tijuana y que se incorporaron al modelo son los siguientes (figura 4.30):

- Río Tijuana.
- Río Las Palmas.
- Río Alamar (Cottonwood Creek).
- Río Tecate (Campo Creek).
- Río El Beltrán.
- Río Seco.
- Arroyo La Ciénega.
- Arroyo Las Calabazas.
- Arroyo El Florido.
- Arroyo Las Canoas.
- Pine Valley Creek.
- Upper Cottonwood Creek.

Cabe mencionar que se establece un río por subcuenca.

Figura 4. 30 Ríos y arroyos de la Cuenca del Río Tijuana

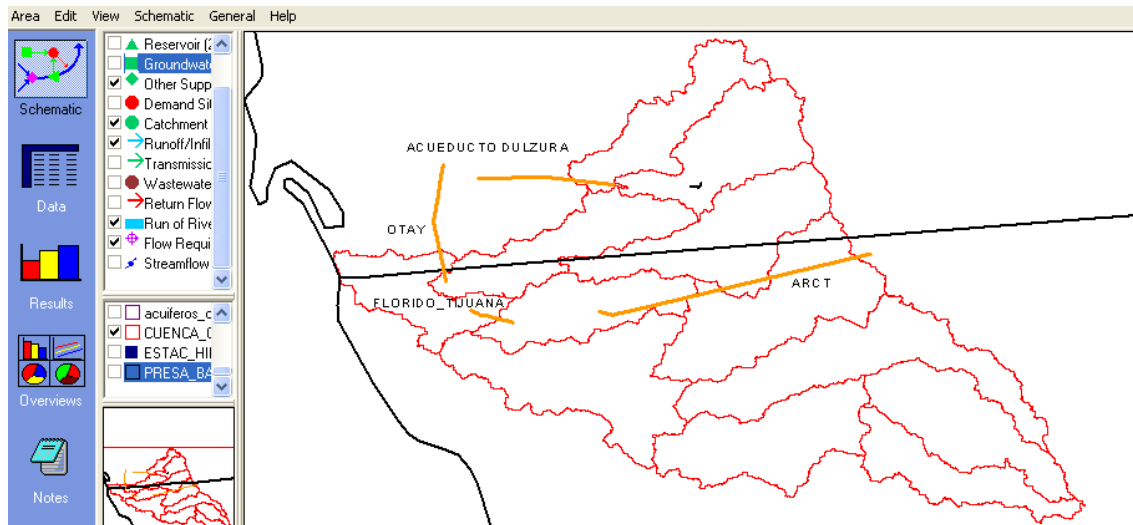


Fuente: Elaborado a partir de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

### 4.2.2.3 Derivaciones

En el modelo de la Cuenca del Río Tijuana se consideraron colocar cuatro derivaciones las cuales representan al Acueducto Rio Colorado-Tijuana (ARCT), al Acueducto Dulzura, la Conexión de Emergencia de La Mesa de Otay y la línea de conducción de la potabilizadora El Florido\_Tijuana como se muestra en la figura 4.31.

Figura 4. 31 Derivaciones en la cuenca del Río Tijuana

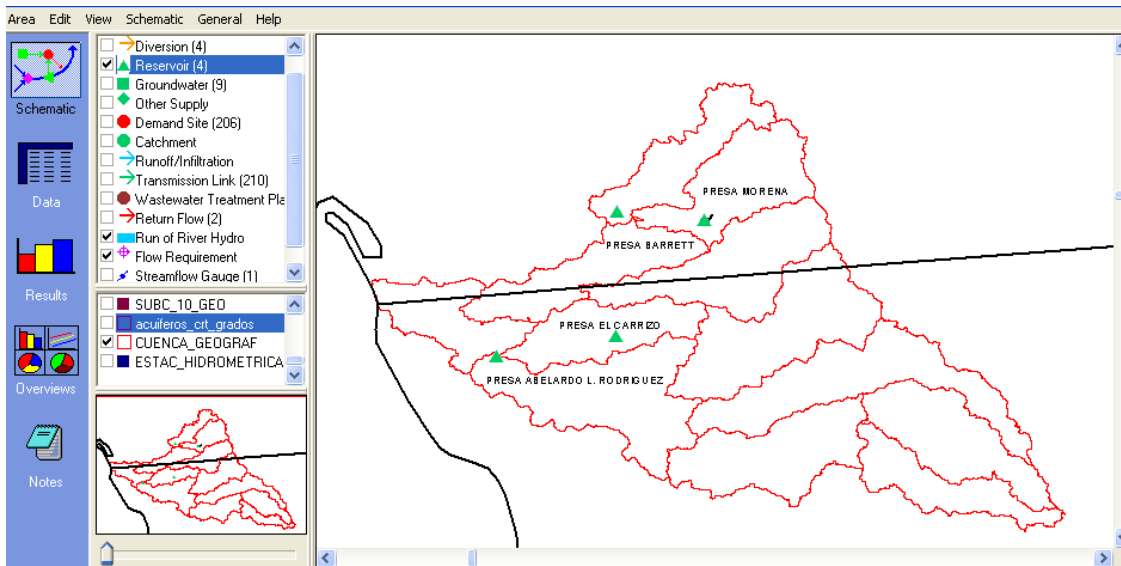


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.4 Presas

La CRT cuenta con cuatro presas, dos de las cuales se encuentran del lado Mexicano y las otras dos del lado de Estados Unidos (figura 4.32). Las presas del lado mexicano son la presa Abelardo L. Rodríguez que se ubica en el municipio de Tijuana y la presa de El Carrizo que se localiza en el municipio de Tecate. Las que se encuentran del lado de Estados Unidos son la Presa Morena y Barrett, dichas presas se encuentran en el condado de San Diego y se emplean para captar y conducir el agua que se produce en las zonas altas del norte de la cuenca del río Tijuana, hacia la ciudad de San Diego.

Figura 4. 32 Presas que se ubican en la Cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaboración propia a partir de: Conagua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. [http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm) / <http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>

Las presas Barret y Morena no se consideran en la simulación del modelo pues se trasvasa toda el agua que captan hacia la presa de Otay, únicamente se consideró el Acueducto Dulzura para establecer dicho trasvase. Esto es, los escurrimientos del Pine Valley Creek y del Upper Cottonwood Creek en el modelo se derivan por el Acueducto Dulzura fuera de la cuenca sin establecer el efecto de la infraestructura (las presas). La tabla 4.62 muestra las capacidades de almacenamiento que tienen las cuatro presas que se ubican en la CRT.

Tabla 4. 62 Presas que se ubican en la Cuenca del Río Tijuana

Nombre Presa	Capacidad Almacenamiento (hm <sup>3</sup> )
Abelardo L. Rodríguez	138.0
El Carrizo	43.56
Morena	61.93
Barrette	55.21

Fuente: Elaboración propia a partir de: Conagua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. [http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm) / <http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>

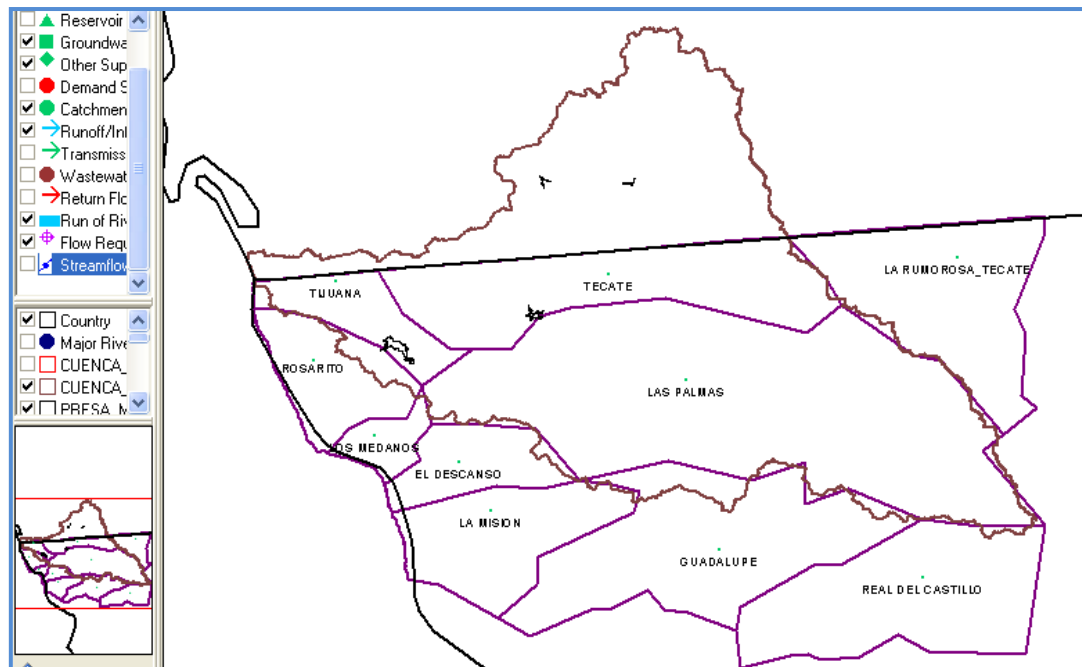


#### 4.2.2.5 Acuíferos

En la cuenca del Río Tijuana del lado mexicano se tienen dentro y cerca de ésta diez acuíferos, los cuales son: Tecate (clave: 0202), Tijuana (clave: 0201), Las Palmas (0205), La Rumorosa-Tecate (0236), Rosarito (0245), Los Medanos (0204), El Descanso (0203), La Misión (0206), Guadalupe (0207) y Real del Castillo (0248) ver figura 4.33.

Para llevar a cabo el modelado de la cuenca en WEAP se ubicaron los diez acuíferos, pero sólo se consideraron los acuíferos de Tecate, Tijuana y Las Palmas, para unirse a las demandas que representan a las ciudades de Tecate y Tijuana, ya que son éstos los que proporcionan principalmente agua a estas ciudades. La tabla 4.63 se muestra su recarga, descarga, volumen concesionado, volumen de extracción y el déficit que presentan los tres acuíferos.

Figura 4. 33 Acuíferos que se encuentran dentro y cerca de la Cuenca del Río Tijuana



Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA. Subdirección General de Programación. Estadísticas del Agua en México, Edición 2008.

Tabla 4. 63 Acuíferos que se encuentran dentro de la cuenca del Río Tijuana

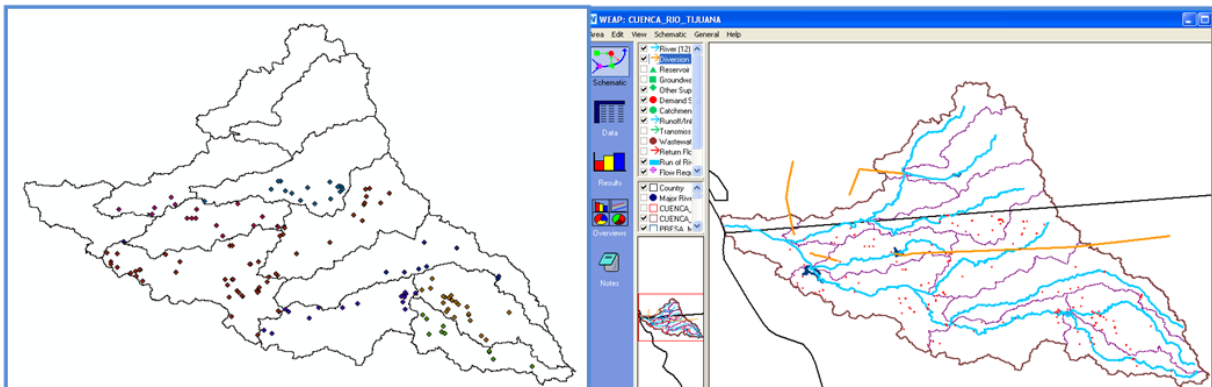
Clave	Acuífero	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	Déficit
0201	Tijuana	16.00	0.00	16.08	11.30	0.00	-0.08
0202	Tecate	10.10	0.00	11.86	11.00	0.00	-1.76
0205	Las Palmas	10.50	3.50	11.24	7.90	0.00	-4.24

Nomenclatura: R: Recarga total media anual; DNCOM: Descarga natural comprometida; VCAS: Volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: Volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; D: Disponibilidad media anual de agua subterránea.

#### 4.2.2.6 Sitios de Demanda

Los sitios de demanda que se colocaron en el modelo fue gracias a la información que proporcionó la CONAGUA mediante el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA, 2008) en lo referente a aguas superficiales. En dicha información se encuentra la ubicación espacial (latitud y longitud) de los usuarios, así como los usos (Agrícola, Doméstico, Público-Urbano, Acuicultura, Pecuario, Consuntivo, Ambiental e Industrial) y volúmenes que tienen concesionados. Con la ubicación espacial se determinó que usuarios pertenecen a cada subcuenca (figura 4.34) y con los usos se determinó el volumen que le corresponde a cada uno de ellos (tabla 4.64). El número total de sitios de demanda que se ubicaron en el modelo fue de 206, donde 53 son agrícolas, 28 domésticos, 115 pecuarios, 2 públicos-urbanos (representan las ciudades de Tecate y Tijuana), 6 servicios y 2 plantas potabilizadoras (representan El Florido y A. L. Rodríguez).

Figura 4. 34 Usuarios ubicados por subcuencas



Fuente: Elaboración propia.

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 4. 64 Clasificación de los usuarios por subcuencas y tipos de usos

APROVECHAMIENTOS SUPERFICIALES INSCRITOS EN EL "REPDA" POR SUBCUENCAS															
<b>EL BELTRAN</b>	<b>10</b>	<b>92,150.00 m³/año</b>											<b>TOTALES</b>		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA						
PRIMER USO	84000	2		6188	8									90188.00	10
SEGUNDO USO				1687	2									1687.00	2
TERCER USO			275.00	1										275.00	1
<b>TOTALES</b>	84000	2	275	1	7875	10	0	0	0	0	0	0	0	<b>92,150.00</b>	<b>13</b>
<b>EL FLORIDO</b>	<b>6</b>	<b>LOC_4 (PARTE_2) 126,165,905.00 m³/año</b>											<b>TOTALES</b>		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA						
PRIMER USO			1905	4			20000	1	1E+08	1				126165905.00	6
SEGUNDO USO														0.00	0
TERCER USO														0.00	0
<b>TOTALES</b>	0	0	0	0	1905	4	0	0	0	0	20000	1	0	<b>126,165,905.00</b>	<b>6</b>
<b>EL FLORIDO</b>	<b>5</b>	<b>LOC_3 (PARTE_1) 6,767.00 m³/año</b>											<b>TOTALES</b>		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA						
PRIMER USO	6000	1		420	3			0	1					6420.00	5
SEGUNDO USO				347	1									347.00	1
TERCER USO														0.00	0
<b>TOTALES</b>	6000	1	0	0	767	4	0	0	0	0	0	0	0	<b>6,767.00</b>	<b>6</b>
<b>LA CIENEGA</b>	<b>9</b>	<b>257,985.00 m³/año</b>											<b>TOTALES</b>		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA						
PRIMER USO	202000	5		1400	4									203400.00	9
SEGUNDO USO			385.00	2	53980	3								54365.00	5
TERCER USO			220.00	1										220.00	1
<b>TOTALES</b>	202000	5	605	3	55380	7	0	0	0	0	0	0	0	<b>257,985.00</b>	<b>15</b>
<b>LAS CALABAZAS</b>	<b>18</b>	<b>97,630.00 m³/año</b>											<b>TOTALES</b>		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA						
PRIMER USO	72000	3	275.00	1	24997	14								97272.00	18
SEGUNDO USO			110.00	1	248	1								358.00	2
TERCER USO														0.00	0
<b>TOTALES</b>	72000	3	385	2	25245	15	0	0	0	0	0	0	0	<b>97,630.00</b>	<b>20</b>

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

LAS CANDAS 21 1,008,385.00 m <sup>3</sup> /año														TOTALES		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA							
PRIMER USO	984000	13		6015	8										990015.00	21
SEGUNDO USO			275.00	1	17270	10								17545.00	11	
TERCER USO			825.00	3										825.00	3	
TOTALES	984000	13	1100	4	23285	18	0	0	0	0	0	0	0	1,008,385.00	35	

LAS PALMAS 40 80,469,799.00 m <sup>3</sup> /año														TOTALES		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA							
PRIMER USO	329000	11		23038	27	88,100,000.00	1			10500	1			80462538.00	40	
SEGUNDO USO			247.00	2	6234	6								6481.00	8	
TERCER USO			780.00	3										780.00	3	
TOTALES	329000	11	1027	5	29272	33	80100000	1	0	0	0	10500	1	80,469,799.00	51	

RÍO ALAMAR 5 LOC_2 30,353.00 m <sup>3</sup> /año														TOTALES		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA							
PRIMER USO	6000	1	1000.00	1	913	1	16500	1		2920	1			27333.00	5	
SEGUNDO USO					2800	1								2800.00	1	
TERCER USO			220.00	1										220.00	1	
TOTALES	6000	1	1220	2	3713	2	16500	1	0	0	0	2920	1	30,353.00	7	

RÍO ALAMAR 1 LOC_3 900,000.00 m <sup>3</sup> /año														TOTALES		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA							
PRIMER USO							900000	1						900000.00	1	
SEGUNDO USO														0.00	0	
TERCER USO														0.00	0	
TOTALES	0	0	0	0	0	0	900000	1	0	0	0	0	0	900,000.00	1	

RÍO TIJUANA 1 0.00 m <sup>3</sup> /año														TOTALES		
	AGRICOLA	DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULTIPLES	IND.	SERVICIOS	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA							
PRIMER USO								0	1					0.00	1	
SEGUNDO USO														0.00	0	
TERCER USO														0.00	0	
TOTALES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	1	

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

<b>TECATE</b>														<b>TOTALES</b>				
<b>18</b>		<b>172,245.00 m<sup>3</sup>/año</b>																
	AGRICOLA		DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULTIPLES	IND.	SERVICIOS	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA								
PRIMER USO	<b>164360</b>	<b>11</b>	<b>975.00</b>	<b>2</b>	<b>2721</b>	<b>5</b>											<b>168056.00</b>	<b>18</b>
SEGUNDO USO			<b>2920.00</b>	<b>5</b>	<b>844</b>	<b>3</b>											<b>3764.00</b>	<b>8</b>
TERCER USO					<b>425</b>	<b>2</b>											<b>425.00</b>	<b>2</b>
<b>TOTALES</b>	<b>164360</b>	<b>11</b>	<b>3895</b>	<b>7</b>	<b>3990</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>172,245.00</b>	<b>28</b>

<b>RÍO SECO</b>														<b>TOTALES</b>				
<b>17</b>		<b>110,058.00 m<sup>3</sup>/año</b>																
	AGRICOLA		DOM.	PECUARIO	PUB_URB	MULT.	IND.	SERV.	COMERCIO	G.E. HIDROELECTRICA	ACUACULTURA							
PRIMER USO	<b>96495</b>	<b>6</b>	<b>110.00</b>	<b>1</b>	<b>7043</b>	<b>9</b>						<b>5225</b>	<b>1</b>	<b>108873.00</b>	<b>17</b>			
SEGUNDO USO			<b>250.00</b>	<b>2</b>	<b>930</b>	<b>2</b>								<b>1180.00</b>	<b>4</b>			
TERCER USO					<b>5</b>	<b>1</b>								<b>5.00</b>	<b>1</b>			
<b>TOTALES</b>	<b>96495</b>	<b>6</b>	<b>360</b>	<b>3</b>	<b>7978</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>110,058.00</b>	<b>22</b>			

Fuente: Elaboración propia con información del REPDA 2008.

