

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**POTENCIAL DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO CON AGUA
SUPERFICIAL, EN LA REGIÓN MEOQUI-DELICIAS**

POR:

ING. CLAUDIA ALEJANDRA REAZA VILLALOBOS

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

DICIEMBRE DE 2019



Potencial de abastecimiento público con agua superficial, en la región Meoqui-Delicias. Tesis presentada por Claudia Alejandra Reaza Villalobos como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Director de Tesis

Diciembre 2019

Fecha

Comité:

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Dra. María Socorro Espino Valdés
Dr. Adán Pinales Munguía
M.I. Daniel Sayto Corona

© Derechos Reservados
Claudia Alejandra Reaza Villalobos
Circuito Universitario No. 1
Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih. México

Diciembre 2019

6 de diciembre de 2019

ING. CLAUDIA ALEJANDRA REAZA VILLALOBOS
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"POTENCIAL DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO CON AGUA SUPERFICIAL, EN LA REGIÓN MEOQUI-DELICIAS"**.

ÍNDICE

1. Introducción

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Justificación
- 1.4 Hipótesis
- 1.5 Metodología

2. Análisis de la demanda de agua potable

- 2.1 Consumo

3. Análisis de la distribución de agua en una cuenca hidrológica

- 3.1 Distribución de agua superficial
- 3.2 Modelo de distribución de agua

4. Problemática para el abastecimiento de agua potable en una porción del acuífero Meoqui-Delicias

- 4.1 Zona de estudio
- 4.2 Problemas actuales en el abastecimiento de agua en la región
- 4.3 Identificación de localidades con problemas de abastecimiento de agua y factibilidad de fuente alterna
- 4.4 Crecimiento demográfico e incremento de la demanda de agua

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95 00
www.fing.uach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

5. Análisis del efecto de aprovechamiento de agua superficial para consumo humano en términos de distribución de agua en la cuenca

- 5.1 Construcción del modelo de distribución de agua
- 5.2 Calibración del modelo de distribución de agua
- 5.3 Determinación de políticas de operación
- 5.4 Simulación de escenarios

6. Presentación y análisis de resultados

7. Conclusiones y Recomendaciones

- 7.1 Conclusiones
- 7.2 Recomendaciones

8. Referencias

Anexos

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE

"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
UNACH



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No. 1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México C.P. 31125
Tel. (614) 442-9930
www.fing.unach.mx

A mis padres:

Por todo su amor y entrega incondicional, que me han convertido en la persona que soy.

Todo esto es por ustedes y para ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por estar siempre presente y guiar cada paso que he dado. Por mostrarme el camino y darme todo lo necesario para lograrlo.

A mis padres, por todo lo que hacen por mí, por acompañarme en un logro más, fruto de su esfuerzo y sacrificio. No me alcanzaría la vida para agradecerles tanto.

A mis hermanos, Nohemí y Luis, por ser mis compañeros de vida, mi motor y fuerza para siempre querer ser mejor.

A mi familia, amigos y a Fernando, por estar para mí y acompañarme en el camino.

A mi director de tesis, Dr. Humberto Silva Hidalgo, por todo su apoyo y acompañamiento a lo largo de estos años.

A mis asesores, Dr. Socorro Espino, Dr. Adán Pinales y M.I. Daniel Sayto por su apoyo en esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por formarme como Maestro en Ingeniería.

Resumen

En 2019, se realizó un análisis de distribución de agua en el Estado de Chihuahua, en la región de los municipios de Delicias, Meoqui, Julimes, Rosales y Saucillo. Esta región es abastecida para uso público urbano con agua subterránea, del acuífero Meoqui-Delicias. Este acuífero presenta un déficit del orden de 170 millones de metros cúbicos anuales y se ha determinado en estudios previos que tiene concentraciones de arsénico que superan el límite establecido por la norma de agua potable NOM-127-SSA1-1994. La condición de sobreexplotación del acuífero junto a sus características hidrogeoquímicas, sugieren la necesidad impostergable de buscar alternativas -como el tratamiento de fuentes actuales o el incorporar otras fuentes- para el abastecimiento de agua para consumo humano en cantidad y calidad adecuadas, brindándose de esta manera seguridad hídrica a los habitantes de la región. Se estimó la proyección de población y demanda a 30 años para 114 localidades, estimando un volumen demandado anual de 42hm³. Se consideró como una fuente alternativa de abastecimiento superficial a la presa Francisco I. Madero y se construyó un modelo matemático en RiverWare para realizar simulaciones de distintos escenarios de extracción. Se clasificaron las afectaciones generadas en cada escenario y se definieron volúmenes de extracción ideales, de 12 hm³ a 22 hm³, que permiten el abastecimiento de agua a la población con afectaciones moderadas para el resto de los usuarios de la presa.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	6
1.2.1	Objetivo general	6
1.2.2	Objetivos específicos.....	6
1.3	Justificación.....	6
1.4	Hipótesis.....	7
1.5	Metodología	7
2.	análisis de la demanda de agua potable	9
2.1	Consumo.....	9
2.1.1	Proyección de población	10
2.1.2	Demanda.....	10
2.1.3	Dotación	11
2.1.4	Gastos de diseño.....	11
3.	Análisis de la distribución de agua en una cuenca hidrológica	14
3.1	Distribución de agua superficial.....	14
3.2	Modelo de distribución de agua	14
3.2.1	Escurrimientos naturales	16
4.	Problemática para el abastecimiento de agua potable en una porción del acuífero Meoqui-Delicias.....	17
4.1	Zona de estudio	17
4.2	Problemas actuales en el abastecimiento de agua en la región	19
4.2.1	Disponibilidad de agua en el acuífero Meoqui-Delicias	19
4.2.2	Calidad del agua del acuífero Meoqui-Delicias	20
4.3	Identificación de localidades con problemas de abastecimiento de agua y factibilidad de fuente alterna.....	22

4.4	Crecimiento demográfico e incremento de la demanda de agua.....	32
4.4.1	Proyección de la población	32
4.4.2	Proyección de la demanda de agua	33
4.4.3	Alternativa de solución.....	34
5.	Análisis del efecto de aprovechamiento de agua superficial para consumo humano en términos de distribución de agua en la cuenca	36
5.1	Construcción del modelo de distribución de agua	36
5.2	Calibración del modelo de distribución de agua	40
5.2.1	Almacenamientos	42
5.2.2	Evaporación.....	43
5.2.3	Derrames	44
5.2.4	Extracción.....	45
5.3	Determinación de políticas de operación	46
5.4	Simulación de escenarios	50
6.	Presentación y análisis de resultados	65
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	69
7.1	Conclusiones	69
7.2	Recomendaciones.....	70
8.	REFERENCIAS.....	71
	ANEXOS	73
	ANEXO A. Localidades	73
	Curriculum Vitae	77

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante (CONAGUA, 2015b).....	9
Tabla 2.2. Coeficientes de variación diaria y horaria (CONAGUA, 2015b).....	13
Tabla 4.1. Disponibilidad media anual del acuífero Meoqui-Delicias (DOF, 2018).....	19
Tabla 4.2. Localidades que cuentan con proyección de población hasta el año 2030, calculada por el CONAPO.....	32
Tabla 5.1. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los valores de almacenamientos observados con los simulados.....	42
Tabla 5.2. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los valores de evaporación observados con los simulados.....	43
Tabla 5.3. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los volúmenes derramados observados con los simulados.....	44
Tabla 5.4. Estadísticos que miden el grado de ajuste de las extracciones observadas con las simuladas.....	45
Tabla 5.5. Tabla resumen de estadísticos para medir la calibración.....	46
Tabla 5.6. Políticas de operación para la extracción de un volumen adicional de agua en la presa.	46
Tabla 6.1. Tabla resumen de resultados (Déficit, demanda, extracciones y derrames) para cada escenario simulado.	65
Tabla 6.2. Afectaciones generadas en cada escenario de simulación.	68

Índice de Figuras

Figura 1.1. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, 2015 (CONAGUA, 2016).....	2
Figura 1.2. Franja de desiertos del mundo (JCAS, 2011).....	3
Figura 1.3. Área de interés.....	5
Figura 3.1. Esquema y puntos de control del sistema.....	15
Figura 4.1. Área de estudio.....	18
Figura 4.2. Concentraciones de arsénico (mg/L)(Espino-Valdés et al., 2009).	21
Figura 4.3. Rutas de abastecimiento propuestas.	23
Figura 4.4. Ruta propuesta de abastecimiento 1.	24
Figura 4.5. Ruta propuesta de abastecimiento 2.	25
Figura 4.6. Ruta propuesta de abastecimiento 3.	26
Figura 4.7. Ruta propuesta de abastecimiento 4.....	27
Figura 4.8. Ruta propuesta de abastecimiento 5.....	28
Figura 4.9. Ruta propuesta de abastecimiento 6.....	29
Figura 4.10. Localidades posibles de ser abastecidas mediante una fuente superficial....	31
Figura 4.11. Proyección de población.....	33
Figura 5.1. Licencia de uso RiverWare.	36
Figura 5.2. Interfase de RiverWare y construcción del modelo.	37
Figura 5.3. Objeto de datos en RiverWare.....	39
Figura 5.4. Programación de reglas para la simulación del escenario histórico.	40
Figura 5.5. Comparación de los almacenamientos históricos y los simulados.	42
Figura 5.6. Ajuste lineal de almacenamientos históricos y simulados.	42
Figura 5.7. Comparación de evaporaciones históricas y simuladas.....	43
Figura 5.8. Ajuste lineal de evaporaciones históricas y simuladas.....	43
Figura 5.9. Comparación de derrames históricos y simulados.	44
Figura 5.10. Ajuste lineal de derrames históricos y simulados.....	44

Figura 5.11. Comparación de extracciones históricas y simuladas.	45
Figura 5.12. Ajuste lineal de extracciones históricas y simuladas.....	45
Figura 5.13. Política de operación E1.....	47
Figura 5.14. Política de operación E2.....	47
Figura 5.15. Política de operación E3.....	48
Figura 5.16. Política de operación E4.....	48
Figura 5.17. Política de operación E5.....	49
Figura 5.18. Política de operación E6.....	49
Figura 5.19. Política de operación E7.....	50
Figura 5.20. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E1.....	51
Figura 5.21. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E1.	52
Figura 5.22. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E1.	52
Figura 5.23. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E2.....	53
Figura 5.24. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E2.	54
Figura 5.25. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E2.	54
Figura 5.26. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E3.....	55
Figura 5.27. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E3.	56
Figura 5.28. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E3.	56

Figura 5.29. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E4.....	57
Figura 5.30. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E4.	58
Figura 5.31. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E4.	58
Figura 5.32. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E5.....	59
Figura 5.33. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E5.	60
Figura 5.34. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E5.	60
Figura 5.35. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E6.....	61
Figura 5.36. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E6.	62
Figura 5.37. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E6.	62
Figura 5.38. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E7.....	63
Figura 5.39. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E7.	64
Figura 5.40. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E7.	64
Figura 6.1. Comparación de volúmenes totales demandados y de extracción en cada escenario.	66
Figura 6.2. Déficit promedio anual en cada escenario simulado.	66

Figura 6.3. Análisis del comportamiento de las extracciones totales.	67
Figura 6.4. Análisis del comportamiento del déficit medio anual.	68

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El agua es un elemento esencial para el desarrollo social y económico de una región, e indispensable para la supervivencia de los seres humanos. Del agua total en el planeta tierra, el agua dulce representa el 2.5% aproximadamente (Badii, Landeros, & Cerna, 2008) y de ésta, la que es accesible para el ser humano se reduce al 0.77% (CONAGUA, 2015c).

La disponibilidad del recurso hídrico en términos jurídico-administrativos es un tema de interés a nivel mundial, considerando que es el volumen de agua disponible en forma natural en una cuenca o acuífero, que no se encuentra comprometido. El crecimiento demográfico y el correspondiente aumento en el consumo, así como la diversificación de las actividades humanas, han triplicado las extracciones de agua en el mundo en los últimos 50 años. Aproximadamente el 20% del recurso hídrico es procedente de fuentes subterráneas y este valor se incrementa principalmente en las regiones áridas (UNESCO, 2010).

La disponibilidad de agua no es el único punto a considerar para atender las necesidades de la población o de una región. La calidad del agua en ocasiones puede ser una limitante para su aprovechamiento, sin embargo, en algunos casos se utiliza el líquido a pesar de una calidad inadecuada generando problemas de salud a la población. Por ejemplo, la contaminación natural del agua por arsénico afecta a 140 millones de personas en 70 países (UNESCO, 2010).

El uso del agua se refiere a la actividad en que se utilizará y varía de un país a otro, en tanto que los volúmenes que se consumen dependen de las prácticas de uso, de la población, así como de las condiciones ambientales, económicas y políticas de cada zona geográfica y país. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2010), México se encuentra entre los diez mayores consumidores del recurso hídrico. Aproximadamente el 60% del agua utilizada en el país proviene de fuentes superficiales y el resto de fuentes

subterráneas (CONAGUA, 2016). El mayor porcentaje de los volúmenes consumidos corresponden al sector agrícola, más del 70%, seguido del abastecimiento público urbano (CONAGUA, 2016). En la Figura 1.1 se muestra la distribución de usos consuntivos en México durante el año 2015.

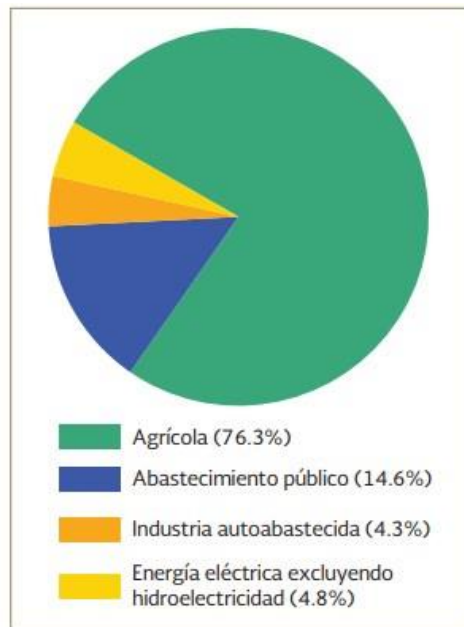


Figura 1.1. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, 2015 (CONAGUA, 2016)

El 14% del abastecimiento de agua en México se destina al uso público urbano, del cual, 9% proviene de aguas superficiales y 5% de aguas subterráneas (CONAGUA, 2015c); esto indica que más del 60% de la totalidad del agua que se destina al abastecimiento público urbano proviene de fuentes superficiales.

El agua superficial es la principal fuente de abastecimiento en el país, pero no lo es cuando se analiza a nivel estado. En las entidades que se ubican en las zonas áridas, la relación agua superficial/subterránea se invierte, es decir, se utiliza más agua subterránea que superficial. Del volumen total de agua que se aprovecha en el estado de Chihuahua, aproximadamente el 40% proviene de escurrimientos superficiales y alrededor del 60% de agua subterránea (JCAS, 2011).

En el estado de Chihuahua, el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento del uso público urbano, debido a las características geográficas y climatológicas que prevalecen. Se

encuentra ubicado en la franja de los grandes desiertos del mundo (Figura 1.2) y por lo mismo, el 73% del territorio estatal posee un clima árido y semiárido, que presenta condiciones de sequías cíclicas (GECH, 2017).

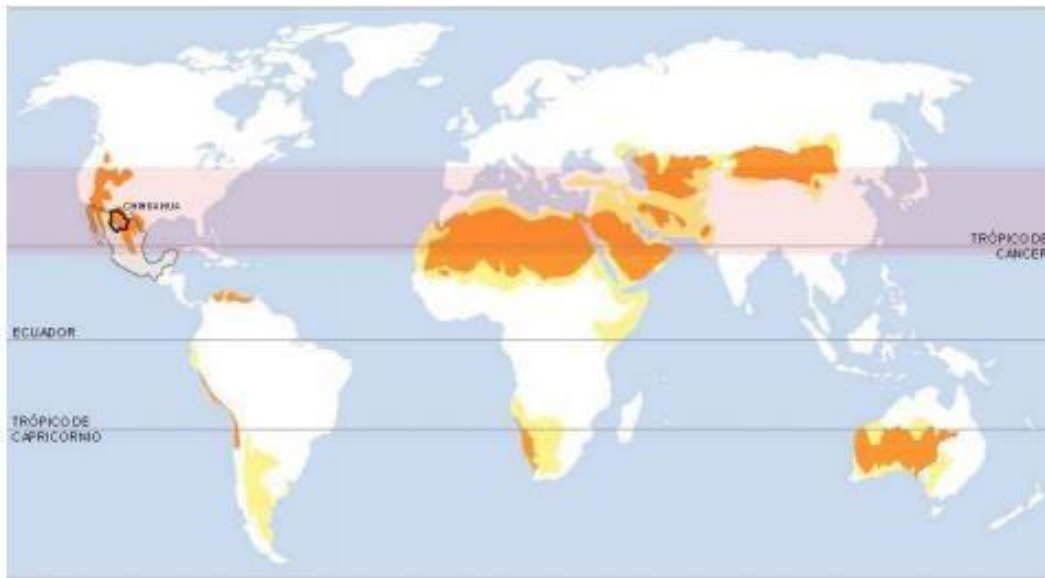


Figura 1.2. Franja de desiertos del mundo (JCAS, 2011).

En el estado de Chihuahua se ubican 61 acuíferos, de los cuales, 30 se encuentran en déficit actualmente (DOF, 2018), por lo que presentan déficit o desbalance hidrológico, que genera pérdida de volumen almacenado con implicaciones importantes en el medio ambiente, así como en las actividades socioeconómicas. Estos acuíferos son de suma importancia para el desarrollo del Estado, ya que son fuentes indispensables para los distintos sectores sociales y productivos.

Uno de los acuíferos en déficit en el Estado es el Meoqui-Delicias, en el que se ubican de manera parcial los municipios de Rosales, Julimes, Saucillo, La Cruz, San Francisco de Conchos y Delicias, y en su totalidad el municipio de Meoqui (CONAGUA, 2015a). En la superficie geográfica del acuífero también se ubica la mayor parte del área de uno de los principales distritos de riego del país, el DR 005 Delicias, así como el DR 113 Alto Río Conchos. En la zona también se localizan las Presas Francisco I. Madero y La Boquilla, entre cuyos fines se encuentra abastecer a estos distritos de riego.

La disponibilidad media anual de agua subterránea que según la NOM-011-CONAGUA-2015 (SEMARNAT, 2015) es el volumen que puede ser extraído de un acuífero, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio del ecosistema. En el acuífero Meoqui-Delicias no hay disponibilidad de agua y el déficit es del orden de 170 millones de metros cúbicos anuales (DOF, 2018). El 90% del volumen total de extracción de este acuífero se destina a la agricultura y el 7% corresponde a uso público-urbano (DOF, 2015).

Además, se ha determinado en estudios previos que este acuífero tiene concentraciones de arsénico, que superan el valor límite de 0.025 mg/L establecido por la norma de agua potable NOM-127-SSA1-1994, siendo el municipio de Meoqui uno de los más afectados al contener concentraciones por encima de los límites permisibles (Espino-Valdés, Barrera-Prieto, & Herrera-Peraza, 2009).

La condición de sobreexplotación del acuífero junto a sus características hidrogeoquímicas, sugieren la necesidad de búsqueda de alternativas para poder abastecer a la región de agua para uso y consumo humano, en la cantidad y calidad necesarias, de acuerdo a la demanda, brindando de esta manera seguridad hídrica a la región y específicamente a los asentamientos humanos.

En la Figura 1.3 se muestra el área geográfica del acuífero Meoqui-Delicias con sus zonas urbanas, distritos de riego y el sistema de presas de la zona, la presa Francisco I. Madero y la presa La Boquilla.

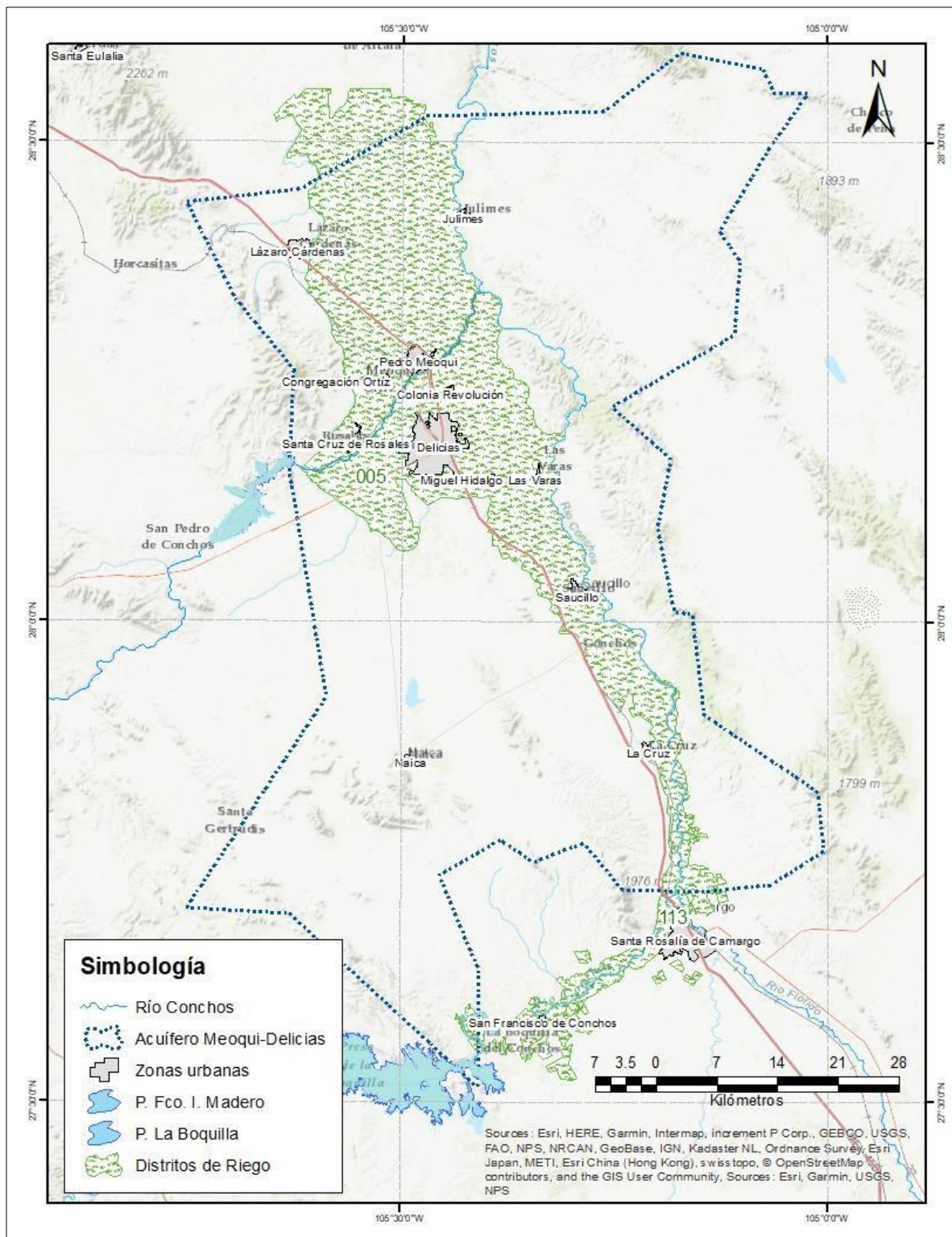


Figura 1.3. Área de interés

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de abastecimiento para uso público urbano, mediante agua superficial, en la región Meoqui-Delicias, que corresponde a la porción noroeste del acuífero del mismo nombre.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Recopilar y analizar información de localidades, población, presas y distritos de riego.
- b) Diagnosticar la problemática, en cantidad y calidad, del abastecimiento de agua para uso público urbano en la zona de estudio.
- c) Analizar el crecimiento demográfico y la demanda de agua para uso público urbano en la zona de estudio.
- d) Evaluar el potencial de abastecimiento de agua para uso público urbano en la zona de estudio, con agua superficial, mediante modelación y simulación matemática.
- e) Analizar y comparar los escenarios simulados.

1.3 Justificación

El acuífero Meoqui-Delicias que abastece de agua a la región se encuentra en déficit (DOF, 2015) y tiene concentraciones de arsénico fuera de norma. La concentración de este contaminante se incrementa en el esquema de sobreexplotación actual (Espino-Valdés et al., 2009). La demanda de agua en la región continuara incrementándose, por lo que el aprovechamiento actual no es sustentable, en cantidad ni calidad. Debido a esto, es necesario buscar alternativas de abastecimiento para uso público para la región Meoqui-Delicias.

1.4 Hipótesis

Es posible abastecer con agua superficial, para uso público urbano a la región de Meoqui-Delicias, sin generar efectos adversos en los otros usuarios del recurso hídrico.

1.5 Metodología

1. Recopilación y análisis de información.

Según la información del Consejo Nacional de Población (CONAPO) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se identificarán las localidades existentes y se analizarán los datos poblacionales en la zona de estudio. En la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se recopilará información histórica de presas, a escala mensual: almacenamiento, entradas, salidas y evaporación.

2. Elaboración de un diagnóstico de la problemática del abastecimiento de agua en la zona de estudio.

Se realizará un diagnóstico sobre la problemática del abastecimiento de agua en la zona de estudio, considerando la disponibilidad de agua y su calidad. Con base en la información existente en estudios previos, se caracterizará la condición del acuífero Meoqui-Delicias y se identificarán las poblaciones que presentan problemas de calidad del agua, que pueden incidir en la calidad de vida de las personas.

3. Análisis demográfico y de la demanda de agua para uso público urbano.

Con base en la información del INEGI y CONAPO, se elaborará un análisis del crecimiento de población en la zona de estudio a un horizonte de planeación de 30 años. Se analizará

el comportamiento del consumo de agua en la región y se determinará la dotación y demanda de agua de las poblaciones identificadas previamente.

4. Evaluación de la factibilidad del abastecimiento de agua para uso público urbano con agua superficial.

Se evaluará el potencial de abastecimiento de agua para uso público urbano en la zona de estudio, mediante agua superficial proveniente de la presa Francisco. I. Madero (inicialmente), para lo cual se construirá un modelo matemático de la presa y su cuenca de aporte y mediante simulación matemática se analizarán diferentes alternativas y sus efectos en el volumen que se distribuiría al Distrito de Riego 05.

5. Análisis y comparación de los escenarios simulados

Se realizará una comparación y análisis de los escenarios simulados, y se evaluarán las posibles alternativas para el abastecimiento de agua para uso público urbano con agua superficial, así como las recomendaciones que resulten pertinentes.

2. ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE AGUA POTABLE

2.1 Consumo

El consumo es la parte del agua suministrada que utilizan los usuarios. El consumo de agua depende de si la zona es rural o urbana. En el caso de las zonas urbanas, el consumo se determina de acuerdo con el tipo de usuarios y se divide según su uso: doméstico y no doméstico (comercial, industrial y de servicios públicos). El consumo doméstico se refiere al agua usada en las viviendas y la proyección total de este volumen se realiza multiplicando las proyecciones de población por sus correspondientes consumos per cápita.

Para obtener el consumo se debe realizar un análisis del organismo operador. En caso de que no se cuente con dicha información, la CONAGUA a través del Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE), desarrolló el estudio “Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México”, donde analiza los consumos de agua potable en localidades mayores a 20,000 habitantes, analizando los factores que intervienen en la determinación del consumo, considerando variables como el clima. En la Tabla 2.1 se muestran los valores promedios de consumo estimados, según el estudio.

Tabla 2.1. Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante (CONAGUA, 2015b).

Clima	Consumo l/hab/d			Subtotal por clima
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido Húmedo	198	206	243	201
Cálido Subhúmedo	175	203	217	191
Seco o Muy Seco	184	191	202	190
Templado o Frío	140	142	145	142

2.1.1 Proyección de población

Los datos censales proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año en que se levantó la información, se refieren a la población actual. En el caso de la población de proyecto, es la población que se espera tener al final del periodo de diseño del sistema de agua potable y alcantarillado.

Para la proyección de población es necesario utilizar los datos oficiales del Consejo Nacional de Población (CONAPO), que es la única dependencia facultada en México para realizar proyecciones de población. La tasa de crecimiento generalmente es variable en el tiempo, en la cual intervienen las tasas de fecundidad, mortalidad, esperanza de vida, migración internacional y nacional.

2.1.2 Demanda

Según el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) numero 4, de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015b), la demanda es la cantidad de agua que se requiere en las tomas para consumo de un área de proyecto y considerando a los diferentes usuarios de la zona. La demanda actual es la suma de los consumos y las pérdidas físicas, como son fugas en el sistema hidráulico.

Para la estimación de las pérdidas físicas es recomendable realizar trabajos de campo, ya que las pérdidas dependen de distintos factores como la presión, la calidad de la tubería y accesorios, tipo de material, antigüedad de los elementos y el mantenimiento que se les realice. Según los estudios elaborados en distintas partes de México, las perdidas físicas son en promedio del 40% (CONAGUA, 2015b). Según el Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO, 2019), para el año 2017 la eficiencia física promedio en el estado de Chihuahua fue del 61.8%.

La demanda futura es la proyección de la demanda, la cual se calcula con base en los consumos según las clases socioeconómicas, la demanda actual y la proyección del crecimiento demográfico y sus actividades económicas.

2.1.3 Dotación

La dotación es la cantidad de agua que se requiere para satisfacer la demanda de la población en un día medio anual. Es el volumen al día por habitante, considerando a todos los usuarios, en un día medio anual (l/hab/día) (CONAGUA, 2015b).

La dotación se determina por el organismo operador a partir de los consumos registrados, o mediante un estudio de demandas. Para un proyecto de una fuente nueva, se debe realizar el análisis para la proyección de consumos y perdidas en un periodo de al menos 20 años de operación (CONAGUA, 2015b), ya que no se debe considerar una dotación constante. Debe considerarse una oferta sustentable a largo plazo y esta no deberá ser mayor al agua asignada, a menos que sea factible la obtención de derechos. De igual modo, deben considerarse otros posibles usos, concesiones y asignaciones.

Para estimar la oferta de aguas subterráneas, es necesario considerar la situación actual del acuífero. En el caso de las fuentes superficiales, la proyección debe realizar un amplio análisis de caudales históricos.

2.1.4 Gastos de diseño

Las fuentes de abastecimiento se analizan con el gasto medio anual y la capacidad de la infraestructura debe considerar las variaciones diarias y horarias de la demanda. Con base en la dotación, se calculan los gastos medio diario, máximo diario y máximo horario, considerando también coeficientes de variación.

La cantidad de agua que se requiere para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio, se le denomina gasto medio, el cual se determina con base en la dotación.

Para satisfacer las necesidades de un día de máximo consumo, a la hora de máximo consumo, se determinan los gastos máximo diario y máximo horario, respectivamente (CONAGUA, 2015b).

Estos gastos se calculan mediante las siguientes ecuaciones.

$$Q_{Md} = CV_d Q_{med} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$Q_{Mh} = CV_h Q_{Md} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

Q_{Md} = Gasto máximo diario (l/s)

Q_{Mh} = gasto máximo horario (l/s)

CV_d = Coeficiente de variación diaria

CV_h = Coeficiente de variación horaria

Q_{med} = Gasto medio diario (l/s)

Los coeficientes de variación consideran la fluctuación de la demanda según los días laborales y las distintas actividades de la población, ya que la demanda varía de manera diaria y horaria.

Para determinar estos coeficientes, es recomendable realizar un estudio de demanda en la zona. En caso de no ser posible, se pueden considerar los valores establecidos en 1993 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), los cuales se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Coeficientes de variación diaria y horaria (CONAGUA, 2015b).

Concepto	Valor
Coeficiente de variación diaria (CV_d)	1.20 a 1.40
Coeficiente de variación horaria (CV_h)	1.55

3. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UNA CUENCA HIDROLÓGICA

3.1 Distribución de agua superficial

En la distribución de agua superficial se involucran cuatro componentes principales: (1) el comportamiento hidrológico de la cuenca, (2) la infraestructura (presas) y sus políticas de operación, (3) las políticas de distribución de agua en la cuenca y (4) el funcionamiento hidráulico de los cauces naturales (Silva-Hidalgo, 2010).

El comportamiento hidrológico determina la disponibilidad natural de agua que puede ser distribuida, y las políticas de operación establecen la parte del volumen aprovechable.

Las presas son estructuras que permiten almacenar y regularizar el escurrimiento en la cuenca. Los sistemas de presas se interconectan mediante cauces naturales, por lo que tanto las presas como los cauces, son elementos claves en la modelación de la distribución de agua en una cuenca.

3.2 Modelo de distribución de agua

Para conceptualizar el comportamiento de una cuenca y sus sistemas de presas y ríos, se deben considerar los elementos físicos existentes en el sistema real y las relaciones funcionales que existen entre los elementos. Estos elementos deben representar las condiciones de la cuenca, como su geometría y la infraestructura existente en ella, y todos sus procesos físicos (Silva-Hidalgo, 2010).

Las cuencas que suelen tener un aprovechamiento moderado o intenso del recurso hídrico, en su mayoría cuentan con puntos de control de medición de variables hidrométricas, por lo que se les conoce como cuencas aforadas o instrumentadas. Estos puntos de control se ubican sobre los cauces, que pueden principalmente ser embalses (naturales o artificiales) o estaciones hidrométricas. En un modelo, adicional a las presas y estaciones hidrométricas, pueden existir

otros puntos de interés en la cuenca que deben ser considerados como puntos de control, como confluencias o puntos de extracción de agua. En la Figura 3.1 se muestra el esquema del sistema a analizar con sus puntos de control.

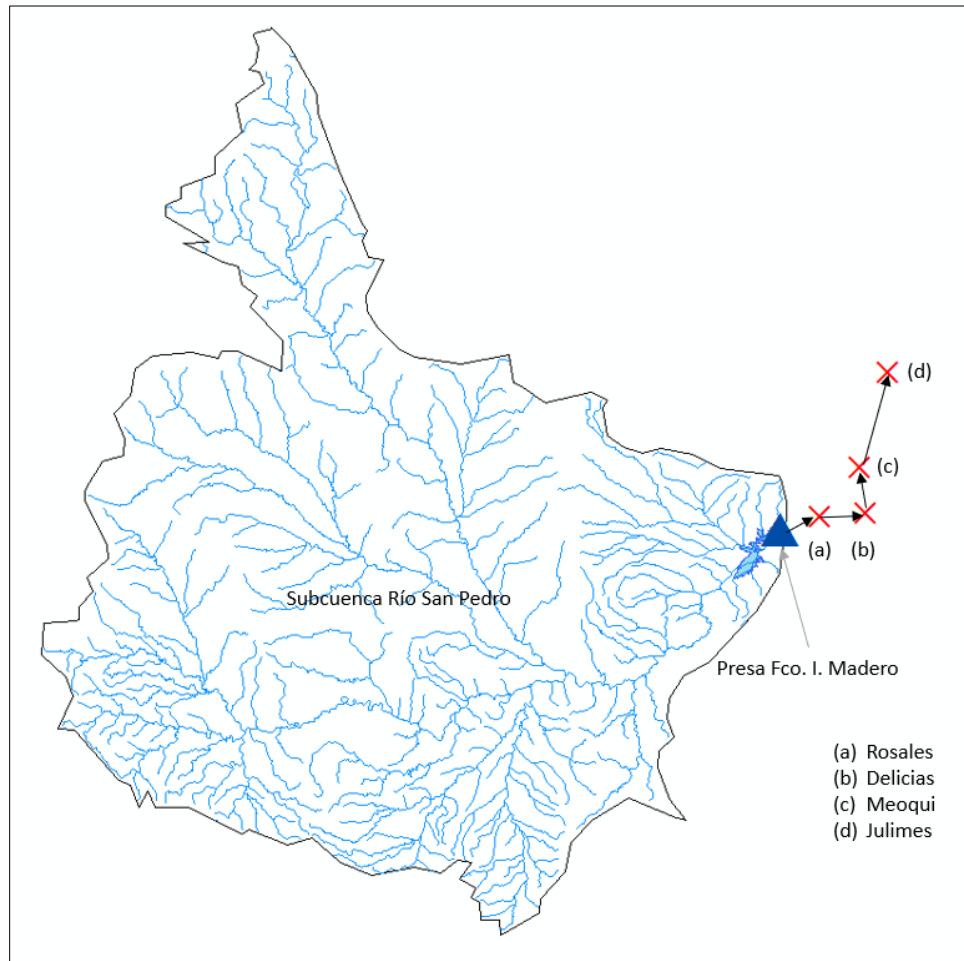


Figura 3.1. Esquema y puntos de control del sistema.

En la presa se presenta una acumulación de agua producida por la precipitación sobre el vaso y por los escurrimientos que llegan por el cauce sobre el cual fue construida la presa. El volumen almacenado sufre variaciones por la evaporación, filtración e infiltración, extracciones de agua (obra de toma) y derrames (obra de excedencia). Estos procesos se pueden estudiar mediante el funcionamiento de vaso, procedimiento que se fundamenta en la ecuación de la conservación de la masa, la cual realiza un balance de agua en la presa de almacenamiento (Silva-Hidalgo, 2010).

El almacenamiento de la presa esta dado por:

$$V(t + \Delta t) = E_p(t; \Delta t) - A_b(t; \Delta t) - E_v(t; \Delta t) + V(t) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En donde el E_p , es el volumen de agua que ingresa a la presa, A_b , es el volumen hacia aguas abajo (extracciones de la presa), E_v es la evaporación, V , el volumen almacenado previamente y Δt es el intervalo de tiempo de análisis.

El volumen que ingresa a la presa está dado por:

$$E_p(t; \Delta t) = I_m(t; \Delta t) + E_{cp}^{nr}(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

En donde las entradas a la cuenca son función de: I_m (volúmenes importados), E_{cp}^{nr} (Esgurrimiento natural por cuenca propia), R (volúmenes de retornos), E_{xt} (volúmenes extraídos en la cuenca) y E_x (volúmenes exportados fuera de la cuenca).

3.2.1 Esgurrimientos naturales

Existen distintos métodos para determinar los esgurrimientos naturales en una cuenca. En el caso de las cuencas no aforadas, es necesario utilizar métodos indirectos. Se puede transformar la precipitación de un evento, mediante una ecuación, en el esgurrimiento que se puede presentar en una cuenca con determinadas características físicas. Otro método, es la aplicación de modelos hidrológicos de lluvia-esgurrimiento para calcular el esgurrimiento natural (Silva-Hidalgo, 2010). Además del análisis de la relación lluvia-esgurrimiento, también existen métodos que permiten transferir información de cuencas adyacentes aforadas.