La tabla 4.65 se muestra la cantidad de usuarios que se encuentran en cada una de las subcuencas, los usos que estos presentan así como los niveles en los que se presentan (primero, segundo y tercer uso), un ejemplo de ello es la subcuenca El Beltrán la cual cuenta con diez usuarios, pero dos usuarios presenta más de un uso (tabla 4.65), esto quiere decir que uno tiene asignado tres usos y el otro tiene asignado dos usos, por tal motivo la cantidad de los sitios de demanda para dicha subcuenca es de trece y su volumen anual concesionado para uso agrícola es de 84,000 m<sup>3</sup>, domestico 275 m<sup>3</sup> y pecuario 7,875 m<sup>3</sup> teniendo un total de volumen anual concesionado de 92,150 m<sup>3</sup>.

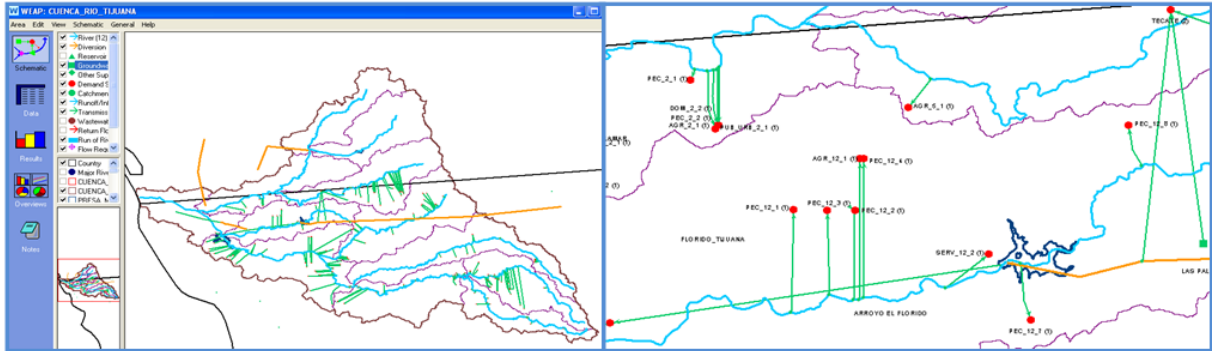
Tabla 4. 65 Usuarios de la subcuenca El Beltrán y sus tipos de usos

<b>El Beltrán (Subc_9)</b>									
<b>TITULO(USUARIOS)</b>	<b>PRIM_VOL</b>	<b>SEGUN_VOL</b>	<b>TERC_VOL</b>	<b>VOL_TOTAL</b>	<b>PRIM_USO</b>	<b>SEGUN_USO</b>	<b>TERC_USO</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>
01BCA105661/01GOG99	614	0	0	614.00	PEC.(1)			32.188	-116.079
01BCA105662/01GOG99	614	0	0	614.00	PEC.(2)			32.204	-116.089
01BCA107072/01GOG99	955	0	0	955.00	PEC.(3)			32.173	-115.992
01BCA105660/01IDGR99	60,000	777	275	61,052.00	AGR.(1)	PEC.(4)	DOM.(1)	32.206	-116.089
01BCA105854/01GOG99	910	0	0	910.00	PEC.(5)			32.261	-116.193
01BCA105855/01GOG99	910	0	0	910.00	PEC.(6)			32.244	-116.188
01BCA105858/01GOG99	910	0	0	910.00	PEC.(7)			32.287	-116.238
01BCA105861/01GHGR99	910	0	0	910.00	PEC.(8)			32.277	-116.230
01BCA104739/01GOG98	365	0	0	365.00	PEC.(9)			32.244	-116.224
01BCA105856/01IKGR99	24,000	910	0	24,910.00	AGR.(2)	PEC.(10)		32.249	-116.196
<b>Total</b>				<b>92,150.00</b>					<b>m<sup>3</sup></b>

#### **4.2.2.7 Conectores de transferencia de agua entre fuentes y sitios de demanda**

En el modelo se colocaron un total de 210 conectores de transferencia (Transmisión links), de los cuales 202 van a las demandas de tipo doméstico, pecuario, servicios y agrícola. Los 8 conectores de transferencia faltantes son los que van de la Presa El Carrizo al sitio de demanda de la potabilizadora “El Florido”, dos conectores de transferencia que salen de la presa Abelardo L. Rodríguez a la demanda de la potabilizadora “A.L. Rodríguez” y a la demanda de la potabilizadora “El Florido”, otro conector de transferencia que va de la derivación “Tijuana\_Florido” al sitio de demanda de “Tijuana” y de la derivación “Acueducto del Río Colorado-Tijuana (ARTC)” a la demanda de la ciudad de “Tecate”. Los últimos tres conectores de transferencia son los que se colocaron de los acuíferos a los sitios de demanda de las ciudades de Tijuana y Tecate. Donde dos van de los acuíferos de Tecate y Las Palmas a la demanda de la ciudad de Tecate y el otro va del acuífero de Tijuana a la demanda de la ciudad de Tijuana (figura 4.35).

Figura 4. 35 Conectores de transferencia (Transmisión links) que van de fuentes de abastecimientos (ríos) a sitios de demanda en WEAP

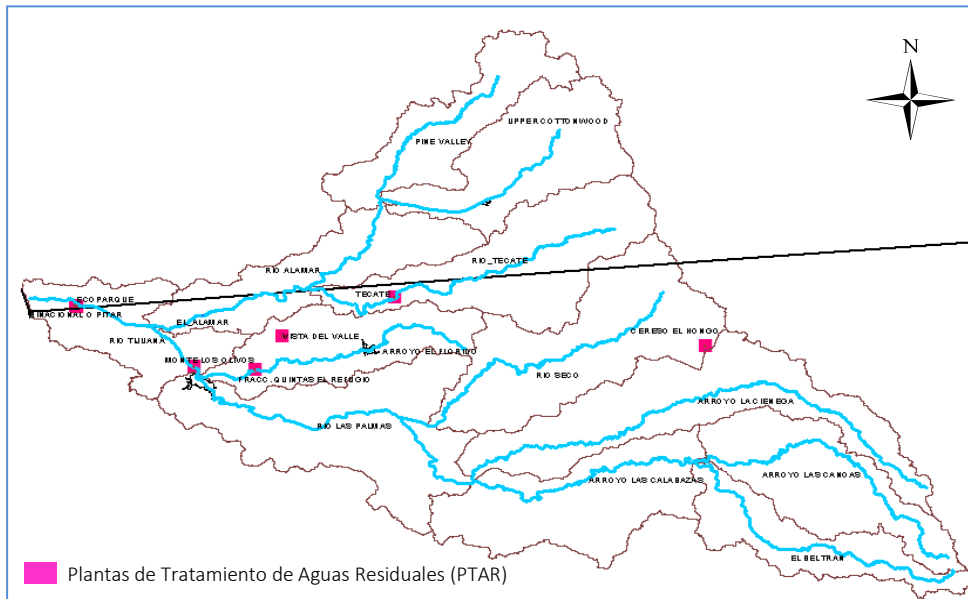


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.8 Plantas de tratamiento de aguas residuales

En el modelo sólo se consideraron siete plantas de tratamiento de aguas residuales (figura 4.36), que son las que se encuentran dentro de la cuenca y en funcionamiento, porque el total de plantas que se encuentran en los municipios de Tijuana y Tecate son doce.

Figura 4. 36 Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales

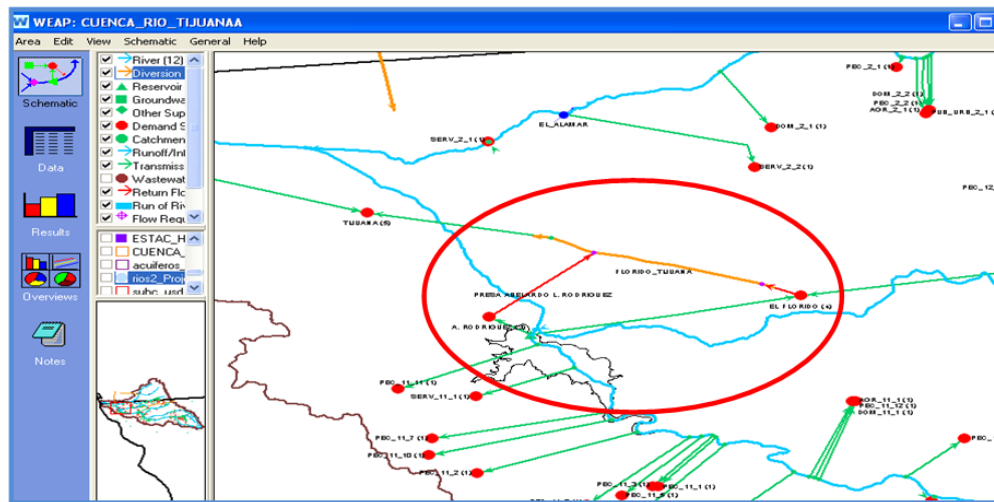


Fuente: Elaboración propia con base en el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, 2008.

#### 4.2.2.9 Flujos de retorno

En el modelo se consideraron solo dos flujos de retorno, los cuales van de la demanda de la potabilizadora “El Florido” a la derivación “Tijuana\_Florido”, y el otro va de la potabilizadora “A.L. Rodríguez” a la derivación “Tijuana\_Florido” (figura 4.37). Estos retornos son más bien un artificio para enviar el agua de las dos potabilizadoras al acueducto o línea de conducción que la distribuirá a la ciudad de Tijuana. Los sitios de demanda por ser principalmente de agricultura de temporal, domésticos y pecuarios se consideran que no tienen un retorno. Los sitios de demanda público-urbanos y servicios debería tener un retorno hacia plantas de tratamiento de aguas residuales.

Figura 4. 37 Flujos de retorno establecidos en el esquema de WEAP



Fuente: Elaboración propia.

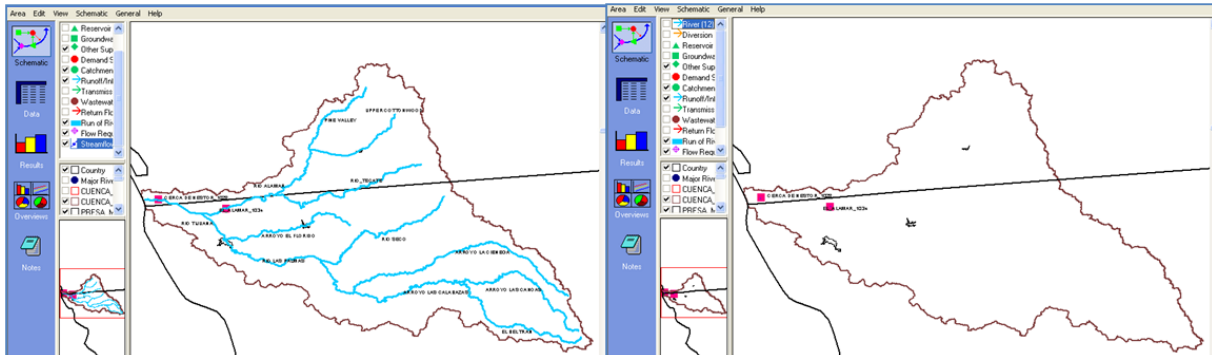
#### 4.2.2.10 Estaciones hidrométricas

En el modelo se consideran dos estaciones hidrométricas que son El Alamar (1034) que se encuentra ubicada en la subcuenca del río Alamar, y Cerca de Néstor (1028) la cual se encuentra ubicada en la subcuenca del río Tijuana y que se encuentra muy cerca de la desembocadura del río Tijuana (figura 4.38). La estación El Alamar, contiene información hidrométrica que va de 1979 a 1996; y la estación Cerca de Néstor tiene información de 1969 a 1981<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Banco Nacional de Datos de Agua Superficial (BANDAS).



Figura 4. 38 Ubicación de las estaciones hidrométricas en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

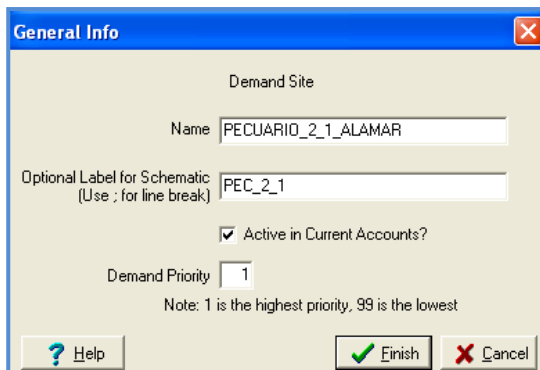
### 4.2.3 Entrada de datos a WEAP

En esta sección se mostrará la manera en cómo se dedujeron e introdujeron los datos que requiere el modelo en WEAP para llevar a cabo la gestión de los recursos.

#### 4.2.3.1 Sitios de Demanda

Los sitios de demanda como ya se comentó anteriormente corresponden a los 206 usuarios de aguas superficiales que están registrados en el REPDA (2008) y se encuentran dentro de la cuenca. Cuando se coloca un sitio de demanda en WEAP aparece un cuadro, al cual se le tiene que asignar un nombre y una prioridad (las prioridades van de 1 a 99, siendo 1 el valor de mayor prioridad) como se muestra en la figura 4.39. El nombre que se les asignó a los sitios de demanda representa el tipo de uso, el número de subcuenca y el número de uso (tabla 4.66), como se muestra a continuación:

Figura 4. 39 Nombramiento de los sitios de demanda en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

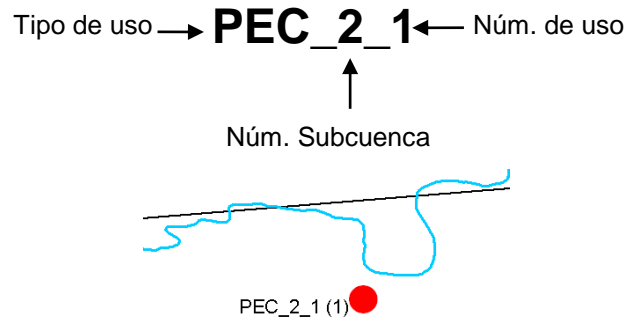


Tabla 4. 66 Información de usuarios que se encuentran en la subcuenca del Río Alamar (Subc\_2)

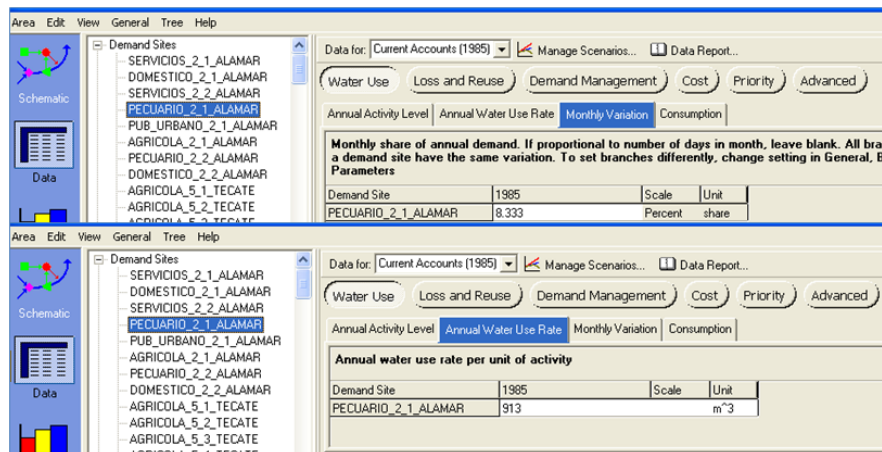
Río Alamar (Subc_2)									
TITULO	PRIM_VOL	SEGUN_VOL	TERC_VOL	VOL_TOTAL	PRIM_USO	SEGUN_USO	TERC_USO	LATITUD	LONGITUD
01BCA109243/01EDOC07	900000	0	0	900,000.00	SERV. (1)			32.518	-116.920
01BCA103399/01COGR98	1000	0	0	1,000.00	DOM. (1)			32.523	-116.838
01BCA109332/01EOGR05	2920	0	0	2,920.00	SERV. (2)			32.508	-116.844
01BCA105825/01GOG99	913	0	0	913.00	PEC. (1)			32.546	-116.802
01BCA107811/01HDGR99	16500	0	0	16,500.00	PUB URB (1)			32.529	-116.793
01BCA107812/01IDGR99	6000	2800	220	9,020.00	AGRI. (1)	PEC. (2)	DOM. (2)	32.530	-116.793
<b>Total</b>				<b>930,353.00</b>					

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las prioridades todos los sitios de demanda de tipo pecuario, servicio, doméstico y agrícola se les asignó la prioridad de uno, pues ellos toman agua directamente de los ríos y no se cuenta con un control para su suministro. Las otras demandas varían su prioridad, ya que la demanda que representa a la ciudad de Tecate tiene una prioridad de dos, la ciudad de Tijuana tiene una prioridad de cinco (pues recibe aguas de las potabilizadoras), las demandas que representan a las potabilizadoras A.L. Rodríguez y El Florido sus prioridades son tres y cuatro respectivamente. Estas prioridades son importantes ya que establecen la manera en que WEAP satisficará sus requerimientos.

Una vez que se introdujeron todos los sitios de demanda en el modelo de la cuenca con sus respectivos nombres que los identifican y prioridades, se alimentó el resto de la información, por ejemplo en la figura 4.40 se muestra la información de la demanda mensual y su consumo. Las demandas y consumos en WEAP, en este caso fueron introducidas manualmente, pero en otras ocasiones son tomadas por medio de archivos creados en Excel, y leídos por medio de una función de WEAP llamada "Read from File". Estas función se encarga de leer la demanda del usuario con bases en su columna correspondiente así como los consumos. Cabe aclarar que los consumos están dados en porcentaje, es decir que para cada mes, del agua que se demande sólo se consumirá la que se establece a través del porcentaje (estos porcentajes se estimaron en la sección 4.1.3).

Figura 4. 40 Introducción de datos en los sitios de demanda en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

Las demandas que corresponden a los usuarios de tipo agrícola, doméstico, pecuario y servicios se determinaron con base a los volúmenes concesionados por el REPDA, teniendo en conjunto una demanda de 3,045,552 m<sup>3</sup> anuales. Donde el 68% de lo demandado corresponde para uso agrícola, 31% para uso de servicios y el 1% para uso doméstico y pecuario.

Para las demandas de la ciudad de Tijuana y Tecate se determinaron también con base a las concesiones que se tienen en el REPDA del 2008. Teniendo así una demanda anual para la ciudad de Tijuana de 107,939,206 m<sup>3</sup> y para Tecate de 18,561,421 m<sup>3</sup>.

La demanda de la Potabilizadora A.L. Rodríguez se le asignó una demanda anual de 18,921,600 m<sup>3</sup>, esta demanda se determinó por la capacidad máxima (0.6 m<sup>3</sup>/s) que tiene la línea de conducción que lleva el agua de la presa Abelardo L. Rodríguez a la Potabilizadora.

La demanda de la potabilizadora El Florido se le asignó una demanda anual de 12,614,4000 m<sup>3</sup> que se determinó por su capacidad instalada de 4m<sup>3</sup>/s.

### **4.2.3.2 Ríos o corrientes naturales**

Como se mencionó anteriormente la Cuenca del Río Tijuana está integrado por doce ríos principales, donde a cada uno de estos se le introdujo en su cabecera los escurrimientos que se calcularon en la sección 4.1.4 (ver tabla 3.54)

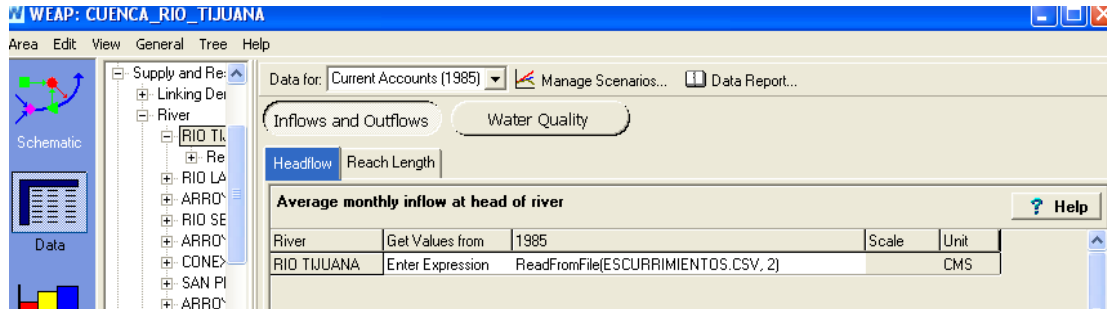
Los escurrimientos calculados fueron introducidos al modelo por medio de archivos creados en Excel, y leídos por medio de una función de WEAP llamada "Read from File". Esta función se encarga de leer el escurrimiento del río que se requiera con bases en su columna correspondiente. En la figura 4.41 se muestra como se introdujo la información para el río Tijuana, donde la expresión fue:

ReadFromFile(ESCURRIMIENTOS.CVS,2)

donde:

ESCURRIMIENTOS.CVS: Corresponde al archivo donde se encuentran los datos de los escurrimientos  
2: Se refiere a la columna donde estos datos se encuentran para el río Tijuana.

Figura 4. 41 Introducción de datos en los ríos en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3.3 Derivaciones

En el modelo se tienen esquematizadas cuatro derivaciones que se mencionaron anteriormente, pero únicamente dos (ARCT y Florido\_Tijuana) son a los que se les introdujo datos. En la derivación “ARCT”, se transportan los volúmenes de agua que son bombeados por el Acueducto Río Colorado-Tijuana y que son almacenados en la presa El Carrizo. Los volúmenes bombeados van de 1985 a 2008, ya que a partir de 1985 se cuenta con registro del volumen bombeado por el acueducto. En la tabla 4.67 se muestran los volúmenes mensuales bombeados que van de 1985 a 2008.

En la derivación de “Florido\_Tijuana” se transporta el agua que sale de la planta potabilizadora El Florido a la demanda de la ciudad de Tijuana. La demanda de la potabilizadora El Florido es igual al volumen bombeado por el ARCT a Tijuana así que en la tabla 4.68 se tiene los volúmenes que pasan por dicha derivación y que van de 1985 a 2008.

**Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP**

Tabla 4.67 Volúmenes mensuales que transporta la derivación del Acueducto ARCT (1985-2006) a la potabilizadora El Florido

BOMBEO A.R.C.T.		AÑOS											
		1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
VOL. ANUAL (m³)		2,182,572	8,543,459	28,830,095	34,817,398	68,969,420	62,435,062	28,838,700	41,480,468	17,244,169	15,925,535	1,417,187	24,946,659
PORCENTAJE		VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.
ENE	0.096	209,105.68	818,523.21	2,762,125.02	3,335,750.58	6,607,753.50	5,981,716.23	2,762,949.44	3,974,119.36	1,652,112.17	1,525,777.79	135,776.44	2,390,064.66
FEB	0.087	190,248.20	744,707.48	2,513,032.17	3,034,927.26	6,011,855.70	5,442,275.49	2,513,782.24	3,615,726.92	1,503,122.05	1,388,180.71	123,531.90	2,174,524.80
MAR	0.087	189,309.70	741,033.83	2,500,635.36	3,019,955.94	5,982,199.20	5,415,428.70	2,501,381.73	3,597,890.50	1,495,707.13	1,381,332.80	122,922.52	2,163,797.85
ABR	0.091	199,213.87	779,802.68	2,631,461.74	3,177,951.74	6,295,171.40	5,698,749.06	2,632,247.16	3,786,122.26	1,573,958.42	1,453,600.34	129,353.49	2,277,001.81
MAY	0.074	162,220.32	634,995.17	2,142,805.53	2,587,813.63	5,126,173.00	4,640,504.86	2,143,445.10	3,083,048.33	1,281,678.08	1,183,670.21	105,332.85	1,854,167.97
JUN	0.082	178,109.16	697,190.43	2,352,684.81	2,841,279.69	5,628,261.30	5,095,023.87	2,353,387.03	3,385,020.66	1,407,213.35	1,299,606.00	115,649.79	2,035,776.36
JUL	0.08	174,184.50	681,827.74	2,300,843.07	2,778,671.70	5,504,241.70	4,982,754.30	2,301,529.81	3,310,431.25	1,376,205.20	1,270,969.00	113,101.43	1,990,917.74
AGO	0.081	177,798.70	695,975.17	2,348,583.91	2,836,327.14	5,618,450.80	5,086,142.87	2,349,284.90	3,379,120.32	1,404,760.47	1,297,340.69	115,448.20	2,032,227.85
SEP	0.078	169,646.99	664,066.13	2,240,906.11	2,706,287.30	5,360,856.20	4,852,953.55	2,241,574.96	3,224,194.51	1,340,355.06	1,237,860.25	110,155.13	1,939,054.33
OCT	0.057	125,431.14	490,987.62	1,656,848.80	2,000,935.62	3,963,632.50	3,588,106.72	1,657,343.33	2,383,858.38	991,012.37	915,231.24	81,444.91	1,433,669.99
NOV	0.09	196,985.00	771,078.02	2,602,020.17	3,142,395.88	6,224,739.20	5,634,989.77	2,602,796.80	3,743,762.01	1,556,348.51	1,437,337.03	127,906.24	2,251,526.05
DIC	0.096	210,318.72	823,271.52	2,778,148.31	3,355,101.51	6,646,085.50	6,016,416.59	2,778,977.51	3,997,173.51	1,661,696.19	1,534,628.94	136,564.09	2,403,929.59
BOMBEO A.R.C.T.		AÑOS											
		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
VOL. ANUAL (m³)		69,944,206	24,793,631	32,802,024	110,626,657	112,681,624	105,758,369	103,140,236	114,863,575	84,853,329	100,911,994	112,421,189	113,491,894
PORCENTAJE		VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.
ENE	0.096	6,701,144.82	2,375,403.50	3,142,663.64	10,598,808.55	10,795,688.79	10,132,392.47	9,881,556.99	11,004,734.97	8,129,543.22	9,668,075.80	10,849,655.00	10,793,649.00
FEB	0.087	6,096,824.86	2,161,185.81	2,859,253.21	9,642,991.05	9,822,116.30	9,218,637.11	8,990,422.38	10,012,310.37	7,396,408.01	8,796,193.26	9,817,061.00	9,874,931.00
MAR	0.087	6,066,749.17	2,150,524.67	2,845,148.49	9,595,422.09	9,773,663.72	9,173,161.49	8,946,072.54	9,962,919.56	7,359,921.46	8,752,801.56	8,980,757.00	10,621,598.00
ABR	0.091	6,384,144.82	2,263,034.21	2,993,998.84	10,097,428.22	10,284,994.97	9,653,076.11	9,414,106.49	10,484,152.15	7,744,972.34	9,210,724.10	10,343,439.00	10,275,954.00
MAY	0.074	5,198,624.26	1,842,794.12	2,438,020.35	8,222,359.73	8,375,095.78	7,860,522.76	7,665,929.23	8,537,269.95	6,306,749.34	7,500,314.47	8,734,906.00	8,052,541.00
JUN	0.082	5,707,808.85	2,023,288.48	2,676,814.76	9,027,707.19	9,195,403.12	8,630,429.72	8,416,776.53	9,373,461.61	6,924,470.37	8,234,940.46	8,883,058.00	9,555,390.00
JUL	0.08	5,582,036.47	1,978,705.04	2,617,830.77	8,828,780.39	8,992,781.12	8,440,256.98	8,231,311.67	9,166,916.06	6,771,888.69	8,053,482.39	8,510,314.00	9,523,526.00
AGO	0.081	5,697,859.72	2,019,761.74	2,672,148.87	9,011,971.24	9,179,374.87	8,615,386.25	8,402,105.48	9,357,122.98	6,912,400.51	8,220,586.36	8,962,959.00	9,442,441.00
SEP	0.078	5,436,624.42	1,927,159.77	2,549,636.27	8,598,790.65	8,758,519.16	8,220,388.28	8,016,886.00	8,928,117.89	6,595,480.98	7,843,689.16	8,950,466.00	8,607,289.00
OCT	0.057	4,019,652.86	1,424,875.56	1,885,113.25	6,357,649.67	6,475,747.43	6,077,871.99	5,927,409.41	6,601,142.89	4,876,471.49	5,799,353.64	7,766,481.00	5,204,177.00
NOV	0.09	6,312,717.13	2,237,714.72	2,960,501.10	9,984,455.22	10,169,923.41	9,545,074.65	9,308,778.69	10,366,852.37	7,658,319.31	9,107,671.81	9,809,840.00	10,582,837.00
DIC	0.096	6,740,018.63	2,389,183.39	3,160,894.46	10,660,292.99	10,858,315.34	10,191,171.19	9,938,880.60	11,068,574.22	8,176,703.28	9,724,160.99	10,812,253.00	10,957,561.00

Fuente: Elaboración propia con información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California 2008.

**Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP**

Tabla 4.68 Volúmenes mensuales que transporta la derivación Florido\_Tijuana (1985-2006) que sale de la potabilizadora El Florido a la demanda de la Cd. Tijuana

BOMBEO A.R.C.T.	AÑOS											
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
<b>VOL. ANUAL (m³)</b>	<b>10,365,355</b>	<b>18,247,457</b>	<b>21,541,000</b>	<b>34,529,000</b>	<b>54,626,000</b>	<b>59,465,000</b>	<b>53,722,000</b>	<b>44,470,000</b>	<b>47,761,000</b>	<b>48,745,000</b>	<b>1,201,000</b>	<b>85,501,173</b>
PORCENTAJE	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.
ENE 0.078	808,497.69	1,423,301.65	1,680,198.00	2,693,262.00	4,260,828.00	4,638,270.00	4,190,316.00	3,468,660.00	3,725,358.00	3,802,110.00	93,678.00	6,669,091.49
FEB 0.068	704,844.14	1,240,827.08	1,464,788.00	2,347,972.00	3,714,568.00	4,043,620.00	3,653,096.00	3,023,960.00	3,247,748.00	3,314,660.00	81,668.00	5,814,079.76
MAR 0.074	767,036.27	1,350,311.82	1,594,034.00	2,555,146.00	4,042,324.00	4,400,410.00	3,975,428.00	3,290,780.00	3,534,314.00	3,607,130.00	88,874.00	6,327,086.80
ABR 0.077	798,132.34	1,405,054.19	1,658,657.00	2,658,733.00	4,206,202.00	4,578,805.00	4,136,594.00	3,424,190.00	3,677,597.00	3,753,365.00	92,477.00	6,583,590.32
MAY 0.084	870,689.82	1,532,786.39	1,809,444.00	2,900,436.00	4,588,584.00	4,995,060.00	4,512,648.00	3,735,480.00	4,011,924.00	4,094,580.00	100,884.00	7,182,098.53
JUN 0.086	891,420.53	1,569,281.30	1,852,526.00	2,969,494.00	4,697,836.00	5,113,990.00	4,620,092.00	3,824,420.00	4,107,446.00	4,192,070.00	103,286.00	7,353,100.88
JUL 0.096	995,074.08	1,751,755.87	2,067,936.00	3,314,784.00	5,244,096.00	5,708,640.00	5,157,312.00	4,269,120.00	4,585,056.00	4,679,520.00	115,296.00	8,208,112.61
AGO 0.099	1,026,170.15	1,806,498.24	2,132,559.00	3,418,371.00	5,407,974.00	5,887,035.00	5,318,478.00	4,402,530.00	4,728,339.00	4,825,755.00	118,899.00	8,464,616.13
SEP 0.09	932,881.95	1,642,271.13	1,938,690.00	3,107,610.00	4,916,340.00	5,351,850.00	4,834,980.00	4,002,300.00	4,298,490.00	4,387,050.00	108,090.00	7,695,105.57
OCT 0.089	922,516.60	1,624,023.67	1,917,149.00	3,073,081.00	4,861,714.00	5,292,385.00	4,781,258.00	3,957,830.00	4,250,729.00	4,338,305.00	106,889.00	7,609,604.40
NOV 0.083	860,324.47	1,514,538.93	1,787,903.00	2,865,907.00	4,533,958.00	4,935,595.00	4,458,926.00	3,691,010.00	3,964,163.00	4,045,835.00	99,683.00	7,096,597.36
DIC 0.076	787,766.98	1,386,806.73	1,637,116.00	2,624,204.00	4,151,576.00	4,519,340.00	4,082,872.00	3,379,720.00	3,629,836.00	3,704,620.00	91,276.00	6,498,089.15
BOMBEO A.R.C.T.	AÑOS											
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<b>VOL. ANUAL (m³)</b>	<b>87,629,190</b>	<b>81,349,259</b>	<b>97,974,014</b>	<b>102,897,094</b>	<b>100,017,268</b>	<b>98,830,402</b>	<b>97,289,082</b>	<b>100,923,941</b>	<b>98,055,310</b>	<b>106,301,375</b>	<b>102,831,790</b>	<b>96,822,186</b>
PORCENTAJE	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.	VOL. MENS.
ENE 0.078	6,835,076.82	6,345,242.20	7,641,973.09	8,025,973.33	7,801,346.90	7,708,771.36	7,588,548.40	7,872,067.40	7,648,314.18	8,291,507.25	7,678,717	7,781,647
FEB 0.068	5,958,784.92	5,531,749.61	6,662,232.95	6,997,002.39	6,801,174.22	6,720,467.34	6,615,657.58	6,862,827.99	6,667,761.08	7,228,493.50	6,797,687	6,777,937
MAR 0.074	6,484,560.06	6,019,845.17	7,250,077.04	7,614,384.96	7,401,277.83	7,313,449.75	7,199,392.07	7,468,371.63	7,256,092.94	7,866,301.75	7,878,953	6,961,789
ABR 0.077	6,747,447.63	6,263,892.94	7,543,999.08	7,923,076.24	7,701,329.64	7,609,940.95	7,491,259.31	7,771,143.46	7,550,258.87	8,185,205.88	7,868,392	7,534,682
MAY 0.084	7,360,851.96	6,833,337.76	8,229,817.18	8,643,355.90	8,401,450.51	8,301,753.77	8,172,282.89	8,477,611.04	8,236,646.04	8,929,315.50	9,047,576	7,651,133
JUN 0.086	7,536,110.34	6,996,036.27	8,425,765.20	8,849,150.08	8,601,485.05	8,499,414.57	8,366,861.05	8,679,458.93	8,432,756.66	9,141,918.25	9,120,445	8,137,323
JUL 0.096	8,412,402.24	7,809,528.86	9,405,505.34	9,878,121.02	9,601,657.73	9,487,718.59	9,339,751.87	9,688,698.34	9,413,309.76	10,204,932.00	9,808,374	9,438,951
AGO 0.099	8,675,289.81	8,053,576.64	9,699,427.39	10,186,812.31	9,901,709.53	9,784,209.80	9,631,619.12	9,991,470.16	9,707,475.69	10,523,836.13	10,009,743	9,679,691
SEP 0.09	7,886,627.10	7,321,433.31	8,817,661.26	9,260,738.46	9,001,554.12	8,894,736.18	8,756,017.38	9,083,154.69	8,824,977.90	9,567,123.75	9,536,582	8,466,480
OCT 0.089	7,798,997.91	7,240,084.05	8,719,687.25	9,157,841.37	8,901,536.85	8,795,905.78	8,658,728.30	8,982,230.75	8,726,922.59	9,460,822.38	9,163,027	8,552,736
NOV 0.083	7,273,222.77	6,751,988.50	8,131,843.16	8,540,458.80	8,301,433.24	8,202,923.37	8,074,993.81	8,376,687.10	8,138,590.73	8,823,014.13	8,134,413	8,402,849
DIC 0.076	6,659,818.44	6,182,543.68	7,446,025.06	7,820,179.14	7,601,312.37	7,511,110.55	7,393,970.23	7,670,219.52	7,452,203.56	8,078,904.50	7,787,882	7,436,968

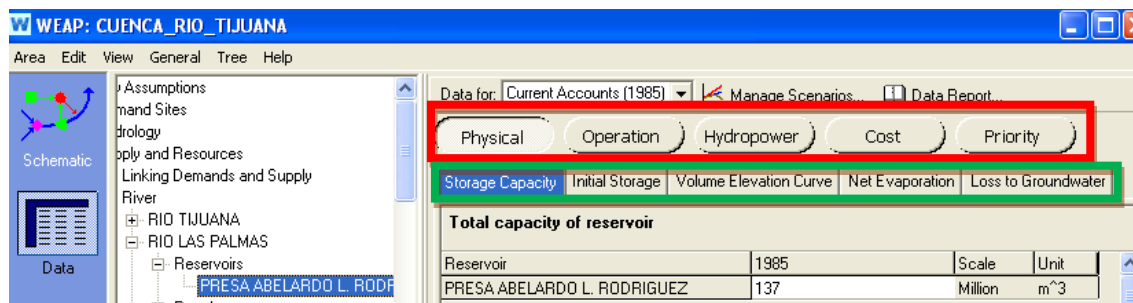
Fuente: Elaboración propia con información de la Comisión Estatal del Agua de Baja California 2008.