En las cuencas aforadas, los esgurrimientos naturales se pueden determinar mediante los registros históricos de esgurrimiento. Este análisis se realiza mediante el balance de agua superficial en la cuenca (SEMARNAT, 2015), por lo que es importante contar con registros históricos confiables, como: volúmenes de esgurrimiento, volúmenes y evaporados en las presas, extracciones y retornos (Silva-Hidalgo, 2010).

4. PROBLEMÁTICA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN UNA PORCIÓN DEL ACUIFERO MEOQUI-DELICIAS

4.1 Zona de estudio

El área de estudio se localiza en el estado de Chihuahua, entre las coordenadas 28°00' y 28°30' latitud norte y entre 105°15' y 105° 45' longitud oeste, en los municipios de Rosales, Julimes, Saucillo, La cruz, San Francisco de Conchos, Delicias y Meoqui. Esta región comprende la zona norte del acuífero Meoqui-Delicias y pertenece a la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos, ubicada alrededor del río San Pedro, desde su salida de la presa Francisco I. Madero hasta su confluencia con el río Conchos (Figura 4.1).

El clima en la zona es muy seco semicálido (INEGI, 2008), que según la clasificación de Köppen es BWhw. La temperatura media anual es de entre 18°C y 22°C (CONAGUA, 2015a). Las condiciones climáticas y geográficas hacen que esta región sea altamente vulnerable a impactos causados por sequías (Núñez-López, Muñoz-Robles, Reyes-Gómez, Velasco-Velasco, & Gadsden-Esparza, 2007).

En la zona de estudio se consideran 173 localidades, con 222,272 habitantes según el censo del año 2010 (INEGI, 2010), concentrándose más del 50% de la población en la ciudad de Delicias y aproximadamente el 10% en la ciudad de Meoqui.

Los municipios de Meoqui y Delicias, especialmente el ultimo, cuentan con el mayor desarrollo económico de la zona. En esta región se localiza el Distrito de Riego 005 Delicias, lo cual hace a la zona un reconocido productor. La industria, principalmente en Meoqui, con la instalación de la planta de Heineken, son un detonante económico para el área. Todo esto, posiciona a la región como un referente nacional en el sector agroindustrial (SIDE, 2017), por lo cual, a la zona de estudio se le identificará como región Meoqui-Delicias.

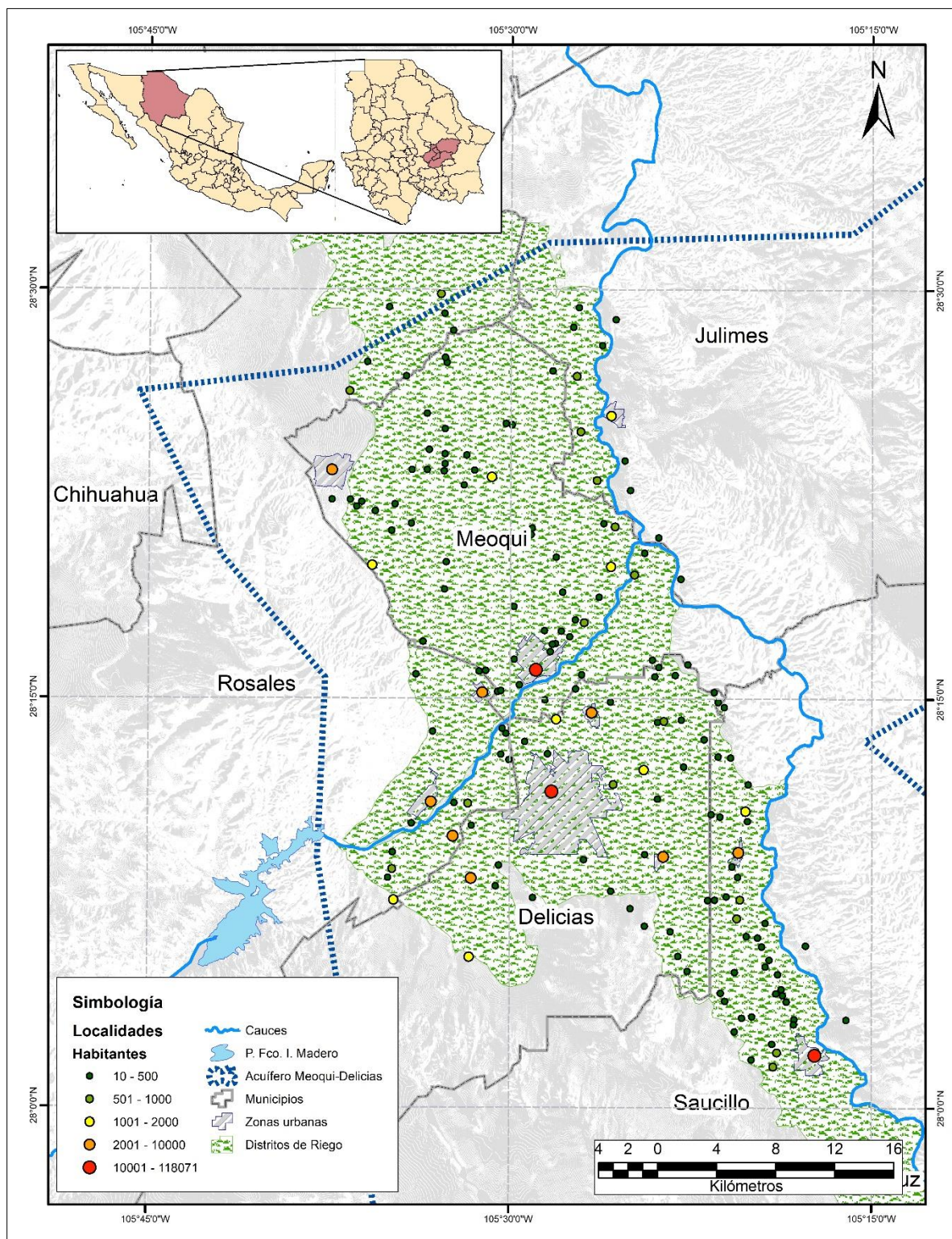


Figura 4.1. Área de estudio.

4.2 Problemas actuales en el abastecimiento de agua en la región

El abastecimiento de agua para uso público urbano en las localidades de la zona se realiza mediante fuentes subterráneas, siendo el acuífero Meoqui-Delicias esta fuente que cubre las necesidades de la región. El acuífero en cuestión se encuentra en déficit, adicional a esto, también presenta concentraciones de arsénico inadecuadas para consumo humano, las cuales incrementarán con la disminución de los niveles de agua en el acuífero ocasionados por el déficit que presenta. Estas condiciones generan un problema en el abastecimiento de agua en la región en cuanto a cantidad y calidad, por lo que se requiere una alternativa de solución con la que sea posible abastecer de agua a la región con la cantidad y calidad necesaria.

4.2.1 Disponibilidad de agua en el acuífero Meoqui-Delicias

En el mes de enero del año 2018, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la actualización de la disponibilidad media anual de los acuíferos con fecha de corte de diciembre de 2015 (DOF, 2018). En la Tabla 4.1 se presentan los datos publicados para el acuífero Meoqui-Delicias.

Tabla 4.1. Disponibilidad media anual del acuífero Meoqui-Delicias (DOF, 2018).

Acuífero	Recarga	Volumen de extracción	Disponibilidad
Meoqui-Delicias	Millones de metros cúbicos anuales		
	211.2	381.8393	-170.639378

El acuífero, al finalizar el año 2015, presentaba un déficit del orden de 170 hm³. Este volumen ocasiona que la extracción de agua en el acuífero no sea sostenible e incluso no sea posible incrementarla aún más en un futuro.

4.2.2 Calidad del agua del acuífero Meoqui-Delicias

La norma de agua potable NOM-127-SSA1-1994 establece como límite permisible para la presencia de arsénico 0.025 mg/l. Este límite es superado en varias zonas del norte del acuífero, en los municipios de Delicias, Meoqui, Rosales y Julimes. En un estudio realizado en el año 2006 por Espino-Valdés et al., (2009), se seleccionaron 61 sitios de muestreo en esta zona, el análisis de contenido de arsénico reveló que el 72% de las muestras superaban el valor límite establecido por la norma. Los municipios en los que se presentaron los valores más altos fueron Julimes y Meoqui. En la Figura 4.2 se muestran los resultados de análisis de arsénico obtenidos en el estudio antes mencionado, en los municipios de Julimes, Meoqui, Rosales y Delicias.

Las condiciones de calidad del agua en la zona, en el esquema de déficit actual, ocasionan que las concentraciones de arsénico se vean incrementadas y que, con el paso del tiempo, aumenten la cantidad de pozos que exceden el límite permisible por la norma, siendo mayor el volumen de agua que no puede ser aprovechado para abastecimiento público urbano.

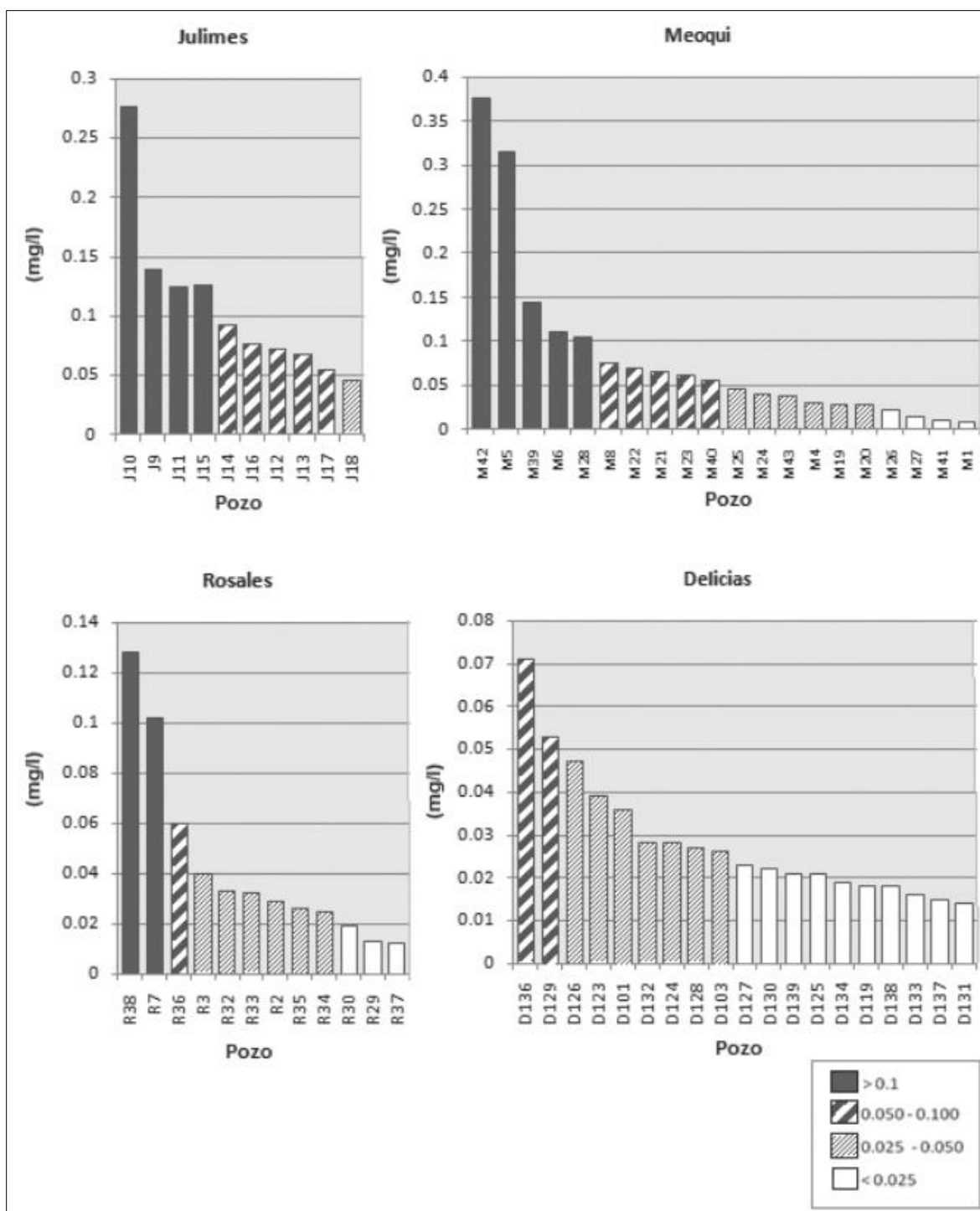


Figura 4.2. Concentraciones de arsénico (mg/L)(Espino-Valdés et al., 2009).

4.3 Identificación de localidades con problemas de abastecimiento de agua y factibilidad de fuente alterna

Las condiciones actuales del acuífero y el desarrollo demográfico y económico de la zona hacen necesaria la búsqueda de una fuente alterna de abastecimiento superficial. La ubicación de la presa Francisco I. Madero permite que esta sea considerada como una posible fuente alterna.

En la zona de estudio existen 173 localidades, que pertenecen a los municipios de Delicias, Meoqui, Julimes y Rosales. Para los fines de ésta tesis se se evaluará la factibilidad de considerar a la presa Francisco I. Madero como posible fuente alterna de abastecimiento, así como la instalación de una planta potabilizadora y el abastecimiento de agua mediante gravedad. Estas condiciones limitan el abastecimiento a toda la región, ya que se deberá excluir a las localidades que se localicen en puntos topográficamente mas elevados que el punto de abastecimiento.

Primero se identificaron los puntos topográficamente mas altos y se descartaron las localidades ubicadas en ellos. Se identificó la zona de posible ubicación de la planta potabilizadora y se proyectaron posibles rutas de abastecimiento, hacia las principales ciudades y localidades con mayor población. Se analizó el perfil topográfico de cada ruta, con el fin de determinar que localidades pueden ser abastecidas por gravedad. En la Figura 4.3 se muestra la imagen satelital de la región junto a las rutas de abastecimiento propuestas. De la Figura 4.4 a la Figura 4.9 se muestran las rutas propuestas y su perfil topográfico.

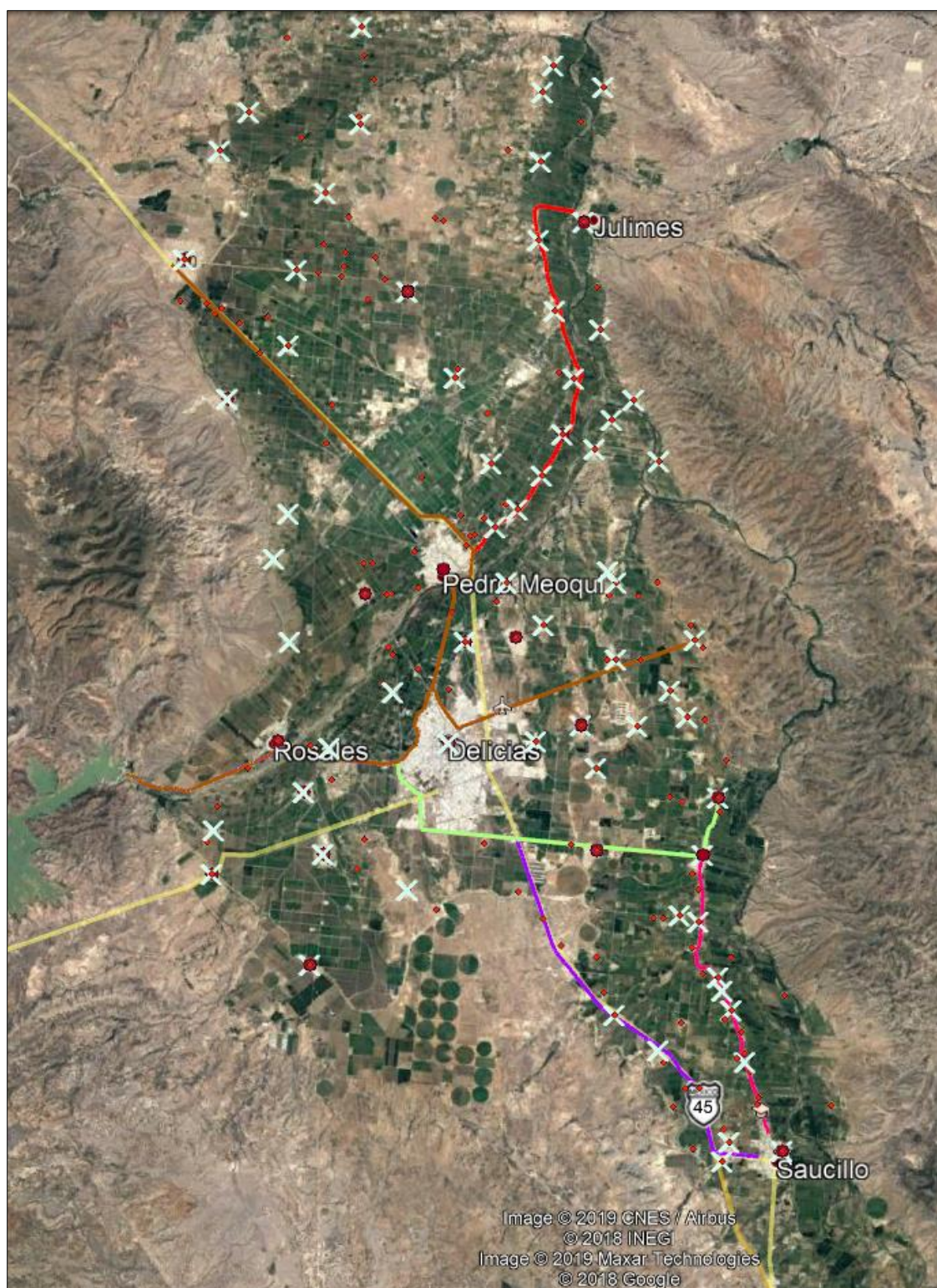


Figura 4.3. Rutas de abastecimiento propuestas.