#### 4.2.3.4 Presas

En la CRT, se encuentran localizadas cuatro presas, pero en el modelo sólo se consideran las presas que se encuentran del lado mexicano (presa Abelardo L. Rodríguez y El Carrizo), ya que el agua que tienen contenida las presas que se encuentran del lado de Estados Unidos (presa Barrett y Morena) es transportada por Acueducto Dulzura a la presa de Otay, y sacada fuera del sistema de la cuenca.

La información que requiere WEAP para las presas se divide en cinco apartados, pero solo se introdujo información en características físicas "Physical" y características de operación "Operation". A continuación se mencionan los datos que se introdujeron para la Presa Abelardo L. Rodríguez y El Carrizo (figura 4.42).

Figura 4. 42 Información que requiere WEAP para las presas



Fuente: Elaboración propia.

### Presa Abelardo L. Rodríguez

#### Características físicas (Physical)

**Capacidad de almacenamiento (Storage Capacity):** 138 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa la capacidad máxima de almacenamiento de la presa (NAME).

**Almacenamiento inicial (Initial Storage):** 89.14 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa el volumen almacenado en la presa al inicio del periodo de simulación del modelo, el periodo va de 1985 a 1998, pero debido a que no se tiene información del almacenamiento de la presa para Enero de 1985, se tomó el último dato de almacenamiento el cual fue de diciembre de 1978.

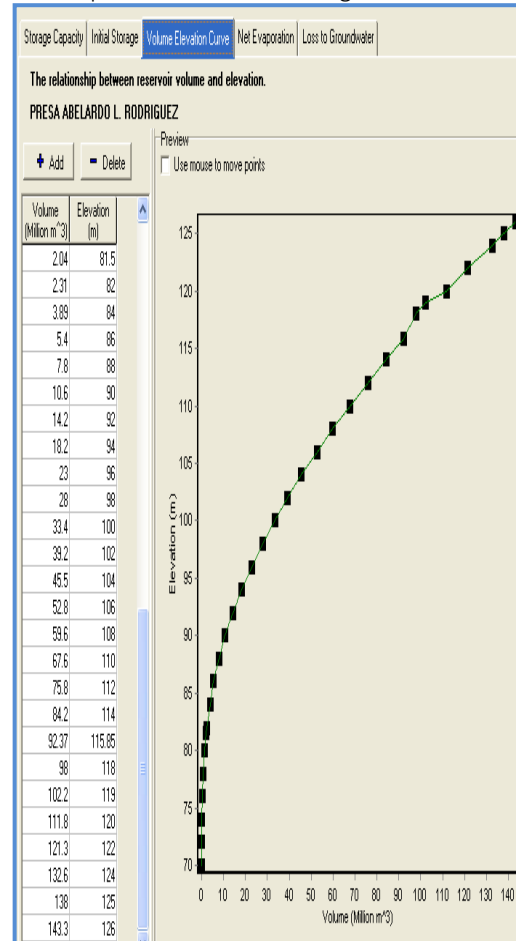
**Curva volumen-elevación (Volume-Elevation Curve):** Se introdujeron los datos de la Curva elevación-área-volumen que se encuentra en el Banco Nacional de Datos de Agua Superficial (BANDAS), que proporcionó la CONAGUA. A continuación en la tabla 4.69 se muestran los datos que se introdujeron y en la figura 4.43 se observa cómo se ven en WEAP.

Tabla 4. 69 Datos de la curva elevación-área-volumen de la presa Abelardo L. Rodríguez

ELEVACIÓN (m)	AREA (m2)	ALMACENAMIENTO (Mm3)
70	2	0
72	3.7	0.01
74	7.6	0.12
76	13.6	0.36
78	23.2	0.74
80	37.7	1.33
<b>81.5</b>	<b>51.425</b>	<b>2.04 (NAMIN)</b>
82	56	2.31
84	79	3.89
86	105	5.4
88	135	7.8
90	163	10.6
92	191	14.2
94	218	18.2
96	243	23
98	266	28
100	289	33.4
102	311	39.2
104	332	45.5
106	353	52.8
108	373	59.6
110	391	67.6
112	411	75.8
114	432	84.2
<b>115.85</b>	<b>440.7875</b>	<b>92.37 (NAMO)</b>
118	451	98
119	471	102.2
120	491	111.8
122	511	121.3
124	531	132.6
<b>125</b>	<b>541</b>	<b>138 (NAME)</b>
126	553	143.3

Fuente: Banco nacional de datos de agua superficial (BANDAS).

Figura 4. 43 Curva de volumen-elevación de la presa Abelardo L. Rodríguez en WEAP.

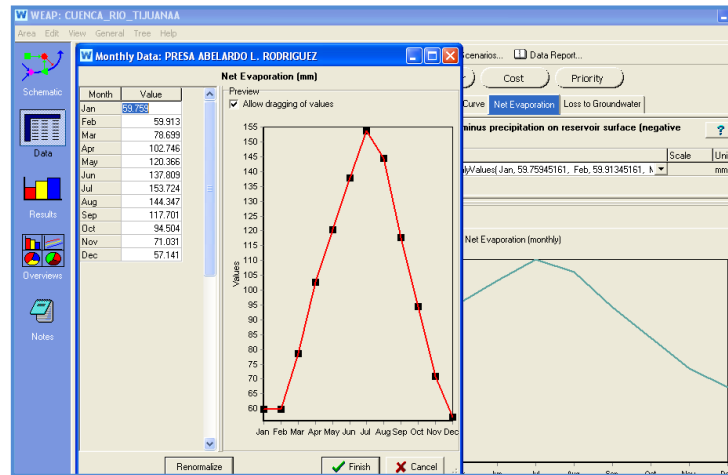


Fuente: Elaboración propia.

**Evaporación neta (Net Evaporation):** La evaporación neta se obtuvo de sacar el promedio de las evaporaciones de cada mes en un periodo de 1968 a 1998. Estas evaporaciones fueron afectadas por un coeficiente de evaporación de 0.77, el cual se determinó a partir de la información del BANDAS ya que sus volúmenes de evaporación están alterados por dicho coeficiente. Las evaporaciones se sacaron de la estación climatológica de la Presa Rodríguez (2038). En la figura 4.44 se muestra la curva de la evaporación neta en WEAP.



Figura 4. 44 Curva de la evaporación neta de la Presa Abelardo L. Rodríguez en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

### Características de operación (Operation)

**Nivel de conservación (Top of Conservation):** 92.37 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO).

**Nivel de inactividad (Top of Inactive):** 2.04 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa el nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO).

**Nivel buffer (Top of Buffer):** 10 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representan el volumen mínimo a partir de la cual se restringe el volumen de agua a sacar de la presa.

**Coefficiente de la zona buffer (Buffer Coefficient):** 0.1 Este coeficiente establece la fracción de agua disponible en la zona de buffer para cada mes.

### Presas El Carrizo.

#### Características físicas (Physical)

**Capacidad de almacenamiento (Storage Capacity):** 43.56 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa la capacidad de almacenamiento (NAME).

**Almacenamiento inicial (Initial Storage):** 23.02 hm<sup>3</sup>. Esta cantidad representa el volumen inicial de la presa el Carrizo en enero de 1985.

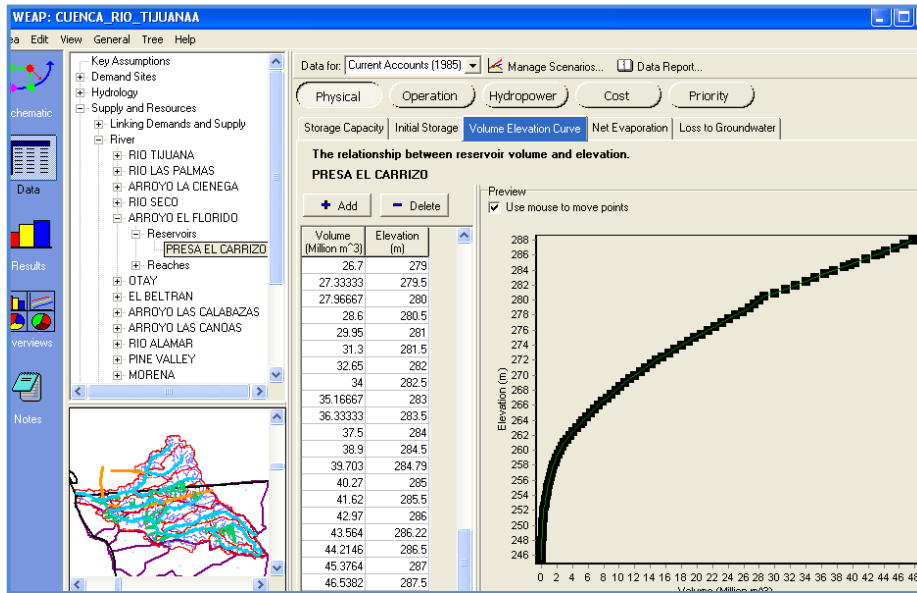
**Volume Elevation Curve:** Para introducir la curva elevación-volumen de la Presa El Carrizo en WEAP se tomaron los datos que proporcionó el Organismo de Cuenca de la Península de Baja California, en la tabla 4.70 se muestran los datos y en la figura 4.45 como se ve en WEAP.

Tabla 4. 70 Datos de la curva elevación-área-volumen de la presa El Carrizo

ELEVACIÓN (m)	AREA (m2)	ALMACENAMIENTO (Miles m3)	ELEVACIÓN (m)	AREA (m2)	ALMACENAMIENTO (Miles m3)
245.5	0	0	267.5	119.625	8975.0017
246	0.611	11.11	268	123.25	9550.0017
246.5	1.222	22.22	268.5	126.875	10125.0017
247	1.833	33.33	269	130.5	10700.0017
247.5	2.444	44.44	269.5	134	11350.0017
248	3.056	55.56	270	137.5	12000.0017
248.5	3.667	66.67	270.5	141	12650.0017
249	4.278	77.78	271	144.125	13362.5017
249.5	4.889	88.89	271.5	147.25	14075.0017
250	5.5	100	272	150.375	14787.5017
250.5	6.375	150	272.5	153.5	15500.0017
251	7.25	200	273	156.542	16333.3317
251.5	8.125	250	273.5	159.583	17166.6717
252	9	300	274	162.625	18000.0017
252.5	10.15	375	274.5	165.667	18833.3317
253	11.3	450	275	168.708	19666.6717
253.5	12.45	525	275.5	171.75	20500.0017
254	13.6	600	276	175.208	21383.3317
254.5	15	700	276.5	178.667	22266.6717
255	16.5	800	277	182.125	23150.0017
255.5	18.5	900	277.5	185.583	24033.3317
256	20.75	1050	278	189.042	24916.6717
256.5	23.5	1150	278.5	192.5	25800.0017
257	26	1250	279	195.5	26700.0017
257.5	29.375	1400	279.5	199.5	27333.3317
258.6	37.4	1760	280	203.5	27966.6717
259	40.5	1900	280.5	207.5	28600.0017
259.5	45	2100	281	210.875	29950.0017
260	49	2330	281.5	214.25	31300.0017
260.5	53.833	2636.6717	282	217.625	32650.0017
261	58.667	2943.3317	282.5	221	34000.0017
261.5	63.5	3250.0017	283	224.833	35166.6717
262	68.75	3625.0017	283.5	228.667	36333.3317
262.5	74	4000.0017	284	232.5	37500.0017
263	79.6	4496.0017	284.5	236.429	38900.0017
263.5	85.2	4992.0017	<b>284.79</b>	<b>238.711</b>	<b>39703.0017 (NAMO)</b>
<b>263.75</b>	<b>88</b>	<b>5240.0017 (NAMIN)</b>	285	240.368	40270.0017
264	90	5300.0017	285.5	244.316	41620.0017
264.5	95	5775.0017	286	248.263	42970.0017
265	100	6250.0017	<b>286.22</b>	<b>250</b>	<b>43564.0017 (NAME)</b>
265.5	104	6775.0017	286.5	252.281	44214.6117
266	108	7300.0017	287	256.354	45376.4017
266.5	112	7850.0017	287.5	260.427	46538.2017
267	116	8400.0017	288	264.5	47700.0017

Fuente: Organismo de cuenca de la Península de Baja California, CONAGUA.

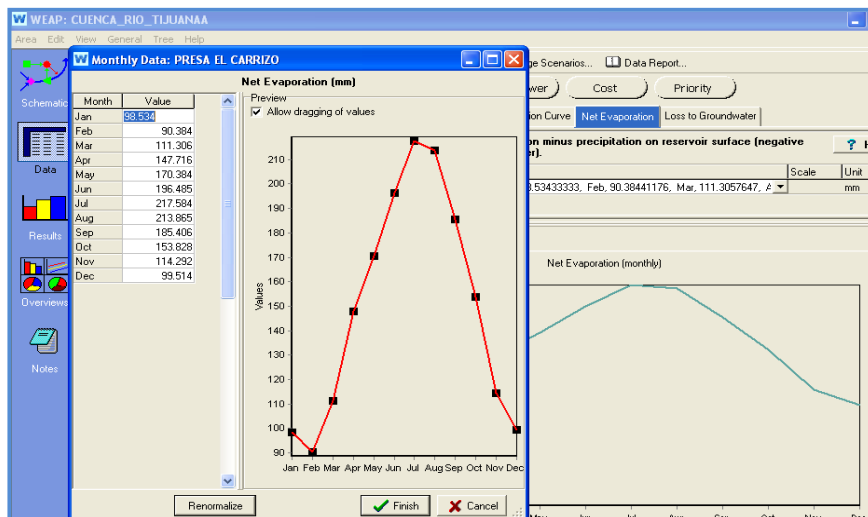
Figura 4. 45 Curva de volumen-elevación de la presa El Carrizo en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

**Evaporación neta (Net Evaporation):** La evaporación neta (figura 4.46) se obtuvo de sacar el promedio de las evaporaciones de cada mes, para la estación climatológica El Carrizo (2124), en el periodo de 1968 a 1998. Estas evaporaciones fueron afectadas por un coeficiente de evaporación de 0.77, el cual se determinó por la información del BANDAS ya que sus volúmenes de evaporación están alterados por dicho coeficiente.

Figura 4. 46 Curva de la evaporación neta de la presa El Carrizo



Fuente: Elaboración propia.

**Características de operación (Operation)**

**Nivel de conservación (Top of Conservation):** 39.7 hm<sup>3</sup> representa el NAMO de la presa el Carrizo. Elaboración propia.

**Nivel de inactividad (Top of Inactive):** 5.24 hm<sup>3</sup>, representa el nivel de aguas mínimo de la presa El Carrizo (NAMIN).

**4.2.3.5 Acuíferos.**

En el modelo de la Cuenca del Río Tijuana se ubicaron diez acuíferos, pero sólo a tres se les introdujo datos, estos son el Tijuana, Las Palmas y Tecate.

Los datos que se introdujeron a WEAP fueron la recarga natural y el almacenamiento inicial, para cada acuífero. Los valores se muestran a continuación:

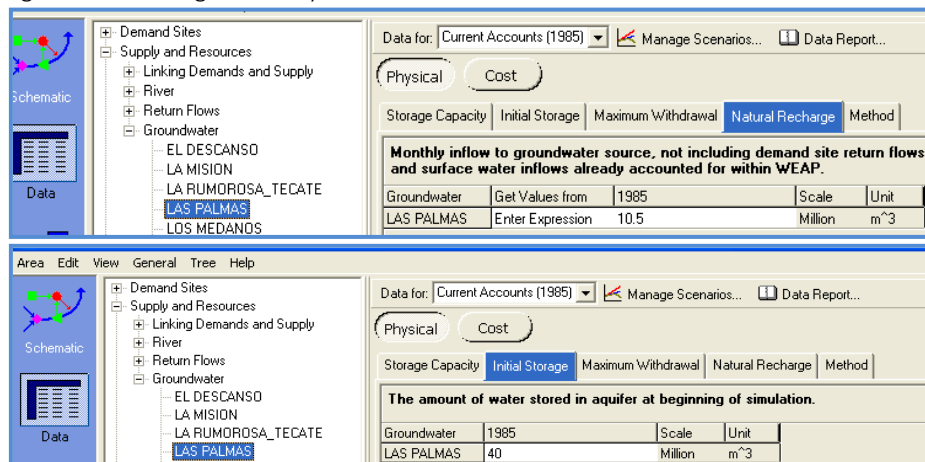
Tabla 4. 71 Información de acuíferos introducida en el WEAP

Tipo Información	Acuíferos		
	Tecate	Tijuana	Las Palmas
Recarga natural (hm <sup>3</sup> )	10.1	16	10.5
Almacenamiento Inicial (hm <sup>3</sup> )	40*	40*	40*

\* Estos valores se consideraron arbitrariamente altos para modelar debido a que no se conocía el almacenamiento inicial.

En la figura 4.47 se muestra cómo es que se introdujeron los datos mencionados anteriormente al acuífero de Las Palmas en WEAP.

Figura 4. 47 Recarga natural y almacenamiento inicial del acuífero de Las Palmas en WEAP



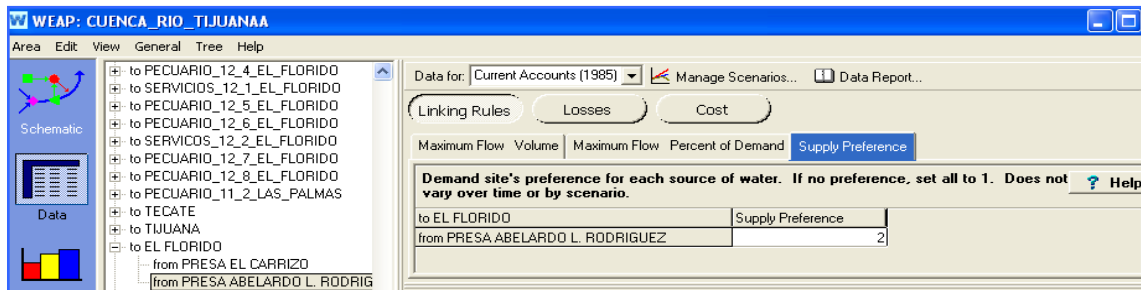
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3.6 Conectores de transferencia.

Todos los conectores de transferencia que van de los ríos a los sitios de demanda mencionados en la sección 4.2.3.1 tiene una prioridad uno, excepto los de las demandas que representan las ciudades de Tecate y Tijuana; y los de las demandas que representan a las plantas potabilizadoras.

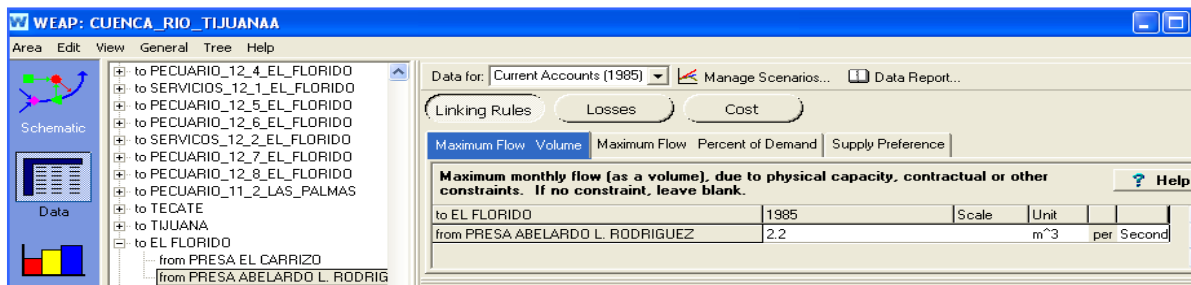
Al conector de transferencia que va de la Presa Abelardo L. Rodríguez a la potabilizadora A.L. Rodríguez se le dio una preferencia de 1 y al conector de transferencia que sale de la misma presa a la potabilizadora El Florido se le dio una preferencia de 2 (figura 4.48). Esto quiere decir que la presa Abelardo L. Rodríguez primero va a satisfacer la demanda de la potabilizadora A.L. Rodríguez y posteriormente a la demanda del El Florido. Además, a estos conectores de transferencia se les colocó su volumen máximo de flujo (Maximum Flow Volume) los cuales fueron de 2.2 m<sup>3</sup>/s para la línea que va de la Presa Abelardo L. Rodríguez al Florido (figura 4.49) y de 0.6 m<sup>3</sup>/s para la línea que va de la presa Abelardo L. Rodríguez a la demanda de la potabilizadora A.L. Rodríguez.

Figura 4. 48 Preferencia de la línea de conducción que va de la presa Abelardo L Rodríguez a El Florido en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. 49 Volumen máximo de flujo de la línea de conducción que va de la presa Abelardo L Rodríguez a El Florido en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3.7 Plantas de tratamiento de aguas residuales

En el modelo únicamente se colocaron las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), pero no se conectaron a ningún río o sitio de demanda, sólo se les introdujo el dato de su capacidad diaria de tratamiento (tabla 4.72). Cabe mencionar que la mayoría de estas plantas no descargan a una corriente de la red de drenaje sino al mar o sus aguas son usadas para riego de parques y jardines.

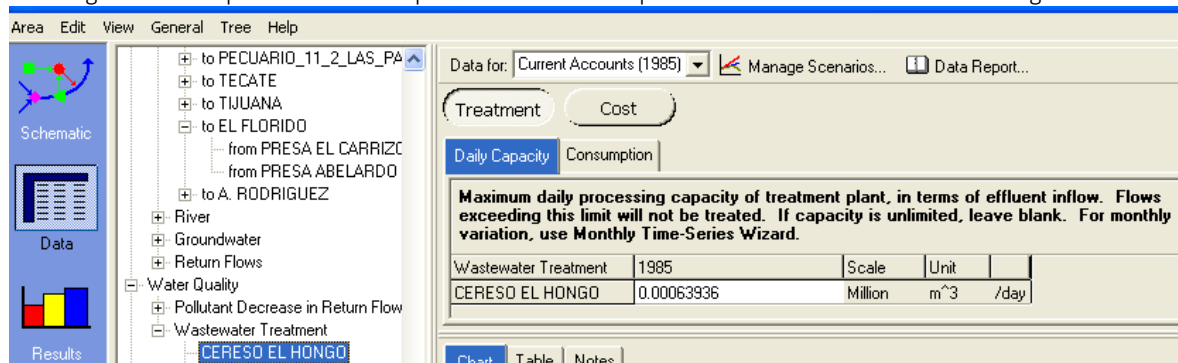
Tabla 4. 72 Caudal tratado de las PTAR que se encuentran en la cuenca del Río Tijuana

Nombre de la Planta	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Caudal Tratado hm <sup>3</sup> /día
Cereso el Hongo	18.0	7.4	0.0006
Tecate	200.0	171.2	0.0148
Vista del Valle	10.0	3.8	0.0003
Binacional o PITAR	1,100.0	1,053.8	0.0910
ECOPARQUE	5.0	3.7	0.0003
Fracc. Quintas El Refugio	25.0	14.0	0.0012
Monte los Olivos	460.0	230.0	0.0199
<b>Total</b>	<b>1,818.0</b>	<b>1,483.9</b>	<b>0.1282</b>

Fuente: Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. CONAGUA, 2008.

En la figura 4.50 se muestra como se introdujo el dato del caudal tratado por día de la PTAR el Cereso, la cual fue de 0.00063936 hm<sup>3</sup> por día. Esto se realizó para cada una de las PTAR que que se ubican en la CRT.

Figura 4. 50 Capacidad diaria de procesamiento de la planta de tratamiento Cereso El Hongo en WEAP.



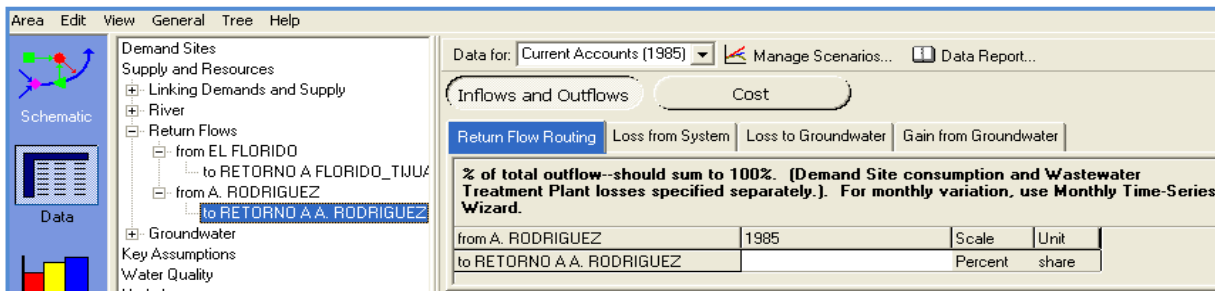
Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3.8 Flujos de retorno

En el modelo sólo existen dos flujos de retorno los cuales como se mencionó anteriormente son más bien un artificio para enviar el agua de las dos potabilizadoras al acueducto o línea de conducción que la distribuirá a la ciudad de Tijuana. Los flujos de retorno cuentan con una variable llamada “Return Flow Routing” (figura 4.51) donde debería establecerse el porcentaje de volumen de agua que se retornaría por esta línea de conducción, esto es útil cuando un sitio de demanda o una planta de tratamiento posee dos o más conectores de flujo de retorno, pero si únicamente existe un conector por defecto WEAP entiende que por dicho conector debe retornar toda el agua que no fuese consumida por la demanda. Las otras variables que se consideran en un flujo de retorno como son las pérdidas del sistema (Loss from System), las pérdidas hacia agua subterránea (Loss to Groundwater) y ganancias por aguas subterráneas (Gain from Groundwater) se fijaron a cero, pues no existen pérdidas o ganancias en las transferencias de agua que se establecen a través de ellos.

Las demandas que tienen flujos de retorno son las que representan a las plantas potabilizadoras A.L. Rodríguez y El Florido, debido a que a estas demandas se les colocó que no consumen nada del agua que piden, toda el agua es retornada a la derivación el “Florido\_Tijuana”, el cual envía ésta a la demanda de “Tijuana”.

Figura 4. 51 Retorno que va de la A.L. Rodríguez a la derivación Florido\_Tijuana en WEAP

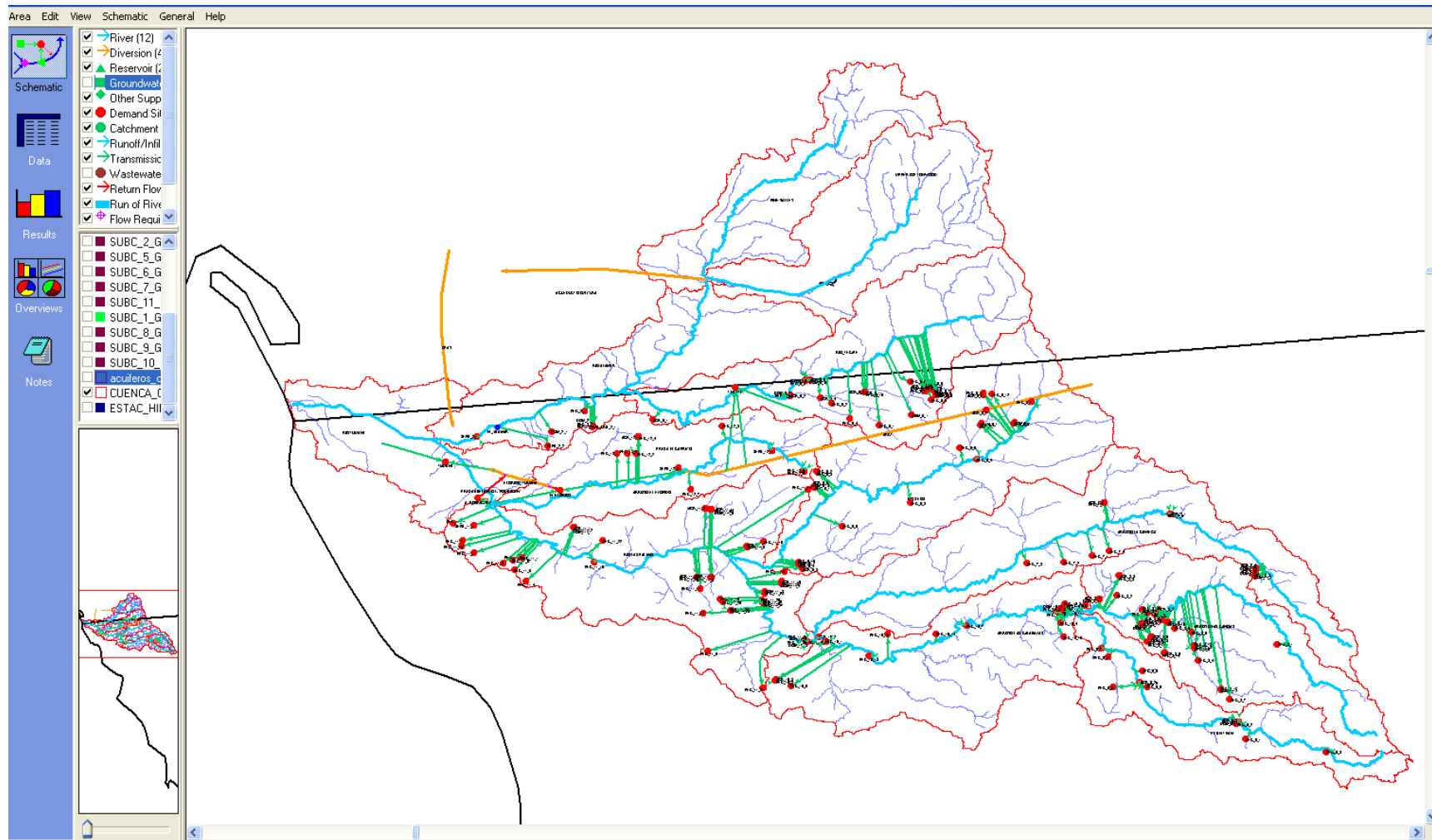


Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.52 muestra el esquema completo de la Cuenca del Río Tijuana ya con todos sus elementos que interactúan en el sistema.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Figura 4. 52 Esquema de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP



Fuente: Elaboración propia.



## **CAPÍTULO 5 . VALIDACIÓN Y RESULTADOS**

En el capítulo anterior se describió de manera detallada cómo se realizó el esquema y la modelación de la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP (Water Evaluation and Planning System), mediante los datos obtenidos de diferentes fuentes, ahora es necesario llevar a cabo la validación del modelo.

La validación se refiere a la construcción de un modelo correcto, es el proceso de determinar si el modelo, es una buena representación del sistema.

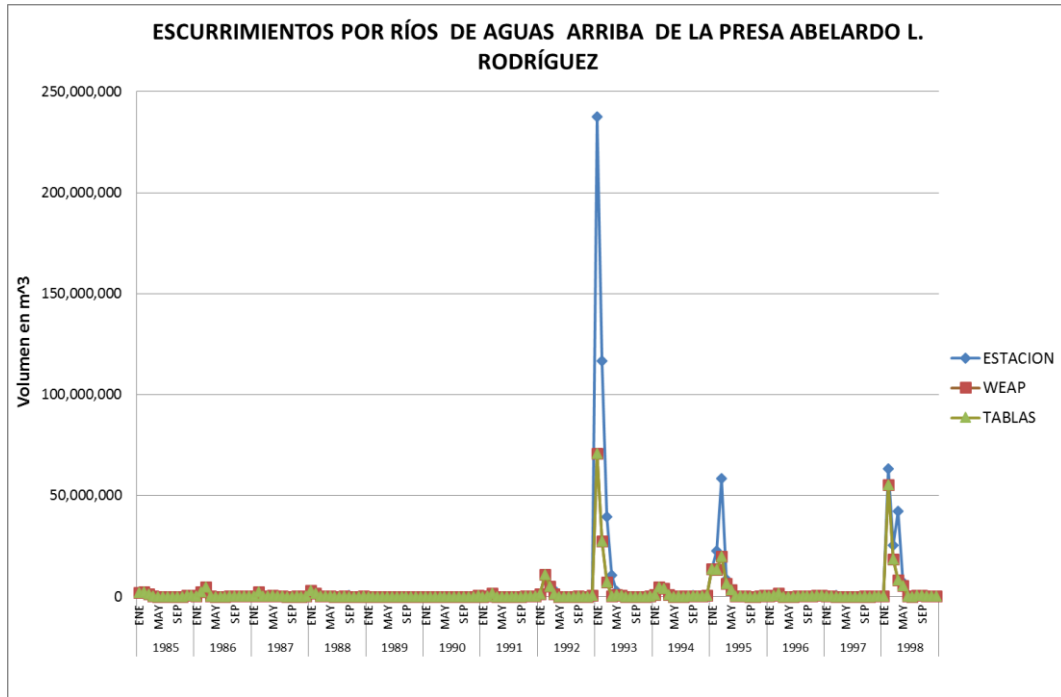
La validación del modelo consistió en comparar las salidas obtenidas por el modelo WEAP construido con registros históricos o deducidos de información histórica. La validación consideró los siguientes criterios: a) caudales de entrada a las presas y de aforo para la estación ubicada sobre el río Alamar, b) almacenamiento en embalses y c) entrega de agua a los diferentes usuarios.

Para ello se procedió a correr el modelo para un periodo de tiempo, que va de 1985 a 1998, encontrándose que los escurrimientos por ríos, arrojados por el modelo, son los mismos que reportan los puntos de control (presa Abelardo L. Rodríguez, El Carrizo y la estación hidrométrica el Alamar), pero difiere en ciertos años con los registros históricos medidos como en el caso de la presa Abelardo L. Rodríguez donde la diferencia se presenta en enero y febrero de 1993 y el segundo en marzo de 1995 (ver figura 5.1). En el caso de la estación hidrométrica el Alamar pasó lo mismo donde, el primero ocurrió en marzo de 1991 y el segundo ocurrió en el mismo mes pero en 1995 (ver figura 5.2).

Las tablas 5.1 y 5.2 muestran la información antes mencionada, donde lo que se reporta como datos de "ESTACION" es el registro histórico medido, "TABLAS" es el escurrimiento acumulado en el punto de control de la estación de todas las subcuencas aguas arriba, donde los escurrimientos fueron obtenidos por un procedimiento de restitución, y "WEAP" son los escurrimientos que la simulación establece que pasan por los puntos de control.

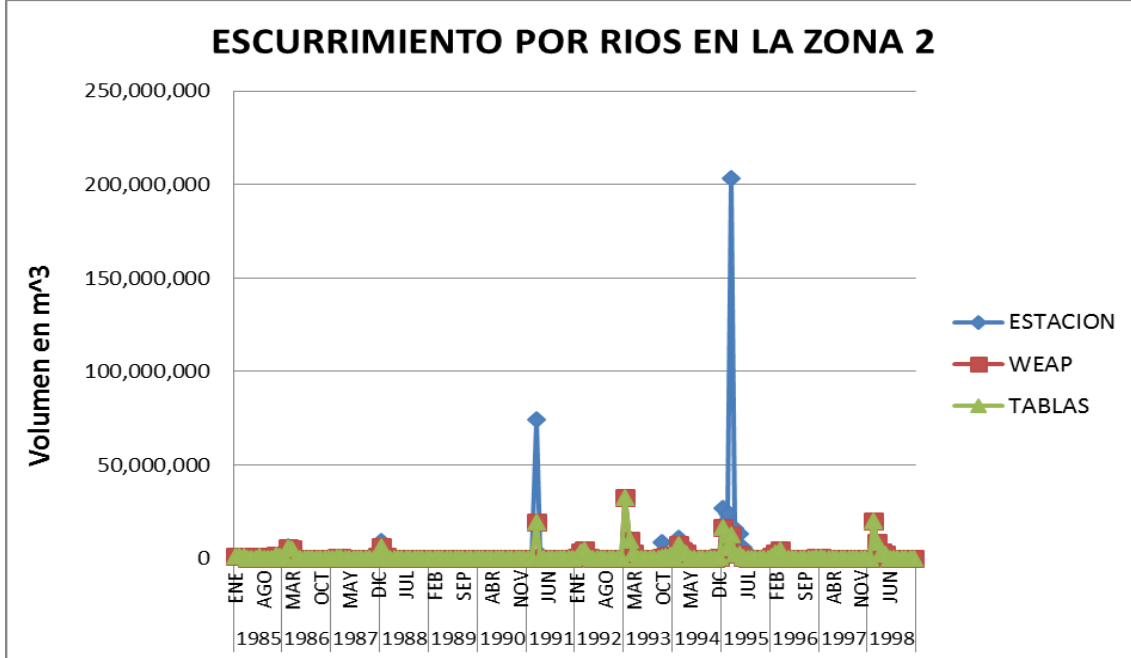
Ahora bien, de la revisión de la figuras y tablas se observa que para ciertos meses los escurrimientos restituidos (TABLAS) fueron subestimados con respecto del registro y que WEAP reproduce los escurrimientos restituidos, esto se debe a que los escurrimientos restituidos fueron los que se emplearon para alimentar el modelo, de lo que se deduce que WEAP reproduce bien los escurrimientos en los puntos de control.