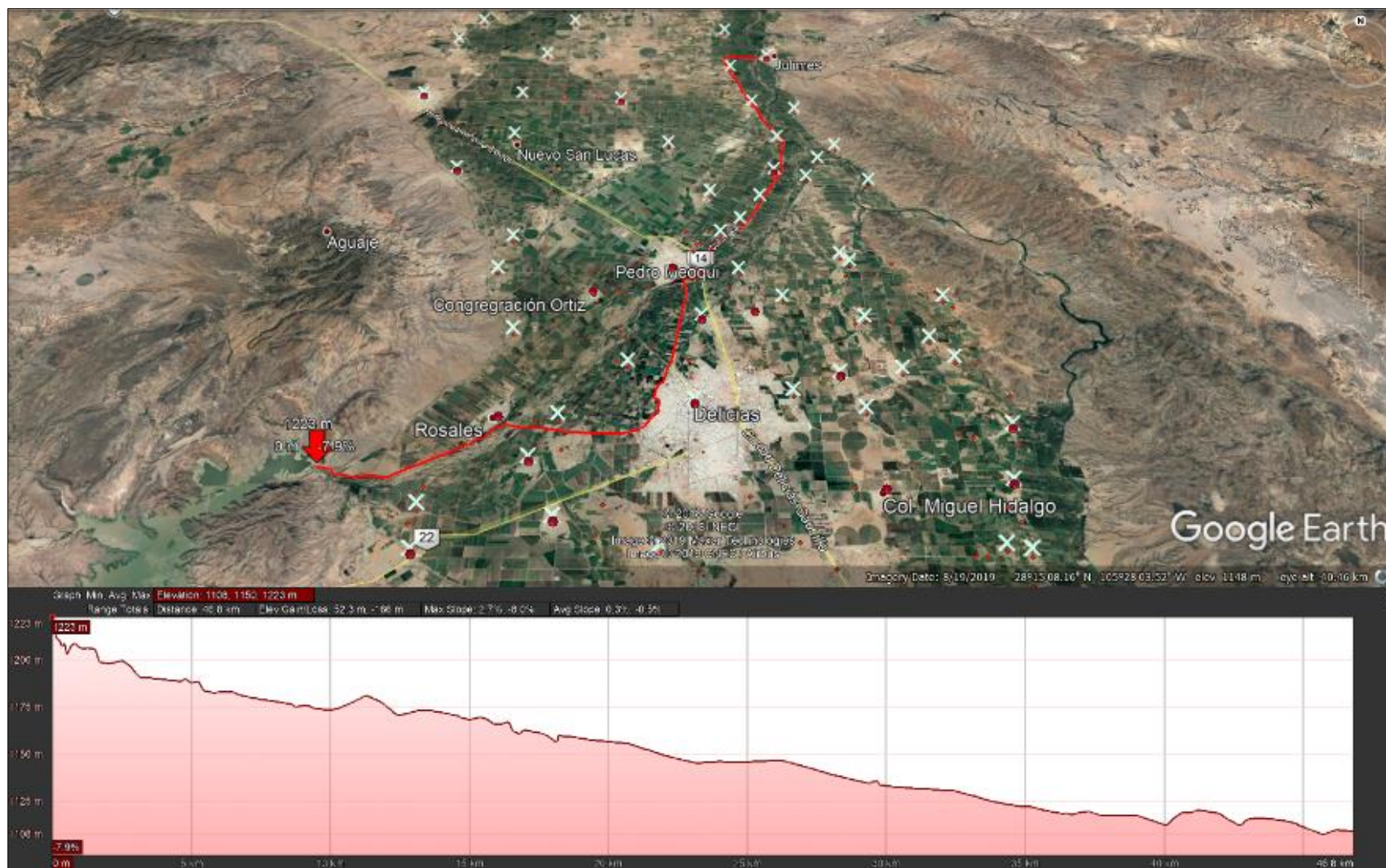


Figura 4.4. Ruta propuesta de abastecimiento 1.

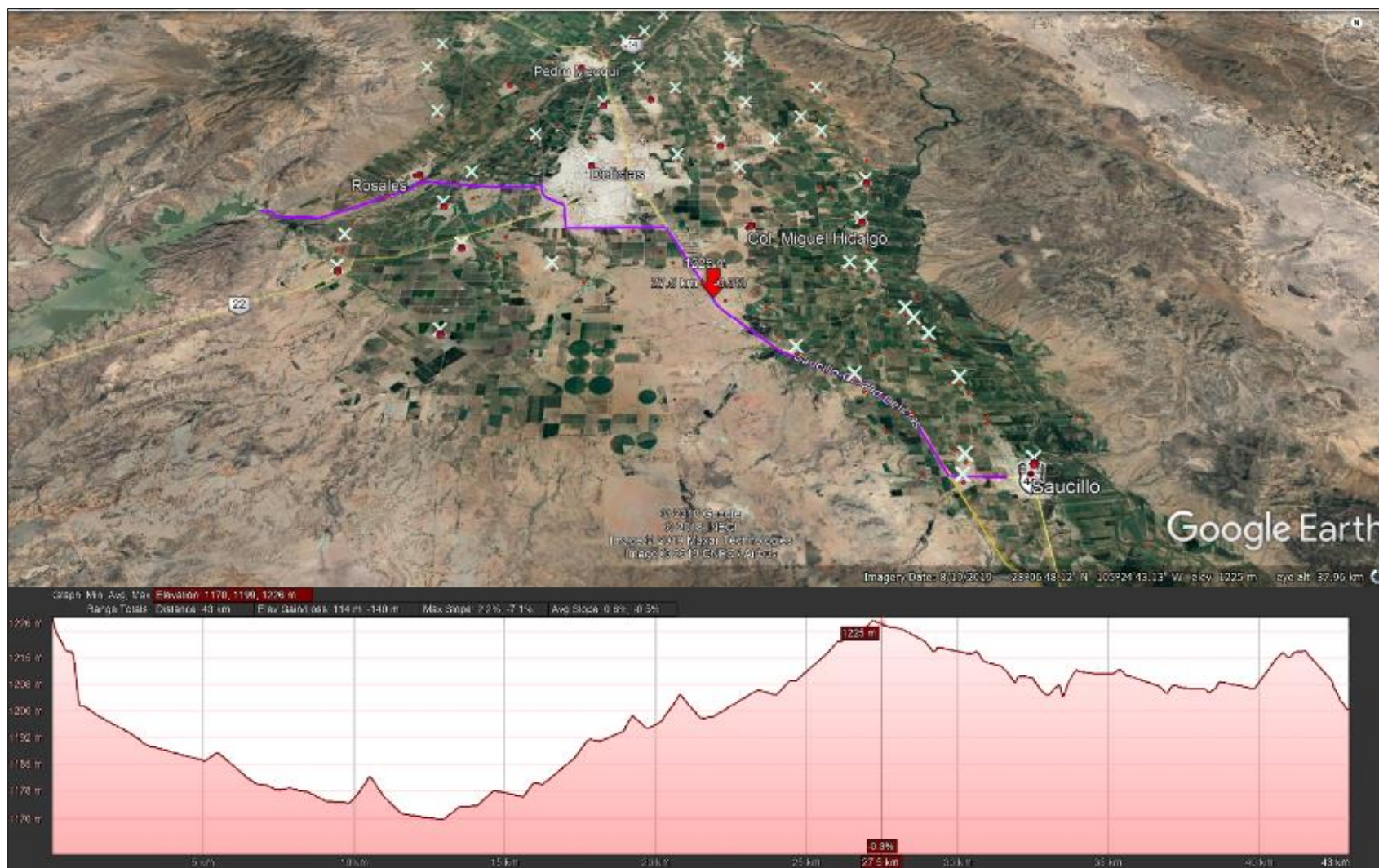


Figura 4.5. Ruta propuesta de abastecimiento 2.

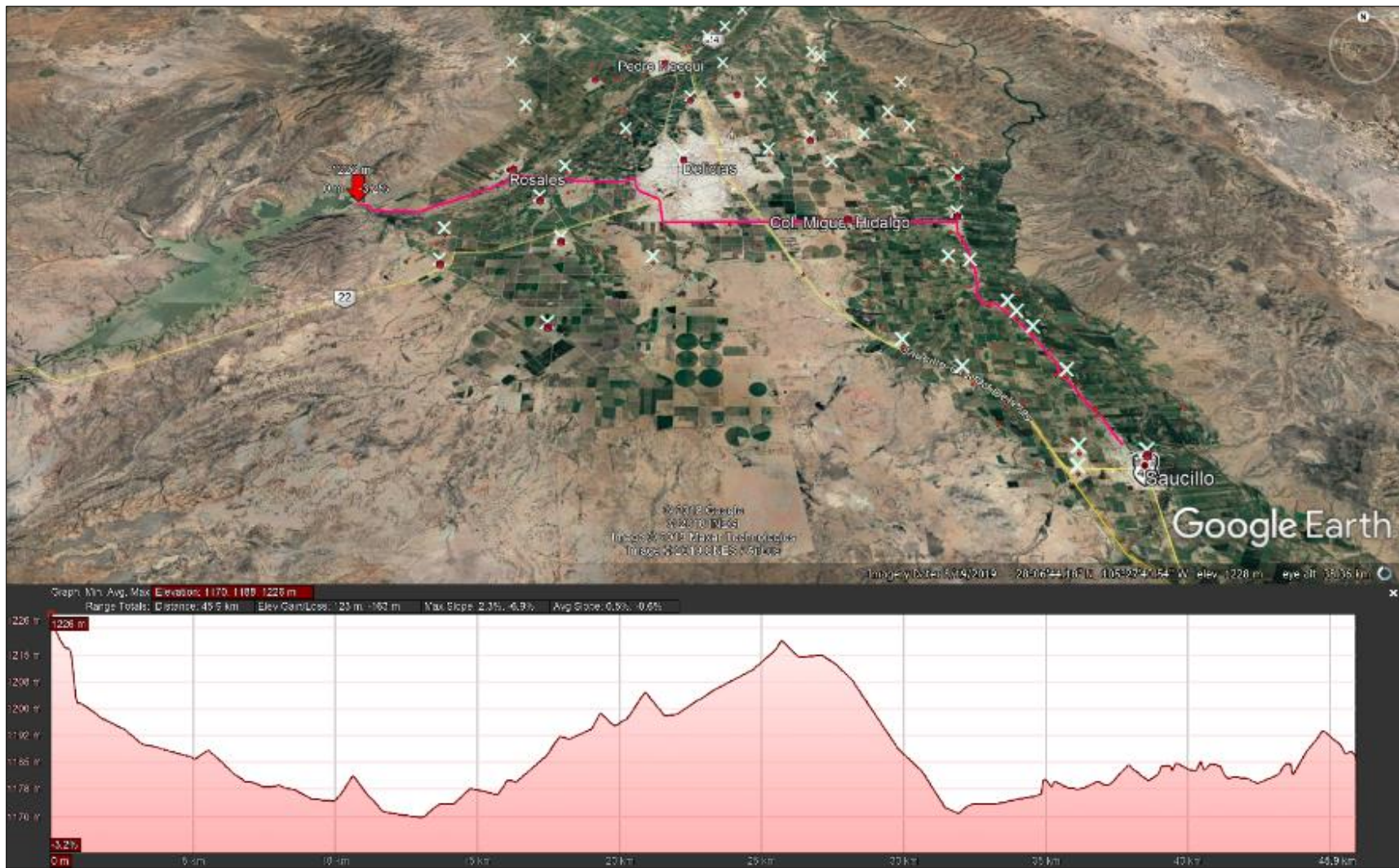


Figura 4.6. Ruta propuesta de abastecimiento 3.



Figura 4.7. Ruta propuesta de abastecimiento 4



Figura 4.8. Ruta propuesta de abastecimiento 5

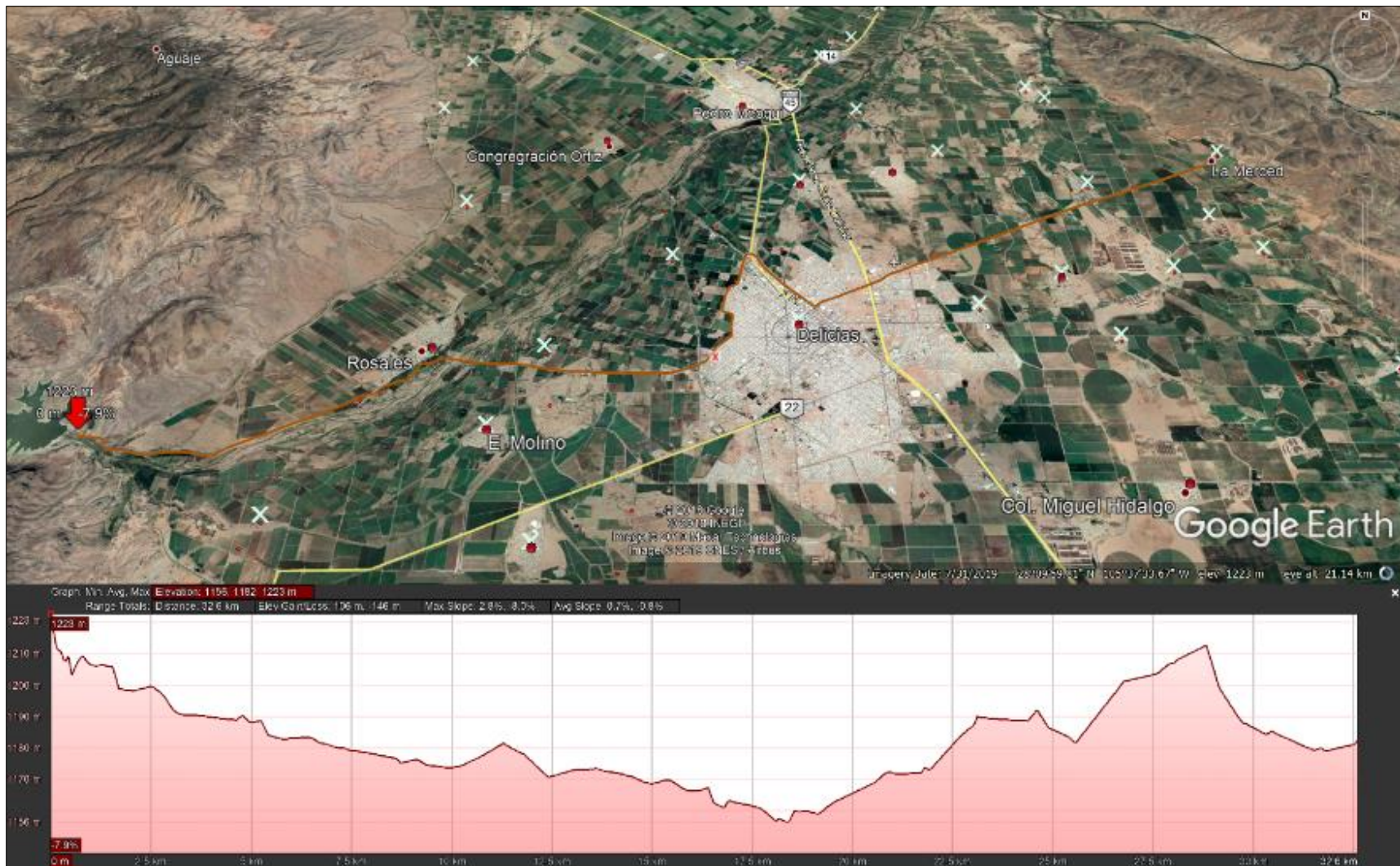


Figura 4.9. Ruta propuesta de abastecimiento 6

Luego de analizar las posibles rutas de abastecimiento, se descartó la ciudad de Saucillo y las localidades ubicadas al sur de la región. Estas localidades se encuentran a mayor distancia de la fuente de abastecimiento y en puntos topográficamente altos, lo cual no permitiría un abastecimiento solo por gravedad y a su vez se incrementarían los costos.

El análisis se realizó con 114 localidades, entre las cuales se encuentran las principales ciudades de la zona como lo son Delicias, Meoqui y Julimes. De estas localidades, 47 cuentan con plantas potabilizadoras de ósmosis inversa (POI), considerandose estas las localidades con mayor problema de calidad del agua respecto al contenido de arsénico (Silva-Hidalgo, 2018). En la Figura 4.10 se muestran la zona de análisis, con las localidades consideradas para el abastecimiento de agua mediante una fuente superficial. En el Anexo A, se presentan las 114 localidades analizadas, sus coordenadas geográficas y su población total.

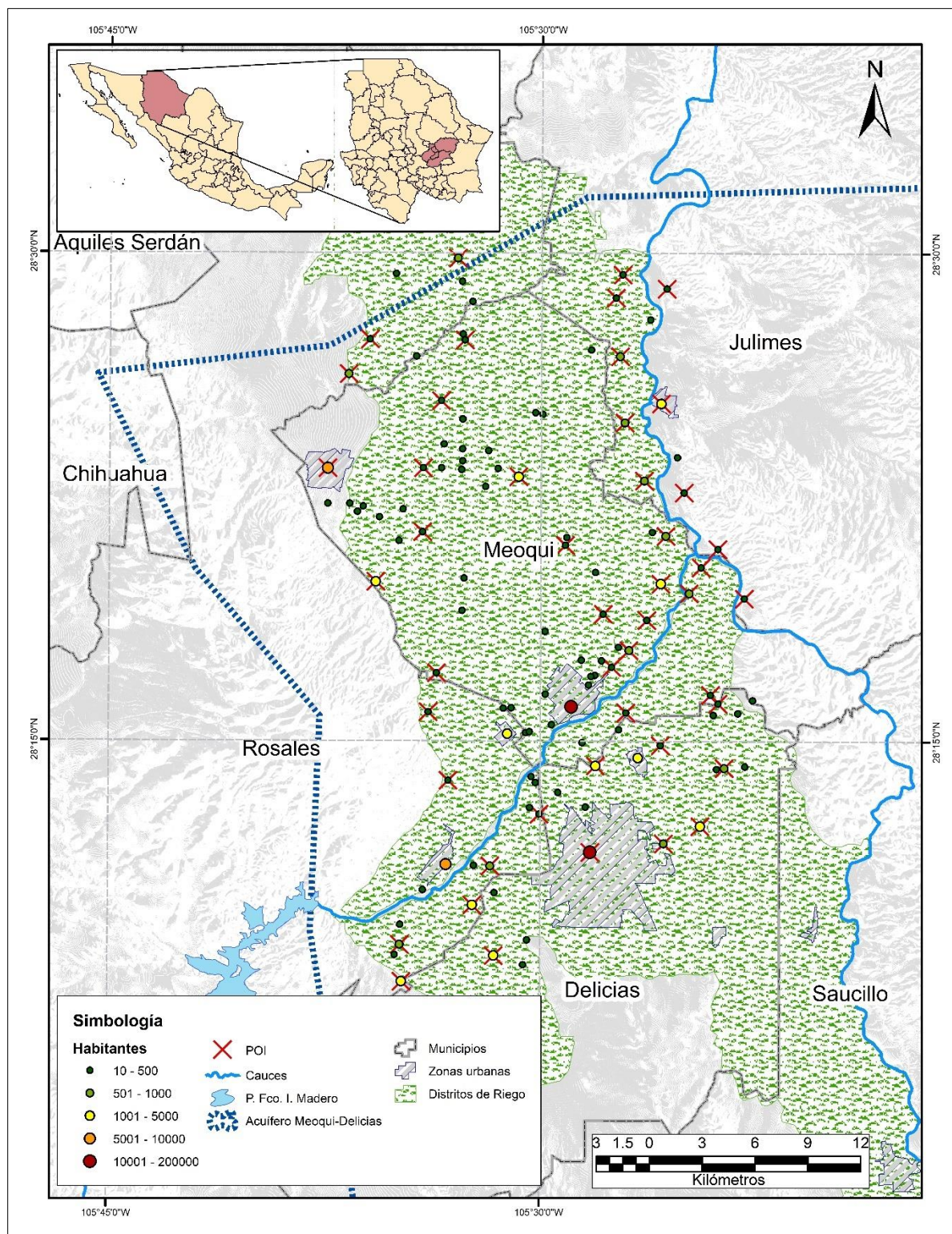


Figura 4.10. Localidades posibles de ser abastecidas mediante una fuente superficial.

4.4 Crecimiento demográfico e incremento de la demanda de agua

El crecimiento económico y demográfico en la región ocasionan que la demanda de agua se vaya incrementando a través de los años. Este incremento se debe considerar al momento de diseñar sistemas de abastecimiento de agua potable, ya que la infraestructura debe ser dimensionada con los parámetros que operará durante su vida útil.

La CONAGUA establece la vida que se debe considerar para elementos de un sistema de agua potable y alcantarillado (CONAGUA, 2015b). Para una red de distribución primaria recomienda una vida útil de 20 a 40 años, por lo cual, para el presente estudio se consideraron 30 años de vida útil, realizando el análisis hasta el año 2049.