Figura 5. 1 Validación de los escurrimientos por ríos aguas arriba de la presa Abelardo L. Rodríguez



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. 2 Validación de los escurrimientos por ríos en la zona 2 mediante la estación hidrométrica el Alamar



Fuente: Elaboración propia.

**Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP**

Tabla 5. 1 Validación de los escurrimientos de los ríos en WEAP con datos del funcionamiento de vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez

AÑO	DATO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1985	ESTACION	<b>1,900,000.00</b>	<b>2,300,000.00</b>	<b>1,180,000.00</b>	<b>210,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>30,000.00</b>	<b>580,000.00</b>	<b>600,000.00</b>
	WEAP	1,899,995.77	2,299,999.44	1,180,002.15	210,000.41	20,000.46	0.34	0.34	20,000.31	19,999.22	30,001.15	580,006.11	600,001.88
	TABLAS	1,899,995.42	2,299,999.10	1,180,001.81	210,000.07	20,000.12	0.00	0.00	19,999.97	19,998.88	30,000.80	580,005.77	600,001.54
1986	ESTACION	<b>140,000.00</b>	<b>2,410,000.00</b>	<b>4,690,000.00</b>	<b>220,000.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>10,000.00</b>	<b>10,000.00</b>	<b>120,000.00</b>	<b>110,000.00</b>	<b>290,000.00</b>	<b>140,000.00</b>	<b>110,000.00</b>
	WEAP	140,012.65	2,410,002.35	4,690,014.30	219,999.06	40,000.34	0.34	10,000.09	119,994.46	109,999.23	290,002.50	140,004.52	110,008.77
	TABLAS	140,012.31	2,410,002.00	4,690,013.96	219,998.72	40,000.00	0.00	9,999.74	119,994.11	109,998.89	290,002.16	140,004.18	110,008.43
1987	ESTACION	<b>260,000.00</b>	<b>2,410,000.00</b>	<b>200,000.00</b>	<b>140,000.00</b>	<b>600,000.00</b>	<b>130,000.00</b>	<b>160,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>270,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>410,000.00</b>
	WEAP	260,004.26	2,409,988.49	199,984.14	140,001.23	600,000.66	130,000.62	160,001.21	0.34	0.34	269,978.16	0.34	409,997.52
	TABLAS	260,003.91	2,409,988.15	199,983.80	140,000.89	600,000.31	130,000.28	160,000.87	0.00	0.00	269,977.82	0.00	409,997.18
1988	ESTACION	<b>3,100,000.00</b>	<b>1,540,000.00</b>	<b>400,000.00</b>	<b>330,000.00</b>	<b>150,000.00</b>	<b>60,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>320,000.00</b>	<b>460,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>60,000.00</b>	<b>110,000.00</b>
	WEAP	3,099,994.44	1,539,994.07	400,000.88	330,005.21	150,000.81	0.34	0.34	319,999.64	6,803.98	20,000.07	60,000.87	109,996.49
	TABLAS	3,099,994.09	1,539,993.73	400,000.54	330,004.86	150,000.47	0.00	0.00	319,999.30	6,803.64	19,999.73	60,000.53	109,996.15
1989	ESTACION	<b>30,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>30,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>80,000.00</b>
	WEAP	29,999.22	19,999.38	39,998.64	0.34	0.34	0.34	249.74	0.34	0.34	0.34	0.34	79,998.82
	TABLAS	29,998.88	19,999.04	39,998.30	0.00	0.00	0.00	249.40	0.00	0.00	0.00	0.00	79,998.47
1990	ESTACION	<b>80,000.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>10,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>10,000.00</b>	<b>600,000.00</b>
	WEAP	79,947.24	40,004.52	10,004.07	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	9,999.71	600,003.43
	TABLAS	79,946.90	40,004.17	10,003.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9,999.37	600,003.09
1991	ESTACION	<b>20,000.00</b>	<b>220,000.00</b>	<b>1,500,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>100,000.00</b>	<b>100,000.00</b>	<b>130,000.00</b>
	WEAP	20,000.74	220,000.55	1,500,030.48	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	99,998.82	99,999.15	129,993.66
	TABLAS	20,000.40	220,000.21	1,500,030.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99,998.47	99,998.80	129,993.32
1992	ESTACION	<b>1,300,000.00</b>	<b>11,020,000.00</b>	<b>5,090,000.00</b>	<b>3,300,000.00</b>	<b>90,000.00</b>	<b>30,000.00</b>	<b>30,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>110,000.00</b>	<b>70,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>550,000.00</b>
	WEAP	1,300,012.09	11,020,094.94	5,089,980.20	1,253,143.75	90,005.72	13,447.36	29,999.33	0.34	110,000.67	70,000.84	0.34	550,003.53
	TABLAS	1,300,011.75	11,020,094.59	5,089,979.85	1,253,143.40	90,005.38	13,447.02	29,998.99	0.00	110,000.32	70,000.50	0.00	550,003.19
1993	ESTACION	<b>237,510,000.00</b>	<b>116,650,000.00</b>	<b>39,600,000.00</b>	<b>10,610,000.00</b>	<b>2,660,000.00</b>	<b>570,000.00</b>	<b>50,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>90,000.00</b>	<b>370,000.00</b>
	WEAP	70,962,809.14	27,629,841.95	7,251,349.84	230,637.93	945,521.72	570,000.52	9,584.83	0.34	40,000.03	89,997.22	370,003.24	
	TABLAS	70,962,808.80	27,629,841.60	7,251,349.50	230,637.59	945,521.37	570,000.18	9,584.48	0.00	39,999.68	89,996.88	370,002.90	
1994	ESTACION	<b>970,000.00</b>	<b>4,880,000.00</b>	<b>3,970,000.00</b>	<b>1,000,000.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>120,000.00</b>	<b>60,000.00</b>	<b>390,000.00</b>	<b>460,000.00</b>	<b>290,000.00</b>	<b>230,000.00</b>	<b>440,000.00</b>
	WEAP	970,003.75	4,879,988.64	3,970,005.96	999,991.47	40,000.18	120,000.58	60,000.57	390,001.30	239,220.93	290,000.19	229,999.07	439,998.98
	TABLAS	970,003.40	4,879,988.30	3,970,005.62	999,991.13	39,999.84	120,000.23	60,000.22	390,000.96	239,220.59	289,999.84	229,998.73	439,998.63
1995	ESTACION	<b>13,740,000.00</b>	<b>22,570,000.00</b>	<b>58,470,000.00</b>	<b>8,530,000.00</b>	<b>3,290,000.00</b>	<b>190,000.00</b>	<b>290,000.00</b>	<b>270,000.00</b>	<b>0.00</b>	<b>70,000.00</b>	<b>180,000.00</b>	<b>500,000.00</b>
	WEAP	13,739,980.65	13,234,944.34	20,017,845.06	6,301,251.78	3,290,013.76	190,000.12	271,612.21	269,999.82	0.34	70,000.03	179,999.32	500,001.93
	TABLAS	13,739,980.31	13,234,943.99	20,017,844.71	6,301,251.44	3,290,013.42	189,999.77	271,611.87	269,999.48	0.00	69,999.69	179,998.97	500,001.59
1996	ESTACION	<b>410,000.00</b>	<b>610,000.00</b>	<b>1,510,000.00</b>	<b>50,000.00</b>	<b>60,000.00</b>	<b>70,000.00</b>	<b>150,000.00</b>	<b>270,000.00</b>	<b>180,000.00</b>	<b>390,000.00</b>	<b>500,000.00</b>	<b>450,000.00</b>
	WEAP	409,998.06	610,002.98	1,509,993.49	50,003.26	60,000.33	9,461.54	149,998.47	270,000.09	180,000.73	389,998.45	499,999.86	449,998.58
	TABLAS	409,997.72	610,002.63	1,509,993.14	50,002.92	59,999.99	9,461.20	149,998.12	269,999.74	180,000.39	389,998.11	499,999.52	449,998.24
1997	ESTACION	<b>400,000.00</b>	<b>250,000.00</b>	<b>480,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>10,000.00</b>	<b>20,000.00</b>	<b>30,000.00</b>	<b>180,000.00</b>	<b>40,000.00</b>	<b>200,000.00</b>	<b>300,000.00</b>
	WEAP	400,002.26	249,999.51	88,773.76	20,000.92	20,000.32	10,001.12	20,000.66	29,999.71	179,997.39	40,001.99	199,997.71	299,996.51
	TABLAS	400,001.92	249,999.17	88,773.41	20,000.58	19,999.98	10,000.78	20,000.32	29,999.37	179,997.05	40,001.65	199,997.37	299,996.17
1998	ESTACION	<b>250,000.00</b>	<b>63,430,000.00</b>	<b>25,280,000.00</b>	<b>42,450,000.00</b>	<b>7,100,000.00</b>	<b>860,000.00</b>	<b>50,000.00</b>	<b>450,000.00</b>	<b>470,000.00</b>	<b>190,000.00</b>	<b>260,000.00</b>	<b>160,000.00</b>
	WEAP	249,986.88	55,477,289.92	18,628,652.62	8,221,770.87	5,367,847.46	157,418.60	50,000.60	450,004.94	470,000.33	190,002.62	259,994.11	160,009.61
	TABLAS	249,986.54	55,477,289.58	18,628,652.28	8,221,770.53	5,367,847.12	157,418.26	50,000.26	450,004.60	469,999.99	190,002.28	259,993.77	160,009.27

Fuente: Elaboración propia.

Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 5. 2 Validación de los escurrimientos por ríos en la zona 2 mediante la estación hidrométrica el Alamar

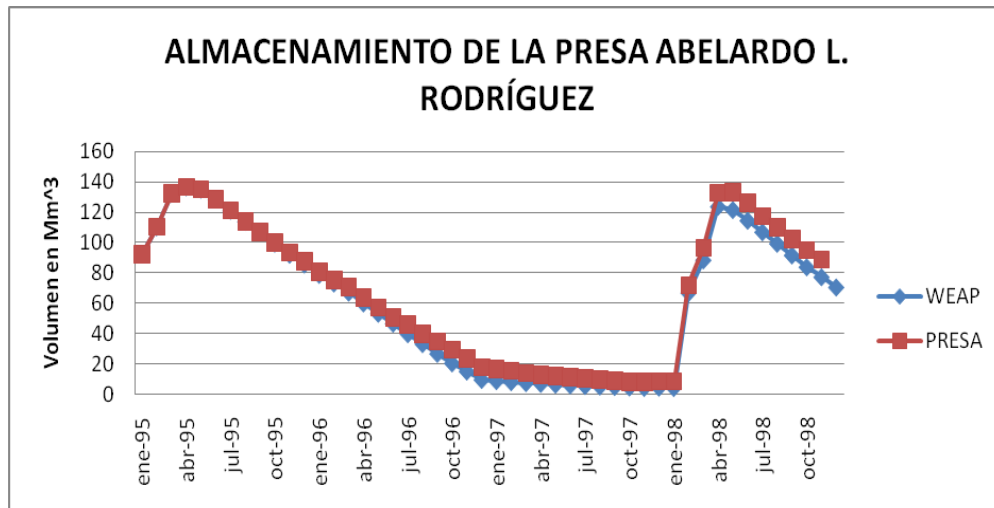
AÑOS	DATO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1985	<b>ESTACION</b>	<b>1,130,820</b>	<b>1,278,500</b>	<b>1,196,360</b>	<b>256,820</b>	<b>15,610</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,072,040</b>	<b>1,295,550</b>
	WEAP	1,130,820	1,278,500	1,196,360	256,820	15,619	0	1,451,448	345	13,857	55,220	2,072,040	1,295,550
	TABLAS	1,130,820	1,278,500	1,196,360	256,820	15,619	0	1,451,448	345	13,857	55,219	2,072,040	1,295,550
1986	<b>ESTACION</b>	<b>169,070</b>	<b>6,286,720</b>	<b>5,360,500</b>	<b>230,280</b>	<b>20,240</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	WEAP	169,070	6,017,983	5,360,500	230,280	20,240	0	9,067	6,473	141,628	161,261	285,206	167,339
	TABLAS	169,070	6,017,983	5,360,500	230,280	20,240	0	9,067	6,473	141,628	161,261	285,205	167,339
1987	<b>ESTACION</b>	<b>329,770</b>	<b>479,160</b>	<b>479,590</b>	<b>154,710</b>	<b>17,930</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>352,420</b>	<b>1,398,990</b>
	WEAP	329,770	479,160	479,590	154,710	17,930	6,997	11,235	0	0	355,974	352,421	1,398,990
	TABLAS	329,770	479,160	479,590	154,710	17,930	6,997	11,235	0	0	355,974	352,421	1,398,990
1988	<b>ESTACION</b>	<b>9,118,100</b>	<b>990,890</b>	<b>354,700</b>	<b>377,310</b>	<b>87,430</b>	<b>4,560</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	WEAP	6,141,378	990,890	354,700	377,310	87,430	0	0	210,327	16,415	114,265	214,941	272,967
	TABLAS	6,141,378	990,890	354,700	377,310	87,430	0	0	210,326	16,415	114,265	214,941	272,966
1989	<b>ESTACION</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	WEAP	87,991	152,510	163,732	0	0	0	0	0	0	0	0	171,930
	TABLAS	87,990	152,509	163,732	0	0	0	0	0	0	0	0	171,930
1990	<b>ESTACION</b>	<b>95,960</b>	<b>132,020</b>	<b>128,220</b>	<b>150,220</b>	<b>3,960</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	WEAP	173,045	132,020	128,220	150,221	18,533	0	0	0	0	0	29,993	127,198
	TABLAS	173,045	132,020	128,220	150,221	18,533	0	0	0	0	0	29,993	127,198
1991	<b>ESTACION</b>	<b>0</b>	<b>255,060</b>	<b>74,421,600</b>	<b>2,388,310</b>	<b>122,680</b>	<b>38,820</b>	<b>14,710</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	WEAP	136,924	255,060	19,607,260	217,236	38,288	0	53,919	0	0	52,132	107,096	192,975
	TABLAS	136,924	255,060	19,607,260	217,236	38,287	0	53,919	0	0	52,132	107,096	192,974
1992	<b>ESTACION</b>	<b>506,360</b>	<b>3,345,170</b>	<b>4,817,020</b>	<b>1,314,630</b>	<b>107,970</b>	<b>14,570</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>298,910</b>
	WEAP	506,360	3,345,170	4,817,020	829,949	107,970	573	30,261	0	27,467	109,953	0	298,910
	TABLAS	506,360	3,345,170	4,817,020	829,949	107,970	573	30,261	0	27,467	109,953	0	298,910
1993	<b>ESTACION</b>										<b>8,835,740</b>	<b>1,708,760</b>	<b>1,745,300</b>
	WEAP	32,765,745	9,624,305	2,937,718	5,247	114,480	247,533	17,944	0	0	646,787	988,762	1,745,301
	TABLAS	32,765,745	9,624,305	2,937,718	5,247	114,480	247,533	17,944	0	0	646,787	988,762	1,745,301
1994	<b>ESTACION</b>	<b>0</b>	<b>10,874,830</b>	<b>7,951,270</b>	<b>3,711,230</b>	<b>2,203,820</b>	<b>153,910</b>	<b>2,790</b>	<b>147,830</b>	<b>0</b>	<b>76,360</b>	<b>0</b>	<b>871,370</b>
	WEAP	396,078	7,815,551	4,362,805	3,087,420	51,727	13,932	2,790	147,830	39,872	76,360	114,476	871,370
	TABLAS	396,078	7,815,551	4,362,805	3,087,419	51,727	13,932	2,790	147,830	39,872	76,360	114,476	871,370
1995	<b>ESTACION</b>	<b>27,126,860</b>	<b>24,313,870</b>	<b>203,377,640</b>	<b>16,221,940</b>	<b>13,420,850</b>	<b>6,023,920</b>	<b>963,320</b>	<b>60,930</b>	<b>22,130</b>	<b>127,600</b>	<b>199,330</b>	<b>345,350</b>
	WEAP	16,883,180	5,691,965	12,852,614	2,605,750	2,139,457	666,444	78,667	60,930	22,130	127,599	199,340	345,350
	TABLAS	16,883,180	5,691,965	12,852,614	2,605,750	2,139,457	666,443	78,666	60,930	22,130	127,599	199,340	345,350
1996	<b>ESTACION</b>	<b>1,418,340</b>	<b>2,972,700</b>	<b>4,973,080</b>									<b>673,330</b>
	WEAP	1,418,341	2,972,700	4,737,091	75,388	84,510	12,941	15,344	20,212	42,312	150,353	269,327	673,330
	TABLAS	1,418,340	2,972,699	4,737,091	75,388	84,510	12,941	15,344	20,212	42,312	150,353	269,327	673,330
1997	<b>ESTACION</b>												
	WEAP	631,953	181,043	141,141	33,558	18,798	14,745	8,748	46,759	175,305	96,066	250,807	385,381
	TABLAS	631,953	181,043	141,141	33,558	18,798	14,745	8,748	46,759	175,305	96,065	250,807	385,381
1998	<b>ESTACION</b>												
	WEAP	250,800	20,189,141	8,559,535	3,457,396	2,378,529	154,195	6,216	78,539	189,077	56,441	221,857	282,969
	TABLAS	250,799	20,189,141	8,559,535	3,457,396	2,378,529	154,195	6,216	78,539	189,077	56,441	221,857	282,968

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente en el modelo se realizó una validación para el periodo de tiempo que va de 1995 a 1998, en el cual se consideraron los siguientes criterios para evaluar: caudales de entrada a las presas y de aforo para la estación ubicada sobre el río Alamar, almacenamiento en embalses y entrega de agua a los diferentes usuarios. El análisis de comparación arrojó factores de correlación arriba de 0.8 para los dos embalses y para los usuarios analizados. En este análisis comparativo las diferencias se presentaron principalmente en las entregas a las ciudades de Tijuana y Tecate que son los principales consumidores del sistema y para las cuales no está bien definida cuales son las políticas de operación de las presas y del acueducto ARCT, sin embargo estas diferencias son pequeñas y permite perfectamente a las curvas seguir las tendencias y no alterar la satisfacción de las demandas o entregas de agua a los usuarios.