4.4.1 Proyección de la población

Para establecer la población de proyecto se realizó una proyección de población para el año 2049. Esta proyección se calculó utilizando las proyecciones de poblaciones establecidas por el CONAPO hasta el año 2030 para distintas localidades (

Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Localidades que cuentan con proyección de población hasta el año 2030, calculada por el CONAPO.

Municipio	Nombre de la localidad
Delicias	Delicias
Delicias	Miguel Hidalgo
Delicias	Colonia Nicolás Bravo (Kilómetro Noventa y Dos)
Delicias	Colonia Campesina
Delicias	Colonia Revolución
Delicias	Resto
Julimes	Julimes
Meoqui	Pedro Meoqui
Meoqui	Lázaro Cárdenas
Meoqui	Resto
Rosales	Santa Cruz de Rosales
Rosales	El Molino

Rosales	Congregación Ortiz
Rosales	Resto

Para las localidades de cada municipio que no contaban con proyección realizada por el CONAPO, se utilizaron las proyecciones realizadas para el resto del municipio.

Con estas proyecciones se determinaron las tasas de crecimiento para cada localidad por año, y a su vez, se calculó la proyección de población en cada localidad hasta el año 2049. La población total de la zona para el año 2010, según el censo del INEGI fue de 192,530 habitantes, la proyección de población calculada para el año 2049 es de 451,068 habitantes. El procedimiento del cálculo de la proyección de población se detalla en el Anexo Digital 1. En la Figura 4.11 se muestra el incremento de población proyectado.

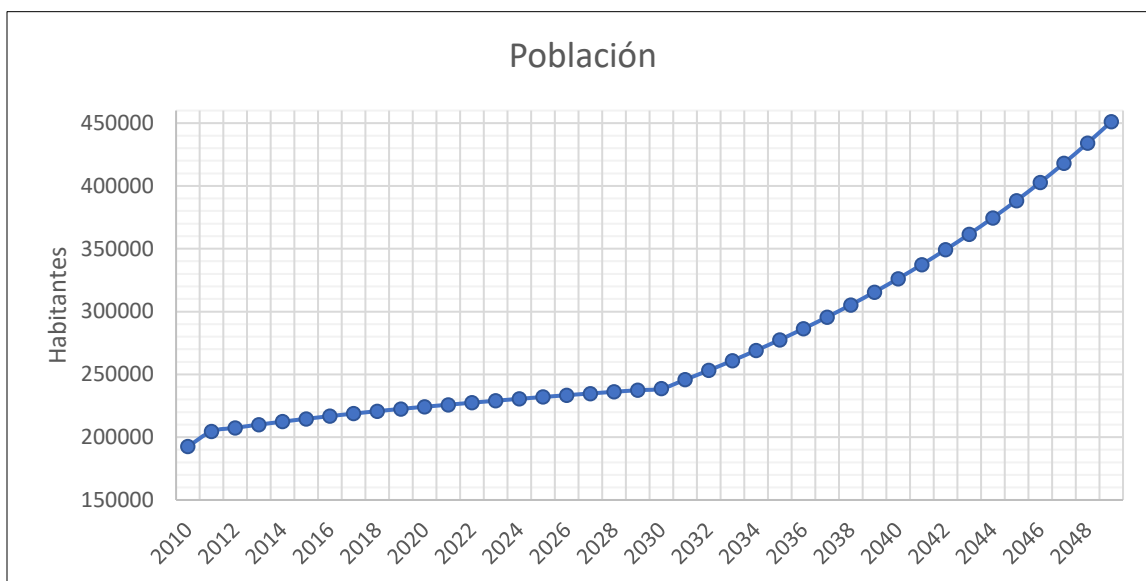


Figura 4.11. Proyección de población.

4.4.2 Proyección de la demanda de agua

Luego de realizar la proyección de población a 30 años, se calcularon los caudales medio y máximo diario, y se determinó el volumen anual necesario para abastecer a la región.

Con base en los consumos propuestos por la CONAGUA para clima seco o muy seco (Tabla 2.1), para el análisis se estableció una dotación de 190 litros por habitante por día. Se calcularon las pérdidas considerando las eficiencias calculadas por el Programa de Indicadores de

Gestión de Organismos Operadores para Delicias y Meoqui, siendo estas de 80.4% y 48.14% respectivamente (PIGOO, 2019). Para el resto de las localidades se consideró un 40% de pérdidas (CONAGUA, 2015b).

Al sumar el consumo con las pérdidas se calculó la dotación para cada localidad en litros por habitante por día. Se obtuvo el producto de la dotación y la proyección de población para el año 2049 para obtener el caudal medio en litros por segundo. Para determinar el caudal máximo diario se multiplicó el caudal medio por el coeficiente de variación diaria (Tabla 2.2), donde se consideró un promedio de 1.35.

El caudal medio total calculado fue de 1329.17 lps y el caudal máximo diario de 1794.38 lps. Con el caudal medio se determinó el volumen total anual que demanda la población, el cual fue de 41.92 hm³. El procedimiento de cálculo para la obtención de estos valores se encuentra en el Anexo Digital 2.

4.4.3 Alternativa de solución

La región Meoqui-Delicias es abastecida, para uso público urbano, con agua subterránea de un acuífero con déficit y altas concentraciones de arsénico. Estas condiciones no son las idóneas para el consumo humano, por lo tanto, es necesario buscar alternativas de solución que permitan abastecer la demanda requerida con una calidad del agua que cumpla con la normatividad vigente en la materia.

Existen varias alternativas que, siendo evaluadas de manera técnica, jurídica, económica y social, se pueden considerar para abastecer a la población con el volumen de agua que demanda. Algunas de ellas son la adquisición de derechos de agua, disminución de concesiones de agua subterránea vía rescate de derechos, reúso de aguas tratadas, el cambio de fuente de abastecimiento a una fuente superficial, así como la combinación de alternativas. En la presente investigación se realizó el análisis de la penúltima alternativa, considerando como fuente de abastecimiento la presa Francisco I. Madero.

5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE APROVECHAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO EN TÉRMINOS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA

5.1 Construcción del modelo de distribución de agua

Para poder analizar el efecto que tendría el aprovechamiento de agua superficial, con fines de abastecimiento público urbano, en la presa y en los usuarios que se abastecen de ella, se utilizó el modelo matemático para distribución de agua RiverWare del Centro de decisiones avanzadas para el agua y los sistemas ambientales (CADWES por sus siglas en inglés) de la Universidad de Colorado (Figura 5.1).



Figura 5.1. Licencia de uso RiverWare.

En el modelo se realizó el análisis de todo el sistema, con datos históricos mensuales, en una serie de tiempo de enero de 1950 hasta diciembre de 2018. El sistema consta de tres elementos principales: (1) la cuenca, (2) la presa Francisco I. Madero y, (3) los usuarios que realizan extracciones a la primera. En el RiverWare, estos elementos son representados como objetos, en los cuales se asignan los datos históricos en la serie de tiempo establecida, y son interconectados para simular el comportamiento del sistema real. Como parte del modelo se encuentra un cuarto objeto, un objeto de datos, el cual no es parte del sistema, pero en él se asignan distintos datos (en párrafos subsecuentes se describe la naturaleza de dichos datos) que son requeridos por el sistema. En la Figura 5.2 se presenta la interfase del modelo matemático RiverWare y los objetos que representan los elementos principales del sistema.

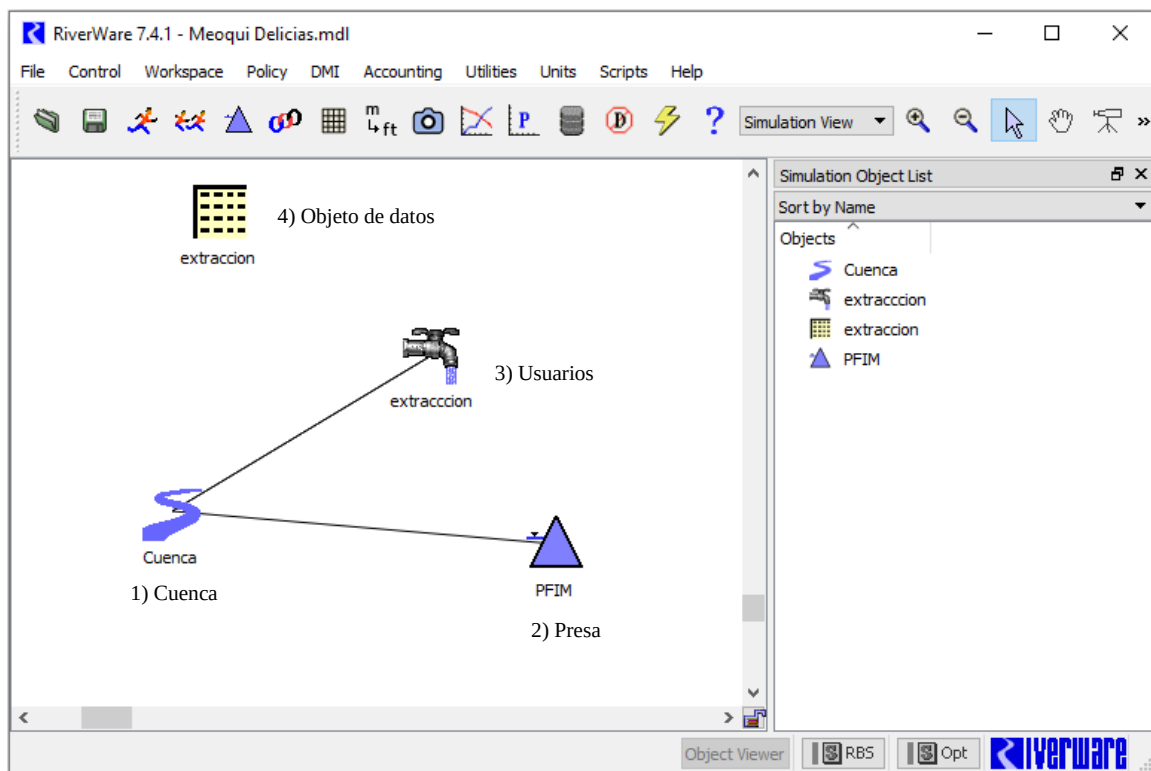


Figura 5.2. Interfase de RiverWare y construcción del modelo.

1) Cuenca

Los datos de entrada en el objeto que representa la cuenca son los escurrimientos naturales. Estos fueron calculados considerando los cambios de almacenamiento, la evaporación y las extracciones de la cuenca y de la presa (extracciones de la obra de toma y los derrames), como se menciona en el capítulo 3.2.1. En el Anexo Digital 3 se encuentran los escurrimientos naturales calculados para el periodo 1950-2018, junto a los datos requeridos para su cálculo.

2) Presa Francisco I. Madero

En el objeto de la presa, primero se asignaron como valores de entrada los datos propios de la presa, como las curvas Área-Elevación-Capacidad, datos del vertedor, el Nivel de Aguas Mínimas de Operación (NAMINO), el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) y el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME). Adicional a esta información, se asignaron los valores de evaporación en lámina mensual, los volúmenes mensuales de extracción por la obra de toma y el almacenamiento de la presa al inicio del periodo a analizar (Anexo Digital 3).

3) Usuarios (extracciones)

El sistema cuenta con distintos usuarios del agua, localizados en diferentes ubicaciones geográficas. Las extracciones se realizan en la presa, por la obra de toma, o aguas arriba de esta dentro de la cuenca. Estas últimas son representadas en el modelo por un objeto de usuario, donde se asignaron los volúmenes de extracción realizados en la cuenca aguas arriba de la presa. Los volúmenes de extracción se encuentran en el Anexo Digital 3.

4) Objeto de datos

En el objeto de datos se colocó la información requerida para la programación de la simulación del modelo, como la capacidad de la obra de toma, el NAMINO y el NAMO (CONAGUA, 2012), las extracciones históricas y las extracciones propuestas con base en la demanda (Figura 5.3).

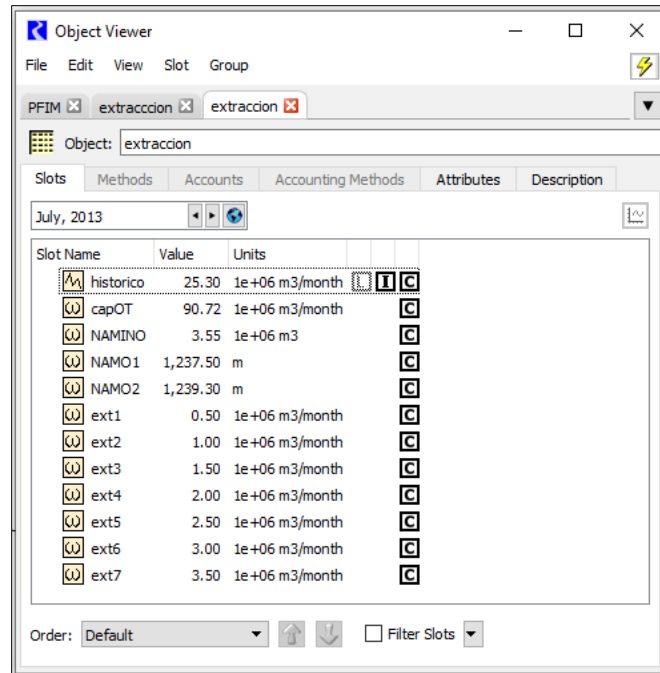


Figura 5.3. Objeto de datos en RiverWare.

Para realizar la simulación del escenario histórico, se realizó la programación de reglas que representaran el comportamiento real del sistema. Para las extracciones, se simulaban las extracciones históricas registradas, siempre que estas no excedieran la capacidad de diseño de la obra de toma (CONAGUA, 2012). Las extracciones también fueron restringidas de manera que el nivel de la presa no descendiera del NAMINO, si la extracción requerida ocasionaba un almacenamiento menor al mencionado, esta extracción se limita hasta llegar al NAMINO, ya que debajo de este nivel no se deben realizar extracciones.

Otra condición de simulación que se condicionó fueron los derrames. Cuando el nivel de la presa supera el NAMO, todo el volumen de agua que supera este nivel es derramado. En la Figura 5.4 se muestra la programación de la regla antes mencionada.

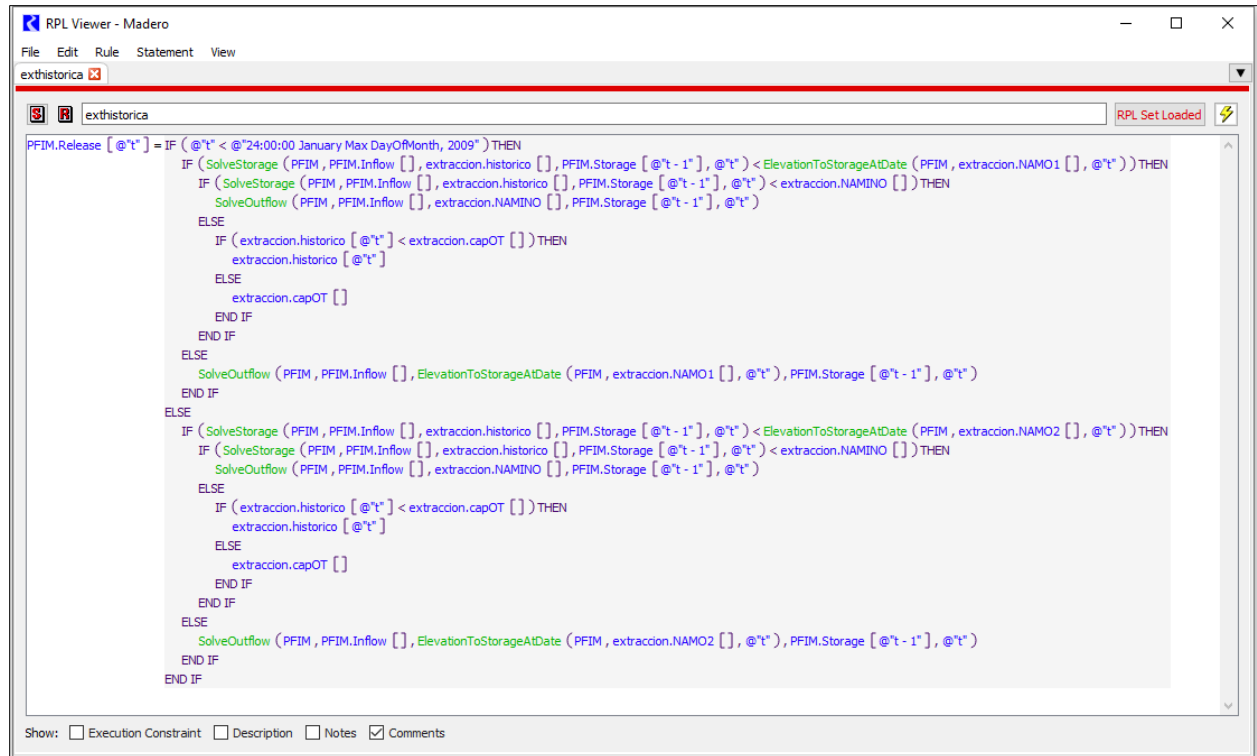


Figura 5.4. Programación de reglas para la simulación del escenario histórico.

5.2 Calibración del modelo de distribución de agua

La calibración permite establecer la precisión que tiene el modelo para reproducir el comportamiento del sistema real. Las variables que se utilizaron para comparar los valores observados con los obtenidos en la simulación son: (1) almacenamientos, (2) volúmenes de evaporación, (3) derrames, y (4) extracciones.

Para determinar el grado de ajuste entre los valores observados y los obtenidos de la simulación del modelo, los estadísticos que se utilizaron fueron el coeficiente de determinación, R^2 , y el coeficiente de correlación de Pearson, R .

Adicionalmente, se midió la correspondencia entre los valores observados y simulados, se utilizaron los criterios de calibración propuestos por Anderson y Woessner (1992): (1) error medio (EM), (2) error medio absoluto (EMA), y (3) raíz del error medio cuadrado (REMC). A continuación, se presentan las expresiones matemáticas para el cálculo de los errores.

1) Error medio

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Obs - Sim) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

2) Error medio absoluto

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Obs - Sim)| \quad \text{Ecuación 5.2}$$

3) Raíz del error medio cuadrado

$$REMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Obs - Sim)^2} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

5.2.1 Almacenamientos

En la Figura 5.5 se muestra la comparación de los almacenamientos mensuales históricos y los almacenamientos obtenidos de la simulación. En la Figura 5.6 se muestra el ajuste lineal que tienen los valores y en la Tabla 5.1 los parámetros estadísticos con los que se midió el grado de ajuste de los valores históricos con los simulados.

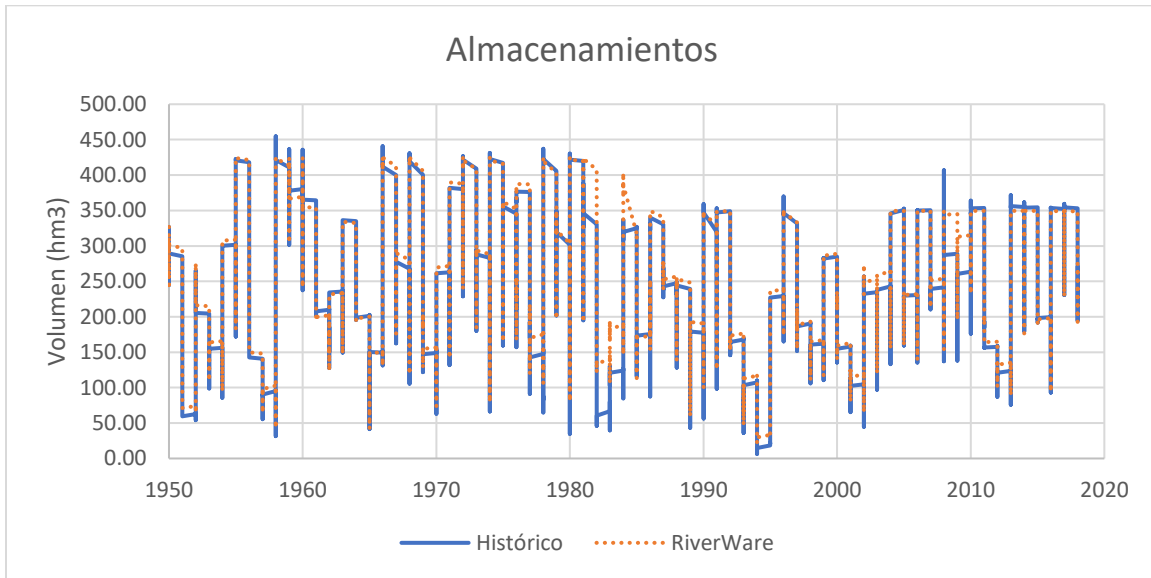


Figura 5.5. Comparación de los almacenamientos históricos y los simulados.

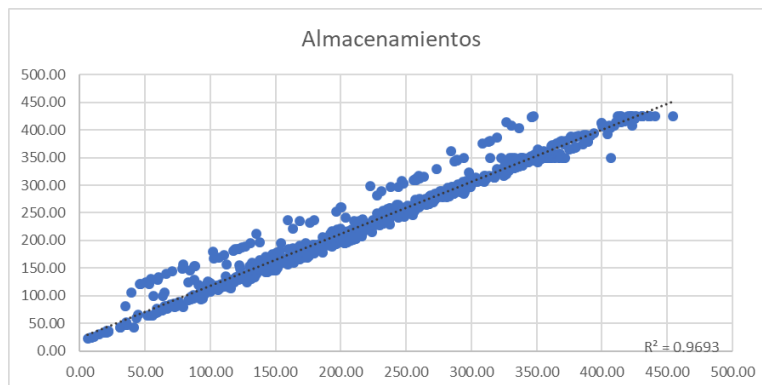


Figura 5.6. Ajuste lineal de almacenamientos históricos y simulados.

Tabla 5.1. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los valores de almacenamientos observados con los simulados.

R^2	R	EM	EMA	REMC
0.9693	0.9845	-10.50	12.76	21.30

5.2.2 Evaporación

En la Figura 5.7 se muestra la comparación de los volúmenes de evaporación mensual históricos y los correspondientes obtenidos de la simulación. En la Figura 5.8 se muestra ajústela correlación lineal que tienen los valores observados y simulados, y en la Tabla 5.2 los parámetros estadísticos con los que se midió el grado de ajuste de los valores históricos con los simulados.

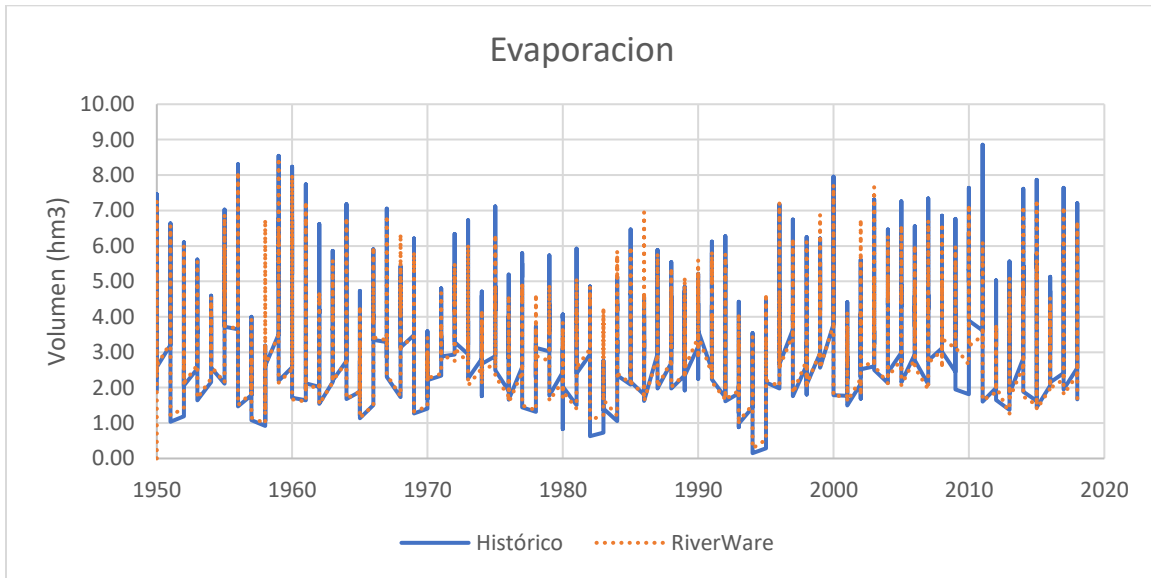


Figura 5.7. Comparación de evaporaciones históricas y simuladas.

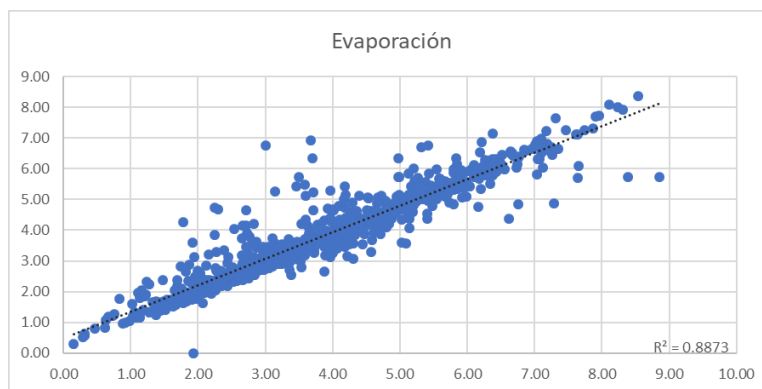


Figura 5.8. Ajuste lineal de evaporaciones históricas y simuladas.

Tabla 5.2. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los valores de evaporación observados con los simulados

R^2	R	EM	EMA	REMC
0.8873	0.9420	0.02	0.34	0.55

5.2.3 Derrames

En la Figura 5.9 se muestra la comparación de los volúmenes de derrames mensuales históricos y los correspondientes obtenidos en la simulación. En la Figura 5.10 se muestra la correlación lineal que tienen los valores observados y simulados, y en la Tabla 5.3 los parámetros estadísticos con los que se midió el grado de ajuste de los valores históricos con los simulados.

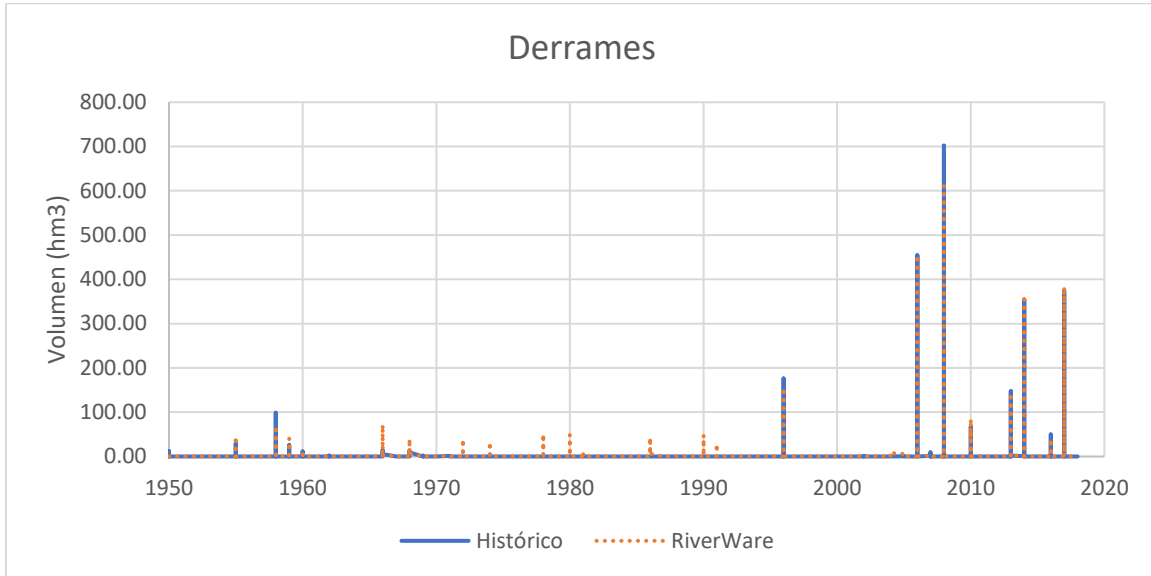


Figura 5.9. Comparación de derrames históricos y simulados.

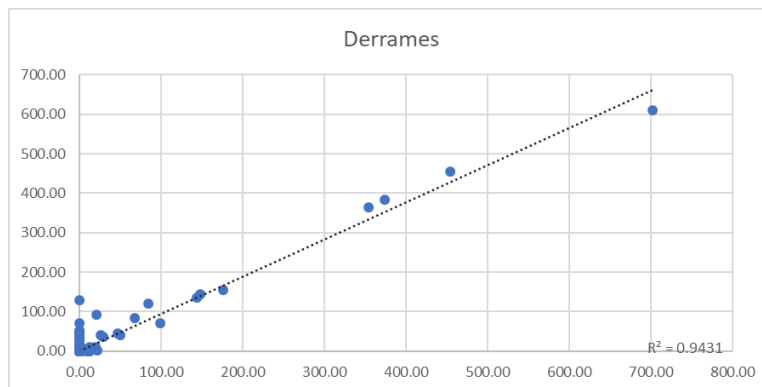


Figura 5.10. Ajuste lineal de derrames históricos y simulados.

Tabla 5.3. Estadísticos que miden el grado de ajuste de los volúmenes derramados observados con los simulados

R^2	R	EM	EMA	REMC
0.9431	0.9711	-0.82	1.48	8.57

5.2.4 Extracción

En la Figura 5.11 se muestra la comparación de las extracciones mensuales históricas y los volúmenes de extracción obtenidos de la simulación. En la Figura 5.12 se muestra la correlación lineal que tienen los valores observados y simulados, y en la Tabla 5.4 los parámetros estadísticos con los que se midió el grado de ajuste de los valores históricos con los simulados.

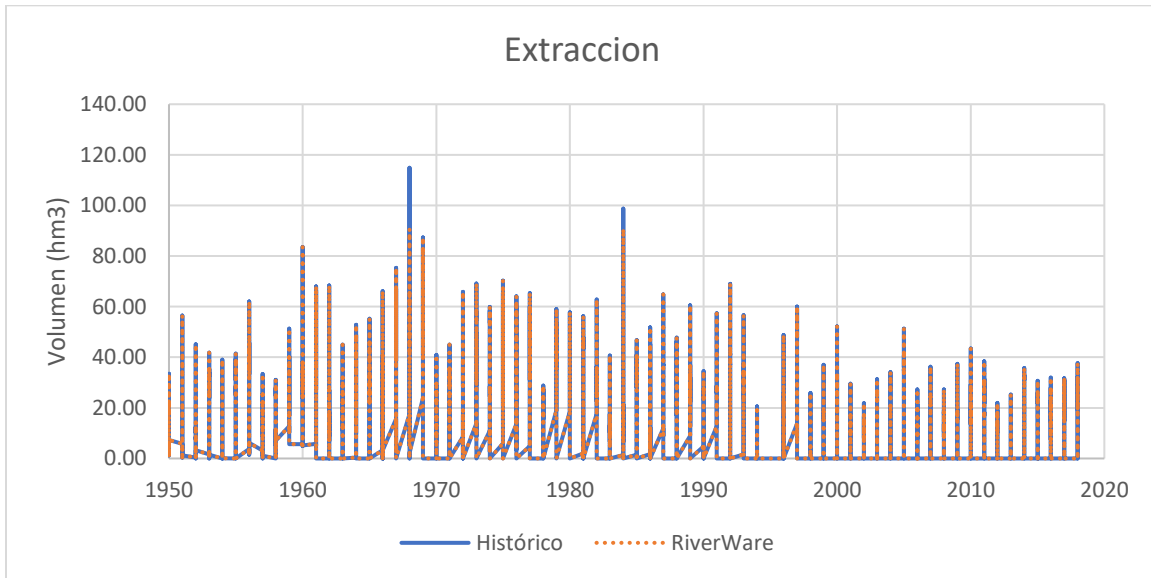


Figura 5.11. Comparación de extracciones históricas y simuladas.

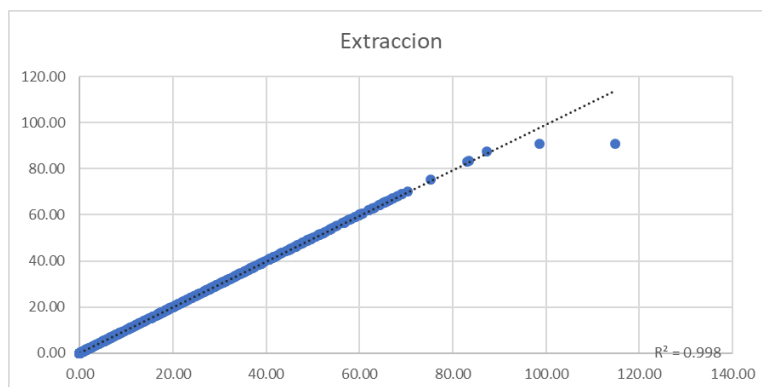


Figura 5.12. Ajuste lineal de extracciones históricas y simuladas.

Tabla 5.4. Estadísticos que miden el grado de ajuste de las extracciones observadas con las simuladas.

R^2	R	EM	EMA	REMC
0.998	0.9990	0.04	0.04	0.89

En la Tabla 5.5 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos obtenidos para evaluar el grado de calibración según los almacenamientos, evaporación, derrames y extracciones. La información del cálculo y los resultados se encuentran en el Anexo Digital 4.

Se obtuvo un alto ajuste entre los valores históricos y los resultantes en la simulación, con una correlación mayor al 90% en un ajuste lineal. Esto indica una buena calibración del modelo, el cual realiza una simulación confiable del sistema real.

Tabla 5.5. Tabla resumen de estadísticos para medir la calibración.

	R ²	R	EM	EMA	REMC
Almacenamiento	0.9693	0.9845	-10.50	12.76	21.30
Evaporación	0.8873	0.9420	0.02	0.34	0.55
Derrames	0.9431	0.9711	-0.82	1.48	8.57
Extracción	0.998	0.9990	0.04	0.04	0.89

5.3 Determinación de políticas de operación

Para estimar el impacto que tendría la extracción de un volumen adicional para uso público urbano, se establecieron distintas políticas de operación de la presa, en las cuales se incrementó el volumen de extracción para ver el impacto que esto ocasionaría en el sistema. En el capítulo 4.4.2 se estimó que la región demanda 41.92hm³ anuales. En cada política se incrementó la extracción 6hm³ anuales (0.5hm³ mensuales) hasta alcanzar una extracción anual de 42hm³ adicional a la extracción histórica. En la Tabla 5.6 se muestran las condiciones de extracción para cada política de operación.

Tabla 5.6. Políticas de operación para la extracción de un volumen adicional de agua en la presa.

Política	Extracción (hm ³)	
	Mensual	Anual
E1	0.5	6
E2	1	12
E3	1.5	18
E4	2	24
E5	2.5	30
E6	3	36
E7	3.5	42

De la Figura 5.13 a la Figura 5.19 se muestra la programación de cada una de las políticas consideradas.

```

RPL Viewer - Madero
File Edit Rule Statement View
E1
RPL Set Loaded

PFIM.Release [ @t ] = IF ( @t < @"24:00:00 January Max DayOfMonth, 2009" ) THEN
  IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO1 [ ], @t ) ) THEN
    IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < extraccion.NAMINO [ ] ) THEN
      SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.NAMINO [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
    ELSE
      IF ( extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ] < extraccion.capOT [ ] ) THEN
        extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ]
      ELSE
        extraccion.capOT [ ]
      END IF
    END IF
  ELSE
    SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO1 [ ], @t ), PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
  END IF
ELSE
  IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO2 [ ], @t ) ) THEN
    IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < extraccion.NAMINO [ ] ) THEN
      SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.NAMINO [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
    ELSE
      IF ( extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ] < extraccion.capOT [ ] ) THEN
        extraccion.historico [ ] + extraccion.ext1 [ ]
      ELSE
        extraccion.capOT [ ]
      END IF
    END IF
  ELSE
    SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO2 [ ], @t ), PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
  END IF
END IF

```

Show: ☐ Execution Constraint ☐ Description ☐ Notes ☒ Comments

Figura 5.13. Política de operación E1.

```

RPL Viewer - Madero
File Edit Rule Statement View
E2
RPL Set Loaded

PFIM.Release [ @t ] = IF ( @t < @"24:00:00 January Max DayOfMonth, 2009" ) THEN
  IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO1 [ ], @t ) ) THEN
    IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < extraccion.NAMINO [ ] ) THEN
      SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.NAMINO [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
    ELSE
      IF ( extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ] < extraccion.capOT [ ] ) THEN
        extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ]
      ELSE
        extraccion.capOT [ ]
      END IF
    END IF
  ELSE
    SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO1 [ ], @t ), PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
  END IF
ELSE
  IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO2 [ ], @t ) ) THEN
    IF ( SolveStorage ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t ) < extraccion.NAMINO [ ] ) THEN
      SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], extraccion.NAMINO [ ], PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
    ELSE
      IF ( extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ] < extraccion.capOT [ ] ) THEN
        extraccion.historico [ ] + extraccion.ext2 [ ]
      ELSE
        extraccion.capOT [ ]
      END IF
    END IF
  ELSE
    SolveOutflow ( PFIM, PFIM.Inflow [ ], ElevationToStorageAtDate ( PFIM, extraccion.NAMO2 [ ], @t ), PFIM.Storage [ @t - 1 ], @t )
  END IF
END IF

```

Show: ☐ Execution Constraint ☐ Description ☐ Notes ☒ Comments

Figura 5.14. Política de operación E2.