En la figura 5.3 se muestra la comparación de los almacenamientos que generó WEAP con los que reporta CONAGUA en cuanto al funcionamiento de vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez. Se observa que la variación que hay entre estas dos fuentes de información no tiene mucha variación, teniendo así una correlación entre ambas curvas superior al 0.9.

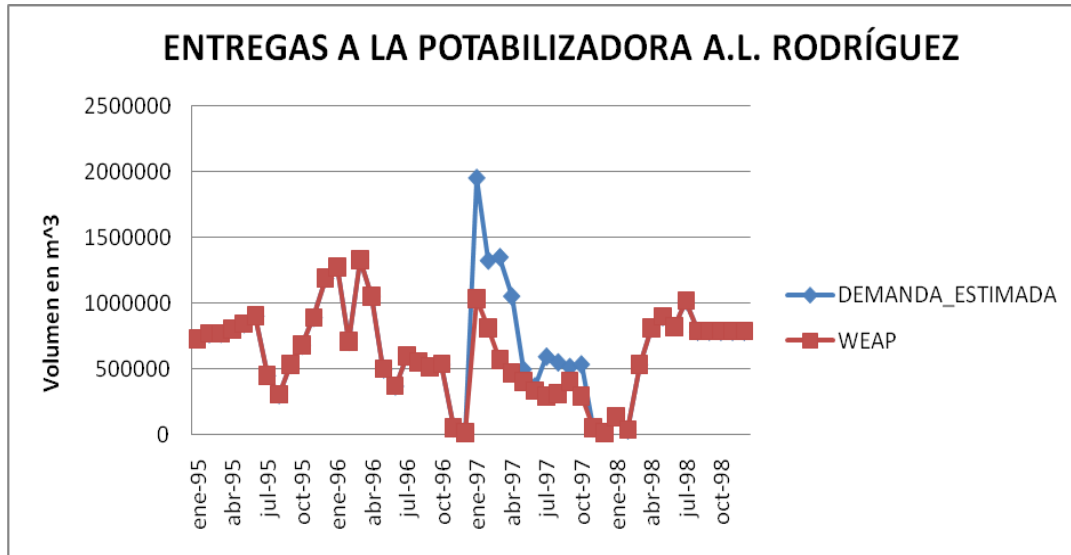
Figura 5. 3 Almacenamiento de la presa Abelardo L. Rodríguez para el periodo de 1995-1998



Fuente: Elaboración propia.

La figura 5.4 muestra las entregas de agua establecidas por WEAP, contra las entregas reales a la potabilizadora A.L. Rodríguez, estimadas a partir del funcionamiento de vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez para la obra de toma uno. En ella se observa un ajuste perfecto para los años de 1995, 1996 y 1998, y un desfase para el año de 1997. El desplazamiento mostrado en esta figura y el desplazamiento para el mismo año de la figura 5.3, hacen pensar que la estimación de dichas entregas es poco confiable, ya que en ese periodo (1997), la presa se encontraba prácticamente vacía y los escurrimientos por ríos fueron bien simulados. Sin embargo la tendencia de las entregas se mantiene para dicho sitio de demanda.

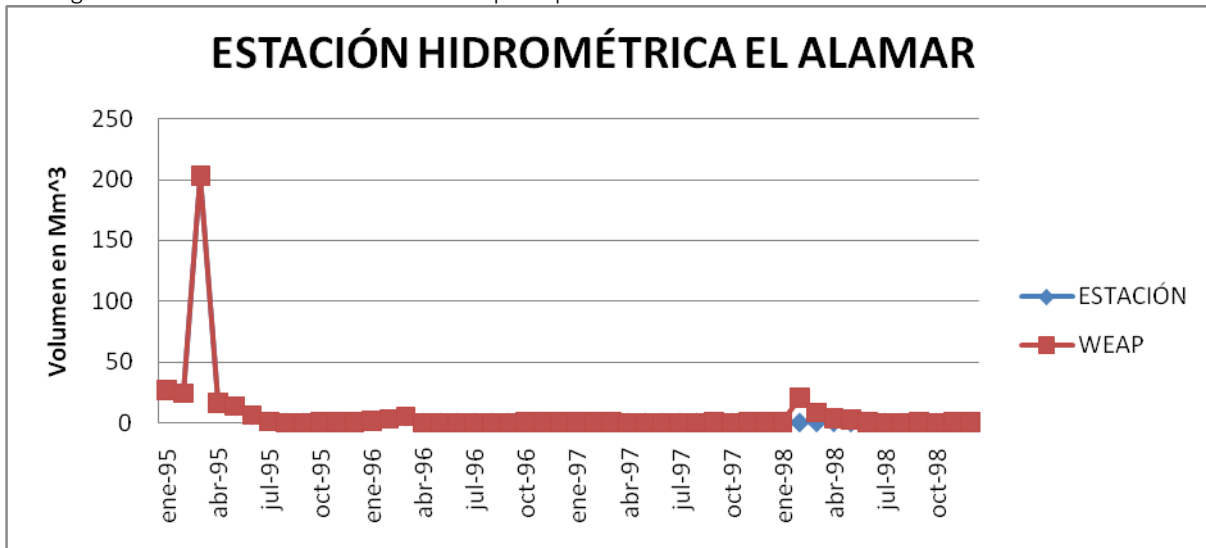
Figura 5. 4 Entregas de agua a la potabilizadora A.L. Rodríguez en el periodo de 1995-1998



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.5 se muestran los volúmenes de escurrimiento obtenidos por WEAP en la zona 2 (área que está conformada por la subcuenca Tecate y una parte de la subcuenca del río Alamar), con los volúmenes reales de escurrimiento que establece la estación hidrométrica El Alamar (aclarando que la estación hidrométrica sólo cuenta con datos para los años de 1995 y una parte de 1996). Se observa que para los meses de abril a noviembre de 1996 y de enero de 1997 a diciembre de 1998 la estación El Alamar marca un escurrimiento de cero, debido a que no se contaba con dato para dichos periodos, sin embargo los valores obtenidos por WEAP, muestran escurrimientos muy escasos donde el más alto es de 20.19 hm<sup>3</sup> para el mes de Febrero de 1998.

Figura 5. 5 Volúmenes de escurrimiento que reporta WEAP con los de la estación hidrométrica El Alamar

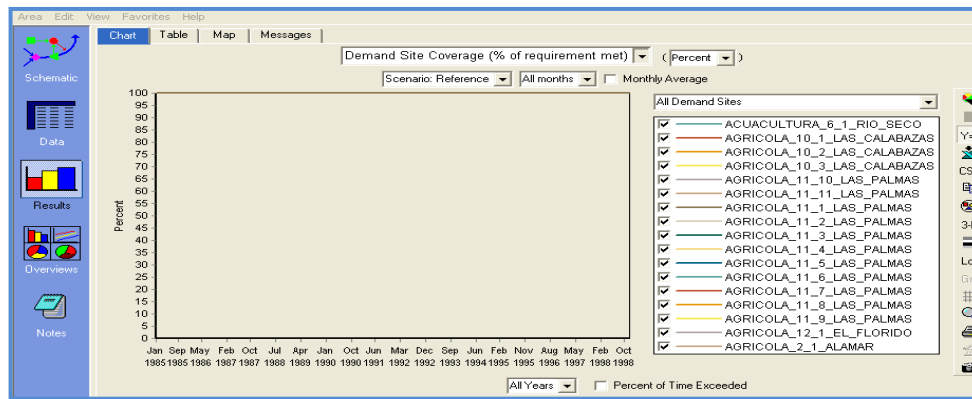


Fuente: Elaboración propia.

El proceso de validación de la simulación en WEAP, en cuanto a los sitios de demanda mostró una cobertura de satisfacción del 100%, para todas las demandas que se encuentran arriba de los puntos de control (estación hidrométrica el Alamar y las presas Abelardo L. Rodríguez y El Carrizo). Esto establece un correcto funcionamiento del modelo, dado que durante el proceso de restitución y distribución de los escurrimientos agua arribas de estos puntos de control (ver sección 3.4), se consideró esta condición de satisfacción de dichas demandas.

En la figura 5.6 se muestra la gráfica de la cobertura de la satisfacción de la demanda, para algunos sitios únicamente (en las subcuencas Río Seco, Las Calabazas, Las Palmas y El Alamar) que se encuentran aguas arriba de los puntos de control antes mencionados.

Figura 5. 6 Cobertura de la satisfacción de la demanda en WEAP



Fuente: Elaboración propia.

Para los sitios de demandas aguas abajo de las presas, no se contó con información específica de las demandas para estos sitios (Tijuana, Tecate, El Florido y A.L. Rodríguez), por tal motivo se tuvo que inferir sus demandas con base a información proporcionada por los funcionamientos de vaso de las presas y de los volúmenes bombeados por el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT).

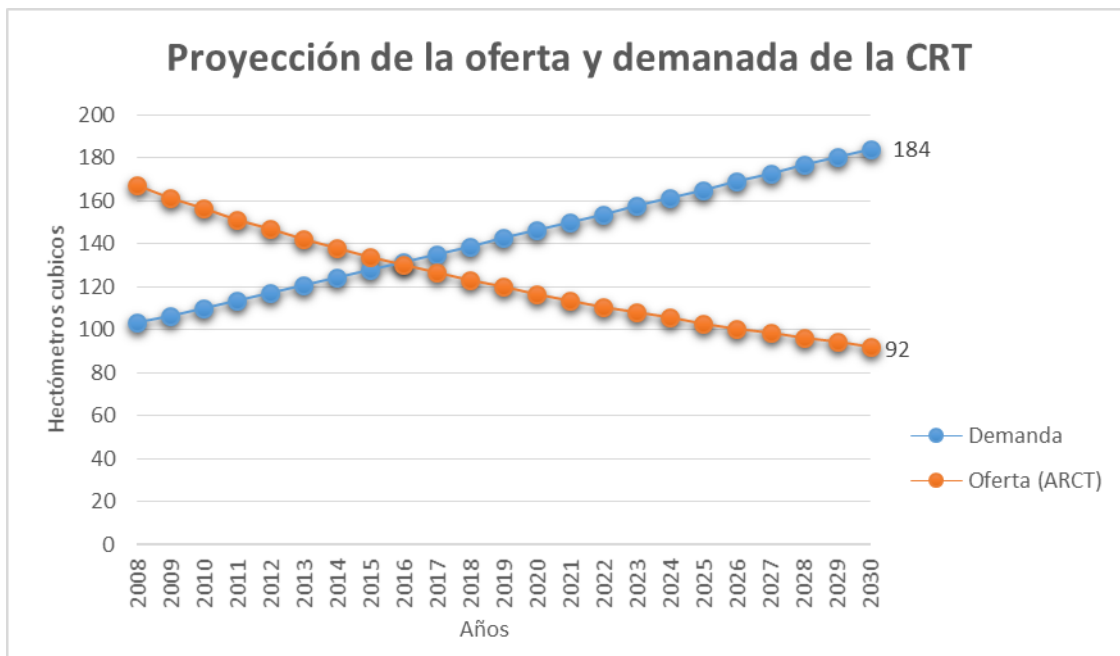
Como resultado, el modelo que se desarrolló de la Cuenca del Río Tijuana en la plataforma WEAP quedó principalmente como un sistema de recursos hídricos operado para satisfacer del lado mexicano las demandas de las ciudades de Tijuana y Tecate. Se consideraron las transferencias de agua que llegan a través del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT), los escurrimientos almacenados en la presa Abelardo L. Rodríguez y del escaso abastecimiento por parte de los acuíferos que se ubican en la cuenca. No se consideró la parte de la CRT que encuentra del lado de Estado Unidos, ya que todos los escurrimientos son trasvasados de la presa Barrett a la presa Otay y empleados para satisfacer las demandas de la ciudad de San Diego quedando así fuera del sistema.

En cuanto al abastecimiento de agua para el año 2008 el modelo cubrió la demanda al 100% en los 206 sitios que se introdujeron en el sistema.

En el 2008 las ciudades de Tecate y Tijuana en conjunto demandan un volumen anual 113.39 hm<sup>3</sup>, el cual es satisfecho gracias a la oferta que presenta el ARCT de 167.14 hm<sup>3</sup>.

El análisis de la asignación de agua debe enfocarse a que ocurrirá cuando la demanda sea mayor a la oferta, y en cuanto tiempo está rebasará su límite, para ello se realizó una proyección basada en el crecimiento poblacional (conapo, 2008) y en el consumo que se tendrá del ARCT del 2008 al 2030 (CEA, 2008). La figura 5.7 muestra cómo, si no se aplica una política de gestión sustentable, a partir del año 2016 no se podrá cubrir con la demanda de la cuenca, por lo que es importante buscar nuevas alternativas para sustituir las fuentes de abastecimiento actuales.

Figura 5. 7 Proyección de la oferta y demanda de la CRT



Fuente: Elaboración propia con base en información de conapo (2008) y CEA (2008).

Es evidente que las demandas de agua para el 2030 de aproximadamente 2,930,304 habitantes (conapo, 2008), requerirán de una oferta superior al 55 % de la actual ya proporcionada por el acueducto. Si se tiene en cuenta que los acuíferos están llegando al límite de sobreexplotación y que no se cuenta con otras fuentes alternas de agua, es lógico suponer que la mayor dependencia es del río Colorado. Por lo que siguiendo el actual *modelo de gestión tradicional*, se requerirá para el 2016 proyectar una nueva ampliación del acueducto, llegando así a una capacidad de conducción cercana a los 7 m<sup>3</sup>/s. Estos volúmenes de agua exigirán una gran gestión de negociación del organismo operador y de las autoridades municipales para lograr mayores concesiones de agua, frente a un panorama que limita las posibilidades de mayores accesos, por la gran competencia y posibles disputas por el recurso.



Así que es necesario cambiar *el modelo de gestión tradicional* a un *modelo de gestión sustentable*, y mirar hacia nuevas formas de abasto que sean eficientes a largo plazo y que además contribuyan a reducir la sobredemanda de los recursos hídricos.

Un tipo de fuente alterna que ayudaría a proveer de agua a la cuenca sería el uso de agua de mar, pero esta fuente resultaría muy costosa, ya que aparte de invertir en la instalación de las plantas desoladoras, hay que considerar los costos de operación y el daño al ambiente que estas ocasionan.

Así que otra fuente alterna a considerar es reutilizar el agua tratada en aquellos usos que no requieran agua de primera calidad, ya que en el modelo actual no se utiliza dicho recurso, por lo que se tendrían que trabajar más en la política de reuso y en el mantenimiento óptimo de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), para que todas operen a su total capacidad instalada y operen de forma eficiente y cumpliendo con las normas de calidad. Actualmente el agua residual tratada en Tecate es de  $4.29 \text{ hm}^3$  y reutilizada  $0.02 \text{ hm}^3$  que no representa ni el 1% de lo tratado y en Tijuana el agua residual tratada es  $75.69 \text{ hm}^3$  y reutilizada  $2.29 \text{ hm}^3$ , lo cual representa apenas el 3% de lo tratado (CEA, 2008a). Así que queda claro que es necesario utilizar más el agua tratada.

En cuanto al uso más eficiente del agua en la CRT, el Programa de Acciones y Proyectos para la Sustentabilidad Hídrica Visión 2030 del Estado de Baja California (CONAGUA, 2012), proponen ciertas medidas para el ahorro del agua en los municipios de Tecate y Tijuana. En este programa de acciones se realizó gracias a un Análisis Técnico Prospectivo (ATP) que estima las brechas hídricas, las cuales se determinan por el déficit que se presenta entre oferta sustentable y la demanda de agua para el año 2030 en el eje de cuencas y acuíferos en equilibrio; donde el municipio de Tecate obtuvo una brecha de  $14 \text{ hm}^3$  (donde su oferta es de  $12 \text{ hm}^3$  y su demanda de  $26 \text{ hm}^3$ ) y en Tijuana una brecha de  $79 \text{ hm}^3$  (donde su oferta es de  $98 \text{ hm}^3$  y su demanda de  $177 \text{ hm}^3$ ). La brecha de ambas ciudades es de  $93 \text{ hm}^3$ , muy parecida a la que se obtuvo al hacer la proyección de la oferta y demanda de la CRT mencionada anteriormente, donde la brecha estimada es de  $92.1 \text{ hm}^3$ .

En la tabla 5.3 se muestra las medidas propuesta que ayudaran a cerrar la brecha hídrica que se tendrá en el año 2030 en el municipio de Tecate, pero estas medidas en conjunto aportan  $6.15 \text{ hm}^3$ , las cuales no son suficientes para cerrar la brecha que se tiene proyectada al 2030.

## Modelación de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tijuana mediante el WEAP

Tabla 5. 3 Medidas que ayudan a cerrar la brecha hídrica en el municipio de Tecate

Medidas	Cantidad	Unidad	Contribución a la brecha (hm <sup>3</sup> )
Tecnificación de riego parcelario	58	ha	0.40
Riego de alta precisión	45	ha	0.10
Riego por aspersión	84	ha	0.02
Mejora de eficiencia secundaria	169	ha	0.02
Sustitución de inodoros domésticos	43,187	hab	0.30
Sustitución de inodoros comerciales	14,376	hab	0.04
Nuevos inodoros domésticos	21,976	hab	0.20
Nuevos inodoros comerciales	16,380	hab	0.04
Sustitución de regaderas ahorradoras	33,590	hab	0.20
Nuevas regaderas ahorradoras	38,271	hab	0.20
Llaves nuevas de bajo flujo	38,271	hab	0.05
Mingitorios secos en comercios	2,053	mingitorios	0.30
Reparación de fugas domesticas	102,658	hab	0.40
Reparación de fugas comerciales	102,658	hab	0.10
Reuso de aguas grises domesticas	51,329	hab	0.40
Recarga de acuíferos	1	ha	0.10
Reuso de agua tratada	Sin dato	Sin dato	3.20
<b>Total</b>			<b>6.07</b>

Fuente: PAPSHE de Baja California, CONAGUA (2012).

En la tabla 5.4 muestra las medidas propuesta que ayudaran a cerrar la brecha hídrica que se tendrá en el año 2030 en el municipio de Tijuana, pero estas medidas en conjunto aportan 29.83 hm<sup>3</sup>, las cuales no son suficientes para cerrar la brecha hídrica proyectada al 2030.