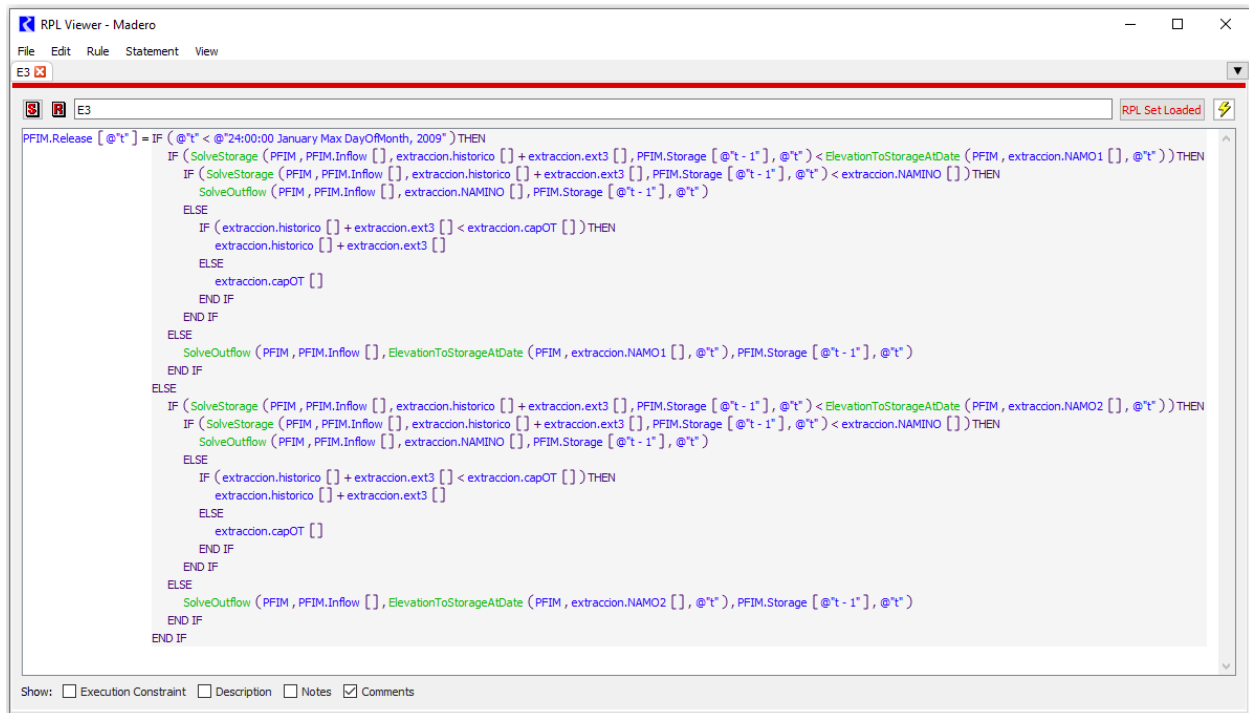


Figura 5.15. Política de operación E3.

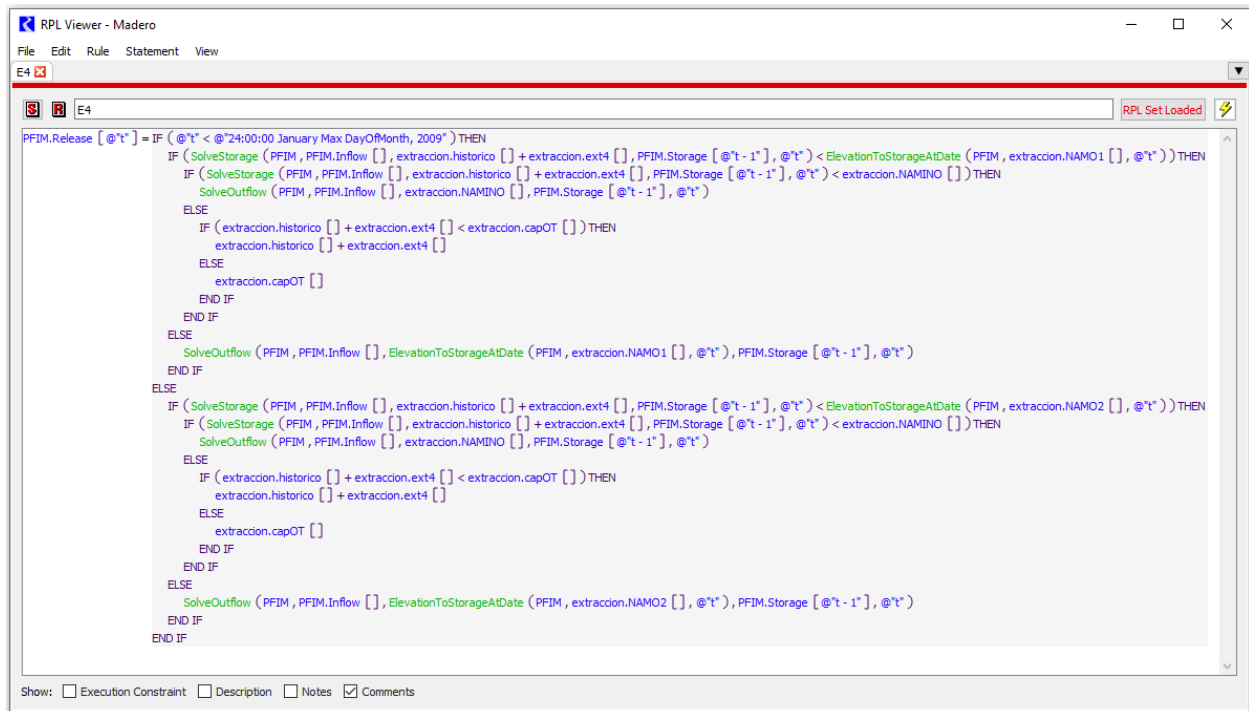


Figura 5.16. Política de operación E4.

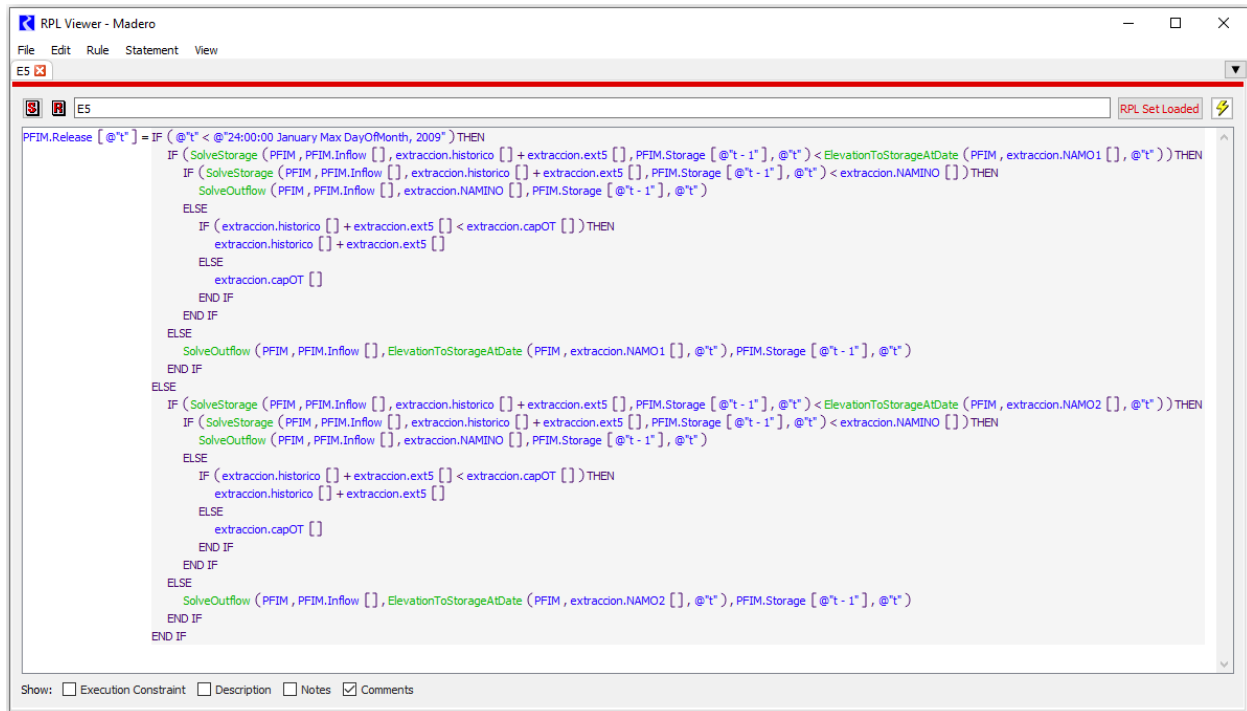


Figura 5.17. Política de operación E5.

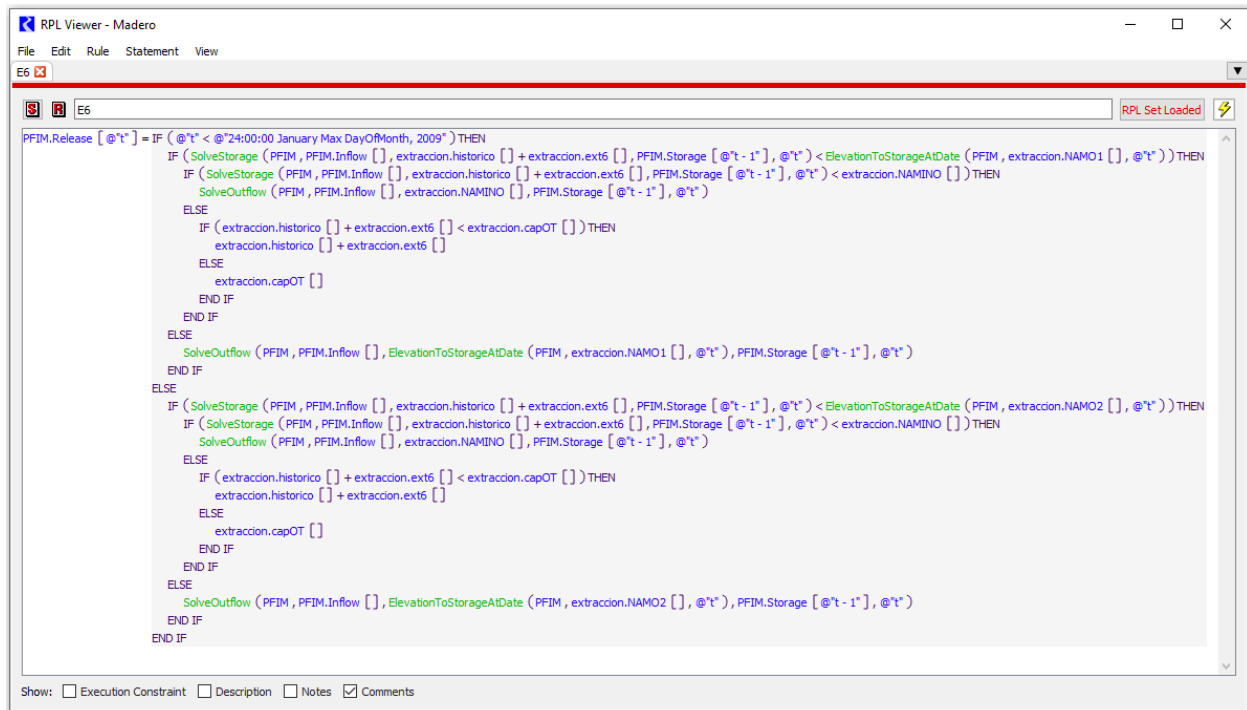


Figura 5.18. Política de operación E6.

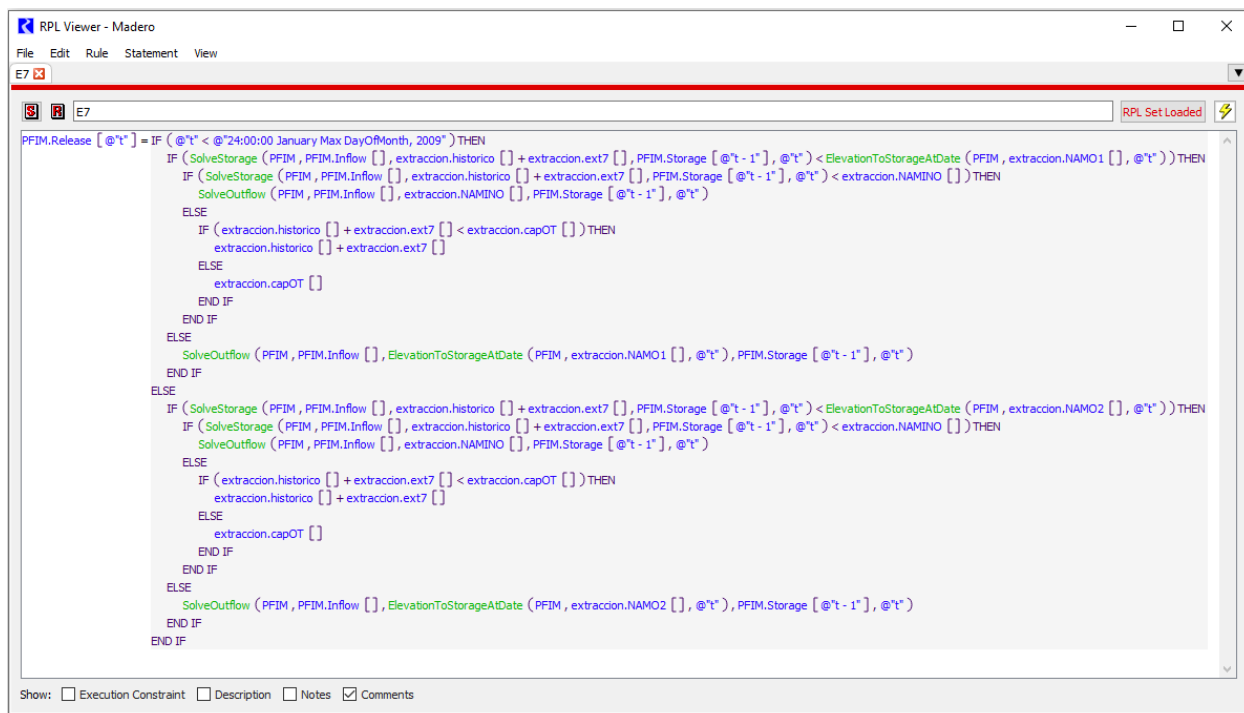


Figura 5.19. Política de operación E7.

5.4 Simulación de escenarios

Se realizó la simulación de siete escenarios con las diferentes políticas de operación (Tabla 5.6) y se compararon los valores de volúmenes de almacenamiento, extracción y derrames obtenidos en la simulación de cada escenario con los valores del escenario histórico, con el fin de determinar el impacto generado por las distintas políticas de extracción. Los resultados de cada escenario simulado se encuentran en el Anexo Digital 5.

1) Escenario E1

En el escenario E1 se incrementó la demanda en 6 hm³ anuales (0.5 hm³ mensuales). El impacto de este incremento en la extracción en los almacenamientos, las extracciones y los derrames es mínimo. De la Figura 5.20 a la Figura 5.22 se presenta la comparación entre los valores del escenario histórico y el simulado, siendo pequeña la variación entre ambos.

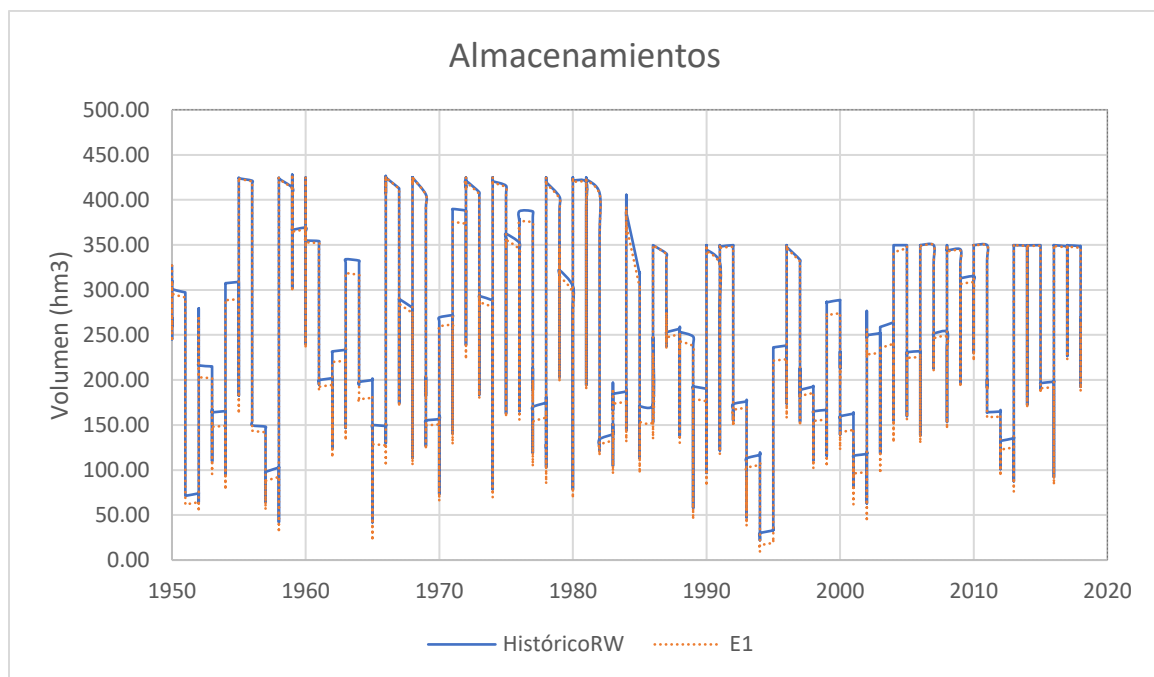


Figura 5.20. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E1.

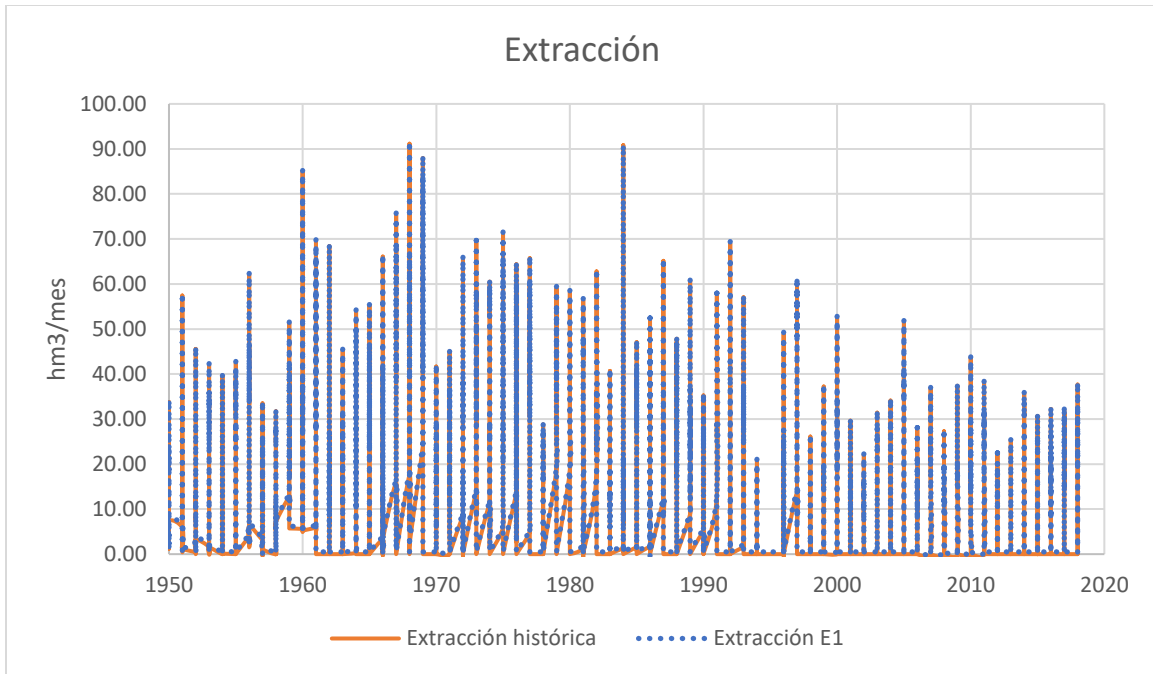


Figura 5.21. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E1.