Tabla 5. 4 Medidas que ayudan a cerrar la brecha hídrica en el municipio de Tijuana

Medidas	Cantidad	Unidad	Contribución a la brecha (hm <sup>3</sup> )
Tecnificación de riego parcelario	43	ha	0.30
Riego por aspersión	7	ha	0.00
Sustitución de inodoros domésticos	659,391	hab	4.10
Sustitución de inodoros comerciales	219,504	hab	0.60
Nuevos inodoros domésticos	258,752	hab	2.70
Nuevos inodoros comerciales	189,336	hab	0.50
Sustitución de regaderas ahorradoras	512,860	hab	3.00
Nuevas regaderas ahorradoras	442,374	hab	2.60
Llaves nuevas de bajo flujo	442,374	hab	0.60
Mingitorios secos en comercios	27,292	Mingitorios	4.30
Reparación de fugas en la red de distribución	2,754	fugas	3.30
Agua activada industrial	Sin dato	Sin dato	0.03
Plantas desalinizadoras	1	Planta	7.80
<b>Total</b>			<b>29.83</b>

Fuente: PAPSHE de Baja California, CONAGUA (2012).

La contribución que se tendría en el ahorro al aplicar las medidas antes mencionadas sería de 35.98 hm<sup>3</sup> (ambos municipios) que representa apenas el 39% de la brecha hídrica calculada (92.1 hm<sup>3</sup>), quedando así por cubrir 56.1 hm<sup>3</sup>. Esto deja ver que la cuenca tiene que buscar más fuentes alternas de las ya mencionadas o ser más eficiente en el uso del agua.

En definitiva la Cuenca del Río Tijuana debe de cambiar de modelo gestión tradicional a un modelo de gestión sustentable de lo contrario no podrá con las demandas futuras, así que tendrá que cambiar el enfoque administrativo a un integral, donde se manejen más opciones en la distribución y en el consumo.

Así que el modelo de gestión de los recursos hídricos de la CRT creado en WEAP, será una herramienta muy importante para crear escenarios, que permitan evaluar las diferentes alternativas en el manejo del agua y así poder proponer acciones con un enfoque sustentable.

## **CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES**

El modelo de la Cuenca del Río Tijuana (CRT) en la plataforma WEAP, es sin duda una herramienta que facilita la representación del modelo actual de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca, ya que permite una amplia visualización física de los elementos que interactúan en ella, para así realizar evaluaciones de estrategias de manejo de recursos.

El modelo de la Cuenca del Río Tijuana en WEAP quedo como un sistema de simulación para representar cualquier escenario propuesto como política de gestión y evaluar su viabilidad.

Del análisis que se presentó en la parte de validación y resultados del modelo, muestra que uno de los principales escenarios que se deben hacer, es sin duda, el referente al crecimiento poblacional, ya que este análisis que se realizó de una manera sencilla, nos dejó ver un panorama difícil en un futuro inmediato (2016).

El modelo de gestión actual o tradicionalista evaluado en el presente trabajo, deja ver que la cuenca se encuentra en una situación crítica y que es necesario que se considere un modelo de gestión sustentable en donde se incorporen fuentes alternas para el abastecimiento de agua y no solo las que se tiene actualmente, como es el ARCT y subterráneas. Las cuales podrían provenir del uso de aguas tratadas y del uso de agua de mar pero esta se debe considerar como una última instancia (debido a su alto costo de instalación y operación de las plantas desaladoras; e impacto al ambiente).

Sin duda, al analizar la gestión de los recursos hídricos que se ha tenido en la cuenca a lo largo del tiempo, se puede ver que siempre se ha desarrollado bajo una visión a muy corto plazo y siempre reaccionando para dar soluciones a problemas inmediatos, y esto puede deberse a que la planeación no considera escenarios a largo plazo; además de una ineficiente política del manejo del agua.

Es importante considerar un cambio en el manejo del agua de la cuenca, en el que se incorpore un modelo de gestión sustentable que incluya a todos los actores y permita la evaluación de políticas a largo plazo.

## Referencias bibliográficas

- Aboites, L. 1998. El agua de la Nación. Una historia política de México (1888-1946). México, CIESAS.
- Aparicio Mijares, F.J. (2002). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Ed. LIMUSA, S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores, México.
- ASCE. "Artificial Neural Networks in Hydrology 1: Preiiminary Concepts". Journal of Hydrologic Engineering. 5(2), 115-123. 2000.
- ASCE. "Artificial Neural Networks in Hydrology 2: Hydrology Applications". Journal of Hydrologic Engineering. 5(2), 124-137. 2000.
- Barkin, D. y King T. 1978. Desarrollo económico regional (Enfoque por cuencas hidrográficas de México). Ed. Siglo veintiuno editores. 3a. Edición-México, D.F.
- Basterrechea M., Dourojeanni A., García L., Novara J. y Rodríguez R. 1996. Lineamientos para la preparación de proyectos de manejo de cuencas hidrográficas para eventual financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo. Washington. D.C.
- Brooks, David, 2005, "Beyond Greater Efficiency: The Concept of Water Soft Paths", Canadian Water Resources Journal, Canada, Vol. 30, pp. 83-92.
- CEA (2003). "Programa Estatal Hidráulico 2003-2007", Comisión Estatal del Agua de Baja California, septiembre de 2003, pp. 136.
- CEA (2007). "Informe mensual del acueducto río Colorado-Tijuana Diciembre 2007". Comisión Estatal del Agua de Baja California, pp. 3-11.
- CEA (2008a). "Informe mensual del acueducto río Colorado-Tijuana Diciembre 2008". Comisión Estatal del Agua de Baja California, pp. 5-11.
- CEA (2008b). "Programa Estatal Hídrico 2008-2013", Comisión Estatal del Agua de Baja California, pp. 159.
- Cerny, V. (1985). "Thermodinamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm". Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, No. 1, pp. 41-51.
- CESPT (2006). "Historia de los Acueductos en Tijuana y Playas de Rosarito", Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, marzo de 2006.
- CILA (1972). "Acta No. 240: Entregas de Emergencia de Aguas del Río Colorado para su Uso en Tijuana", Comisión Internacional de Límites y Aguas, junio de 1972, pp. 13.
- CONAGUA (2002). "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Las Palmas, Estado de Baja California". Comisión Nacional del Agua, abril de 2002, pp 23.
- CONAGUA (2003). "Programa Hidráulico Regional 2002-2006". Gerencia Regional I Península de Baja. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (2006). "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tijuana, Estado de Baja California". Comisión Nacional del Agua, octubre de 2006, pp 20.
- CONAGUA (2007a). "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tecate, Estado de Baja California". Comisión Nacional del Agua, abril de 2007, pp 21.

- CONAGUA (2007b). "ERIC III-2007 Extractor Rápido de Información Climatológica de información contenida en la base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)". Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (2008). "Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación", Comisión Nacional del Agua, agosto de 2008, pp. 17-18 y 103-105.
- CONAGUA (2009). "Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas SIGMAS", Comisión Nacional del Agua. Consulta en 2009.
- CONAGUA (2012). "Programa de Acciones y Proyectos para la sustentabilidad Hídrica Visión 2030 Estado de Baja California".
- Dourojeanni A. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Serie: Recursos naturales e infraestructura. CEPAL. Santiago de Chile.
- Elwell, P. T. y Polerman, T. 1980. Uxpanapa, reacomodo y desarrollo agrícola en el trópico mexicano. INIREB. Xalapa, Ver. México.
- Estrela Teodoro (1992), "Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos", Centro de Estudios Hidrograficos. Madrid: Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación.
- Forbes, F. y Hodges, R. 1971. "New approaches to comprehensive planning in Canada". Water Resources Bulletin. Vol. 7, N° 5.
- Ford, D.T., Hamilton, D. "Computer Models for Water-Excess Management." Larry W. Mays ed., Water resources handbook, McGraw-Hill, NY. 1996.
- Fuentes Yagüe, José Luis.; Cruz Roche, Jose (1990). "Curso Elemental de Riego". Servicio de Extensión Agraria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Girardet, Herbert, 2006, "Urban Metabolism: London Sustainability Scenarios", Factor 10: Engineering for Sustainable Cities, Cambridge, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Henderson Colloquium, 28 p.
- Gleick, Peter, Heather Cooley, Michael Cohen, Mari Morikawa, Jason Morrison, Meena Palaniappan, 2009, The world's water 2008-2009, The Biennial of Freshwater Resources/Pacific Institute.
- Grigg, N. 1996. Water Resources Management, Principles, Regulations and Cases. McGraw-Hill. USA. Pp. 435
- Hillier, F.S. and Lieberman (1980). "Introduction to operations research". Holden Day Inc., USA.
- INECC (2010). "Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización". Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, pp. 188-191.
- INEGI (2000). "Censo general de población y vivienda 2000", Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Journel, A.G. and Huijbregts, CH.J. (1997). Mining Geostatistics. ACADEMIV PRESS, Great Britain.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D. and Vecchi, M.P. (1983), "Optimization by simulated annealing". Science, Vol.220, No. 4598, pp 671-220.

- Konikow, L.F., Bredehoeft, J.D. 1992. Ground-water models cannot be validated. *Advances in water Resources* 15(1):75-83.
- Konikow, L.F. 2002. Uso de modelos numéricos para simular el flujo y el transporte subterráneo. *Isótopos Ambientales en el ciclo hidrológico*. Instituto Geológico y Minero de España. *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. IGME. Temas: Guías y manuales. ISBN: 84-7840-465-1. España.
- LAN (2004). *Ley de Aguas Nacionales*, DOF, 29 de abril de 2004.
- Larsen, Tove, Willi, Gujer, 1997, "The concept of sustainable urban water management", *Elsevier Science*, Gran Bretaña, vol. 35, núm. 9, pp. 3-10.
- López, M. 2005. "La situación de las cuencas en México". En: Vargas, S. y Mollard, E. (editores) *Problemas Socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*. IMTA-IRD-CONACYT-SEMARNAT. México. pp. 36-52.
- Loucks, D. (1995). "Developing and Implementing Decision Support Systems: A Critique and a Challenge". *Water Resources Bulletin*, Vol. 31, No. 4, pp. 571-582.
- Maidment, D.R. (2002). *Arc Hydro Gis for Water Resources*. ESRI, USA.
- Melville R. 2000. "La cuenca fluvial, como territorio fragmentado para la organización del aprovechamiento, conservación y administración de los recursos hídricos". En: *Asignación, productividad y manejo de recursos hídricos en cuencas*. Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI), Serie Latinoamericana No. 20. México.
- McCartney, M.P. 2007. *Decision support systems for large dam planning and operation in Africa*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 47 p. (IWMI Working Paper 119).
- McCoy, H. and Johnston, K. (2002). *Using ArcGIS Spatial Analyst*. ESRI, USA.
- Navarro Chaparro, Shirley Karina (2010). *La problemática del agua urbana en la ciudad de Tijuana, Baja California y algunas alternativas para una gestión sustentable*. Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente. El Colegio de la Frontera Norte, A.C. y Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.
- Nemhauser, G.L. and Wolsey, L.A. (1998). "Interger and combinatorial optimization". John Wiley & Sons Inc., USA.
- Ojeda Revah Lina y Espejel Carvajal Martha Ilena, 2008. "La cuenca binacional del río Tijuana: un enfoque biohistorico". *Economía, sociedad y territorio*, vol. VIII, núm. 26 2008 pp. 517-548.
- Oropeza, J. 1999. "Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas". En IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. *Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas*. ANEI, A.C.
- Rodríguez, Emiliano, 2004, "La Necesidad de una política nacional de agua y saneamiento para México", en Cecilia, Tortajada, Asit, Biswas, coord., *Precio del agua y participación pública-privada en el sector hidráulico*, México, Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C./Miguel Ángel Porrúa, pp. 29-38.
- Salcedo Sanchez Edith (2012) "Modelos Hidro-Económico basado en variables de calidad y cantidad para el apoyo en la toma de decisiones en el manejo de aguas subterráneas". Tesis Doctoral, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca de Lerdo, México.

- Salgado Rabadán, J.H., Güitrón de los Reyes, A., 2012. "Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos". Instituto Mexicanos de Tecnología del Agua.
- Sanvicente-Sánchez, H. (2003). "Metodología de Paralelización del Ciclo de Temperatura en Algoritmos Tipo Recocido Simulado". Tesis Doctoral, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Cuernavaca, México.
- Saroj, Sharma, Kala, Vairavamoorthy, 2008, "Urban water demand management: prospects and challenges for the developing countries", *Water and Environment Journal*, Países Bajos, UNESCO-IHE, núm. 23, pp. 210–218.
- Sasieni, M., Yaspan, A. and Friedman, L. (1976). "Investigación de operaciones: Métodos y problemas". Ed. Limusa, México.
- SEI (2009a). "WEAP, Water Evaluation and Planning System: Tutorial", Stockholm Environment Institute.
- SEI (2009b). "Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP", Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute.
- Singh, V. y Woolhiser, D. "Mathematical Modeling of Watershed Hydrology". *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE. Julio-Agosto. 2002.
- SDSU (2005). "A Binational Vision for the Tijuana River Watershed". San Diego, Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego State University.
- Tortolero, A. 2000. *El Agua y su historia, México y sus desafíos hacia el siglo XXI*. Siglo XXI editores. Primera edición en español. México.
- UNFCC (2012). "Materiales de Capacitación del GCE sobre evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación". United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Valencia, Juan C. "La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México: Un Nuevo Paradigma en el Manejo del Agua". Seminario de Gestión Integral de Cuencas Hídricas: Teoría y Práctica. Junio, 2004. México D.F.
- Vargas, S. 2004. *De la centralización a la gestión del agua por cuenca hidrológica: conflictos por el agua en la cuenca Lerma-Chapala, 1990-2003*. Tesis de Licenciatura en Sociología. FCPS-UNAM. México. Pp. 149
- Ward R.C. "Principles of Hydrology". McGraw-Hill Book Company. UK. Limited, London. 1975.
- White, A. y Ford, R. 1994. "Common Property and Collective Action: Lessons from Cooperative Watershed Management in Haiti". *Economic Development and Cultural Change*, 43 (1): 1- 41.
- Wright, D.R. y Vela, R. (2005) "Atlas de la Cuenca del Río Tijuana". San Diego State University y Colegio de la Frontera Norte.
- Wurbs, Ralph A. "Water Management Models. A Guide to Software". Prentice-Hall Inc. 1995.
- Wolff, Gary, Peter, Gleick, 2002, "The Soft Path for Water", en Peter, Gleick, coord., *The World's Water 2002-2003*, Estados Unidos de Norteamérica, The Biennial of Freshwater Resources/Pacific Institute.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A. (2005a). "WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 1: Model Characteristics" *Water International*, Vol. 30, No.4, December 2005, pp. 487–500.



- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A. (2005b). "WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation" *Water International*, Vol. 30, No. 4, December 2005, pp. 501–512.
- Yeomans Galli, Laura M. 2004, "Modelos Hidrologicos en la gestion integrada de cuencas", CIVITEC

### Referencias en WEB:

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (<http://www.epa.gov/espanol/>).
- Census 2000 Data for the State of California ([www.census.gov/census2000/states/ca.htm](http://www.census.gov/census2000/states/ca.htm)).
- Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos Sección Mexicana (<http://www.sre.gob.mx/cila/>).
- Comisión Nacional del Agua (<http://www.Conagua.gob.mx/>).
- Conapo 2008. Proyecciones (<http://www.conapo.gob.mx/>).
- Department of Water Resources California Data Exchange Center. Barrett Dam Information. (<http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=BRT&type=dam>).
- Department of Water Resources California Data Exchange Center. Morena Dam Information. (<http://cdec.water.ca.gov/cgi-progs/profile?s=MOR&type=dam>).
- Guía de uso del WEAP ([http://www.weap21.org/downloads/WEAP\\_User\\_Guide.pdf](http://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf)).
- Información de la Presa Barrett ([http://findlakes.com/barrett\\_california~ca00106.htm](http://findlakes.com/barrett_california~ca00106.htm)).
- Información histórica de precipitación del estado de California (<ftp://ftp.water.ca.gov/users/dfmhydro/Monthly%20Historical%20Rain/>).
- Información histórica de temperatura del estado de California (<ftp://ftp.water.ca.gov/users/dfmhydro/Monthly%20Historical%20Temperature/>).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (<http://www.inegi.org.mx/>).
- Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Comisión Nacional del Agua ([http://www.conagua.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=d2ecfab9-4cf2-4106-89a7-64faf4c90da1|Registro Público de Derechos de Agua \(REPDA\)|0|104|0|0|0](http://www.conagua.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=d2ecfab9-4cf2-4106-89a7-64faf4c90da1|Registro%20P%C3%BAblico%20de%20Derechos%20de%20Agua%20(REPDA)|0|104|0|0|0)).
- Tijuana River Watershed (<http://trw.sdsu.edu>).
- Watershed Sanitary Survey", San Diego Water Department, Vols. 1 of 5 (<http://www.sandiego.gov/water/pdf/watershedvol1.pdf>).
- WEAP –Water Evaluation and Planning System (<http://www.weap21.org/>).

## **Siglas y Acrónimos**

**ALR:** Presa Abelardo L. Rodríguez  
**ARCT:** Acueducto Río Colorado-Tijuana  
**CEA:** Comisión Estatal de Agua  
**CEPAL:** Comisión Económica para América Latina.  
**CESPT:** Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana  
**CESPTE:** Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate  
**CILA:** Comisión Internacional de Límites y Aguas.  
**COLEF:** Colegio de la Frontera Norte  
**CONAGUA:** Comisión Nacional del Agua.  
**Conapo:** Comisión Nacional de Población  
**CRT:** Cuenca del Río Tijuana  
**EC:** Presa El Carrizo  
**EPA:** Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency)  
**EU:** Estados Unidos  
**GIRH:** Gestión Integral de los Recursos Hídricos.  
**GWP:** Asociación Mundial para el Agua.  
**IDW:** Pesado por el inverso de la distancia.  
**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.  
**LAN:** Ley de Aguas Nacionales  
**MHA:** modelos hidrológicos agregados.  
**MHD:** modelos hidrológicos distribuidos.  
**ODM:** Objetivos de Desarrollo del Milenio.  
**OMS:** Organización Mundial de la Salud  
**ONU:** Organización de las Naciones Unidas  
**PTAR:** Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales  
**RS:** Recosido Simulado  
**SDSU:** San Diego State University  
**SEI:** Stockholm Environment Institute  
**UHRH:** unidades hidrológicas relativamente homogéneas.  
**UNESCO:** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.  
**UNFCC:** United Nations Framework Convention on Climate Change.  
**WEAP:** Water Evaluation and Planning System.