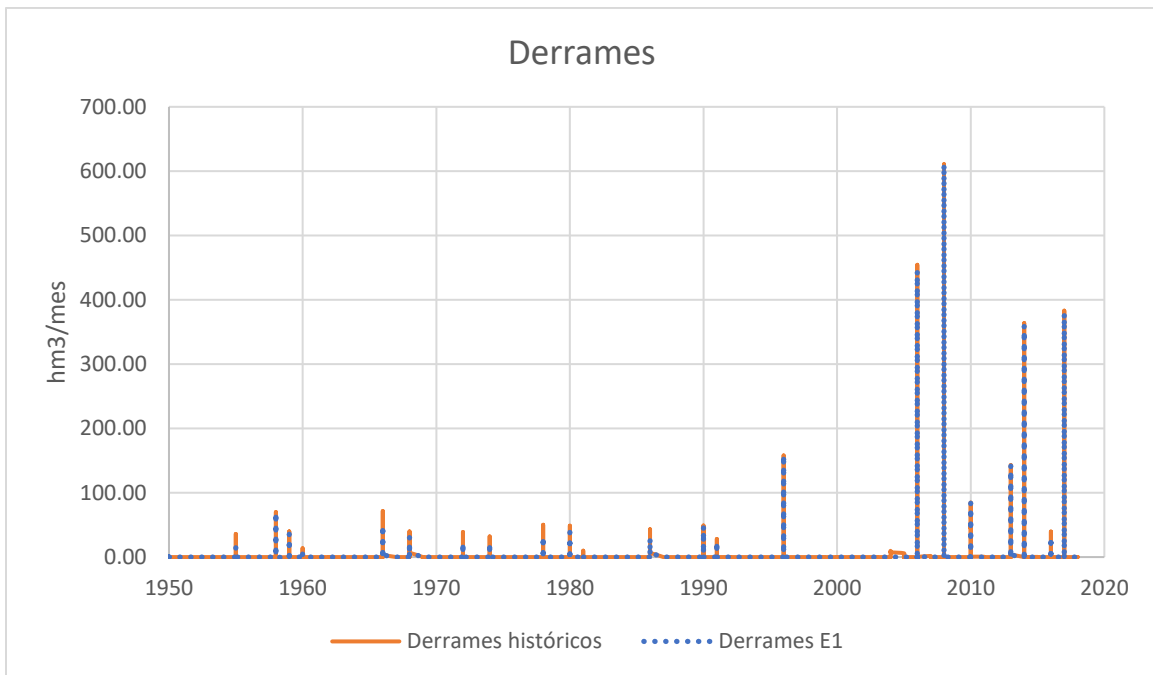


Figura 5.22. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E1.

2) Escenario E2

En el caso del escenario E2, se incrementó la demanda en 12hm^3 anuales (1hm^3 mensual). En la Figura 5.23 se muestran las variaciones que se presentarían en los almacenamientos con este incremento en la demanda, en esta se puede observar cómo los meses con los almacenamientos más bajos disminuyeron en comparación al histórico, sin embargo, la mayoría de los meses que presentan los almacenamientos altos se mantienen similares al escenario histórico. En la Figura 5.24 y Figura 5.25 se muestra el impacto en las extracciones y derrames en este escenario en comparación con el histórico.

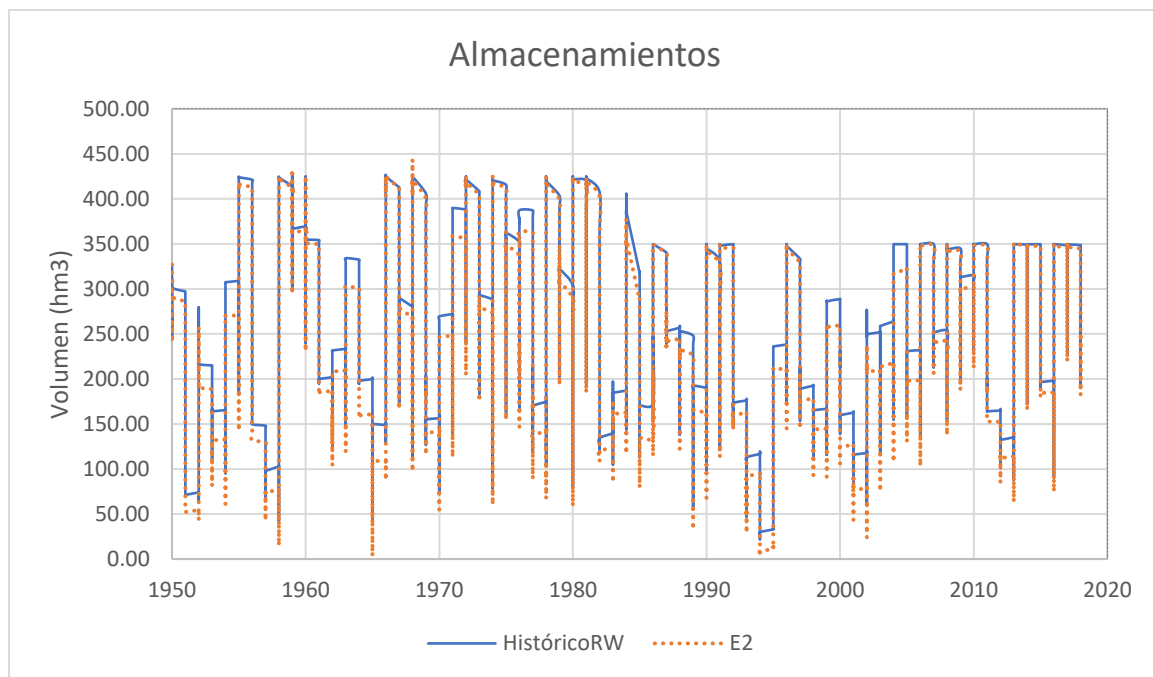


Figura 5.23. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E2

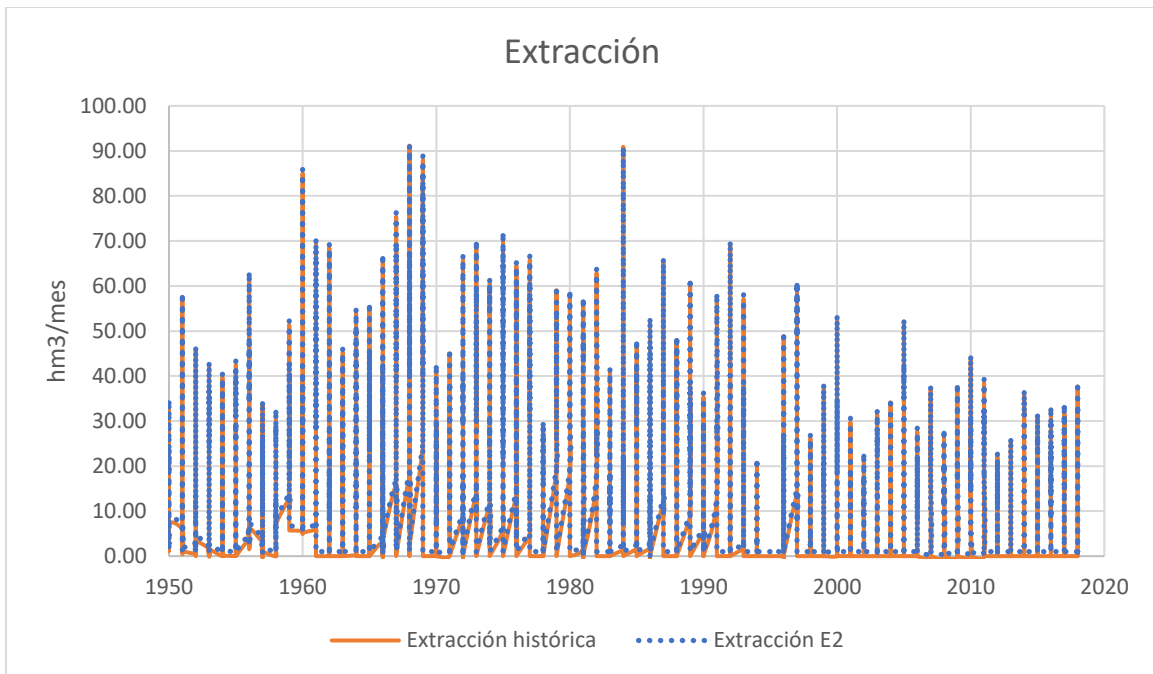


Figura 5.24. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E2.

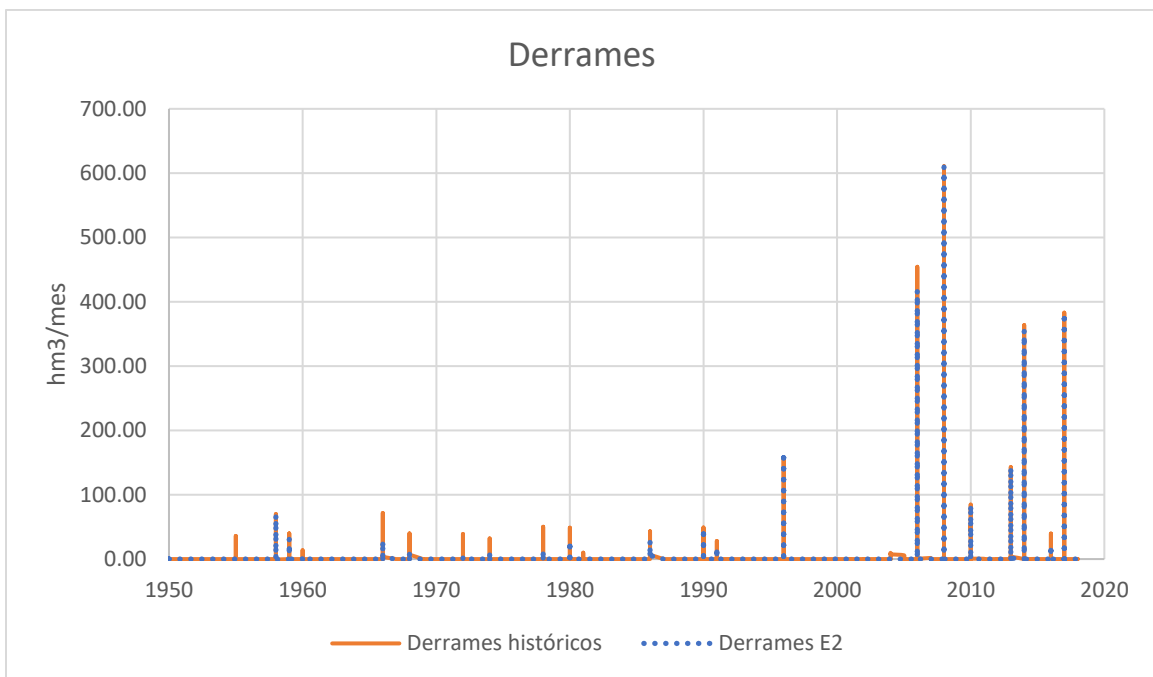


Figura 5.25. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E2.

3) Escenario E3

En el escenario E3 se incrementó la demanda en 1.5 hm^3 mensual (18 hm^3 anual). De la Figura 5.26 a la Figura 5.28 se muestra el impacto que tuvo este incremento en los almacenamientos, las extracciones y los derrames. Se observan almacenamientos menores a los históricos y en el caso de los derrames, los volúmenes son menores al igual que frecuencia que la presa derrama.

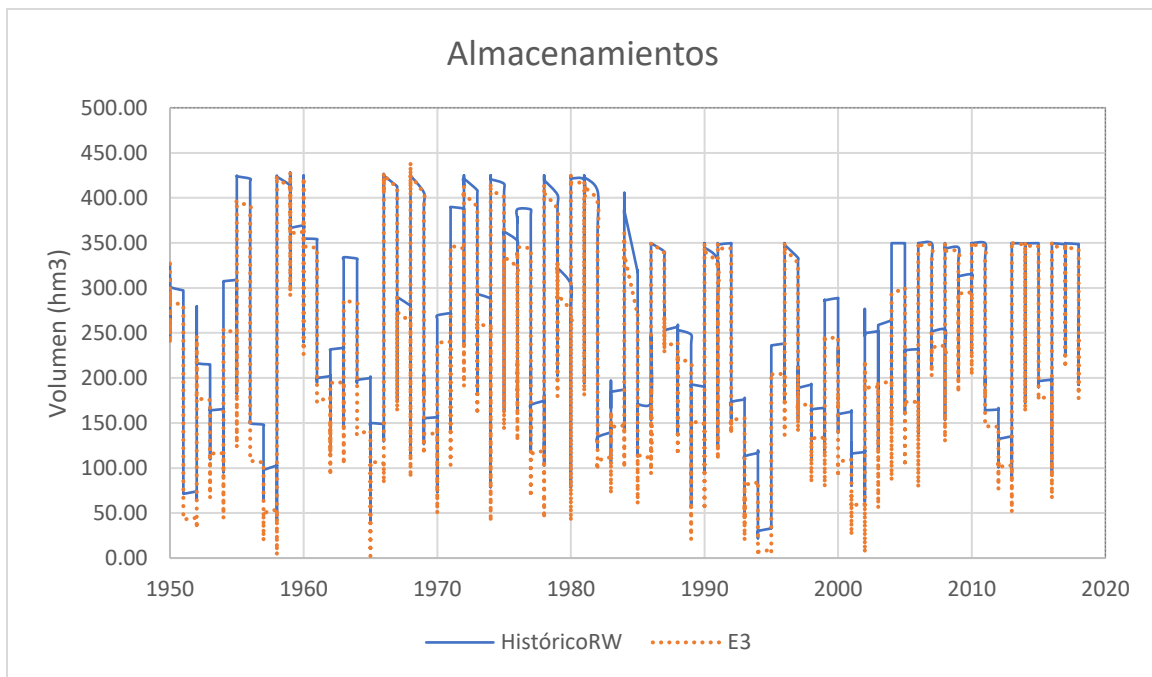


Figura 5.26. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E3.

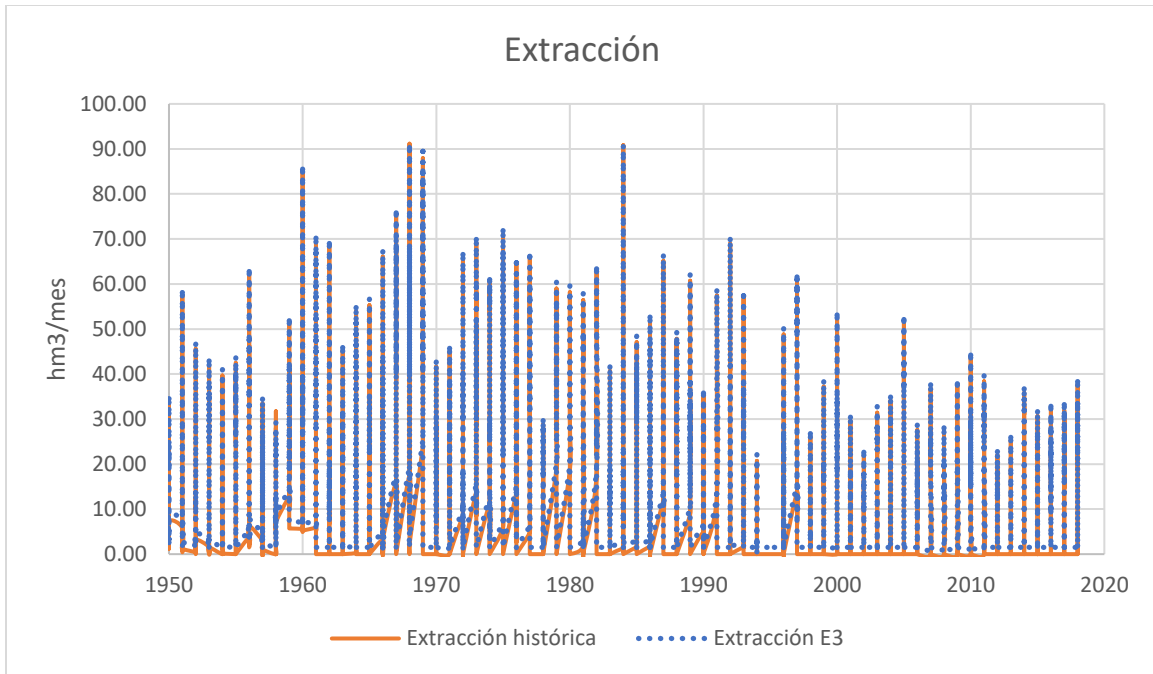


Figura 5.27. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E3.

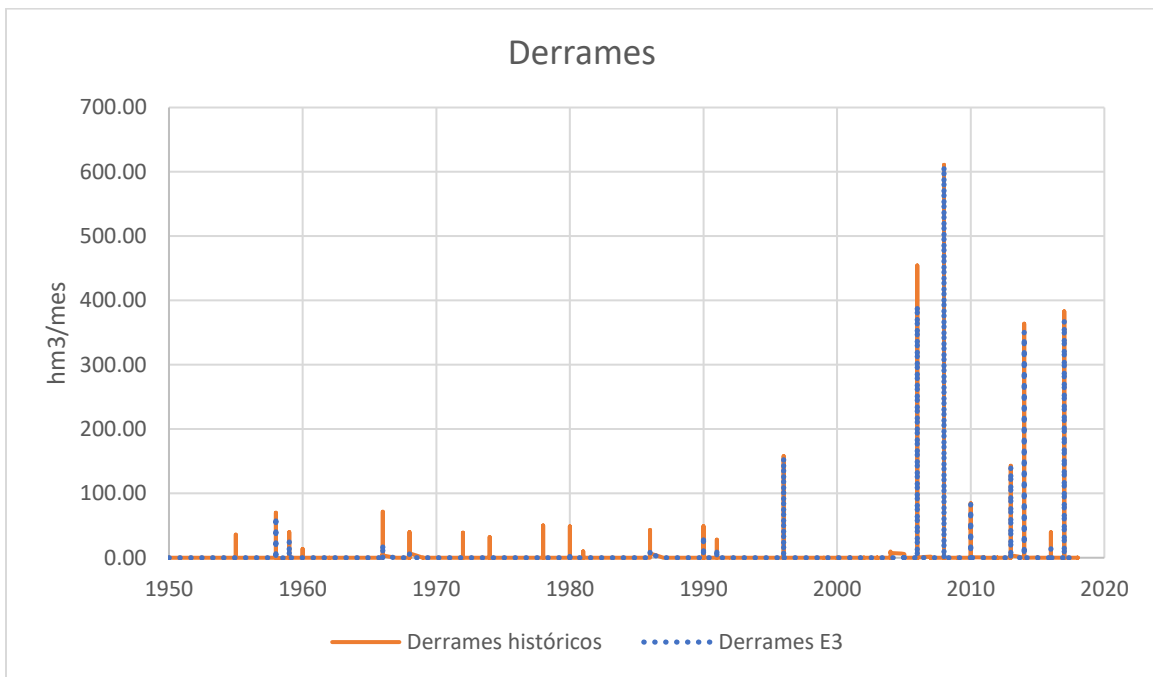


Figura 5.28. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E3.

4) Escenario E4

Para la simulación del escenario E4, se incrementó la demanda en 24 hm³ anuales. En la Figura 5.29 se observa el impacto generado por este incremento. Los almacenamientos son visiblemente menores a los históricos, alcanzando niveles bajos en la presa. En la Figura 5.30 se muestra el comparativo de las extracciones y en la Figura 5.31 el comparativo en los derrames, los cuales se presentan con menor frecuencia en este escenario.

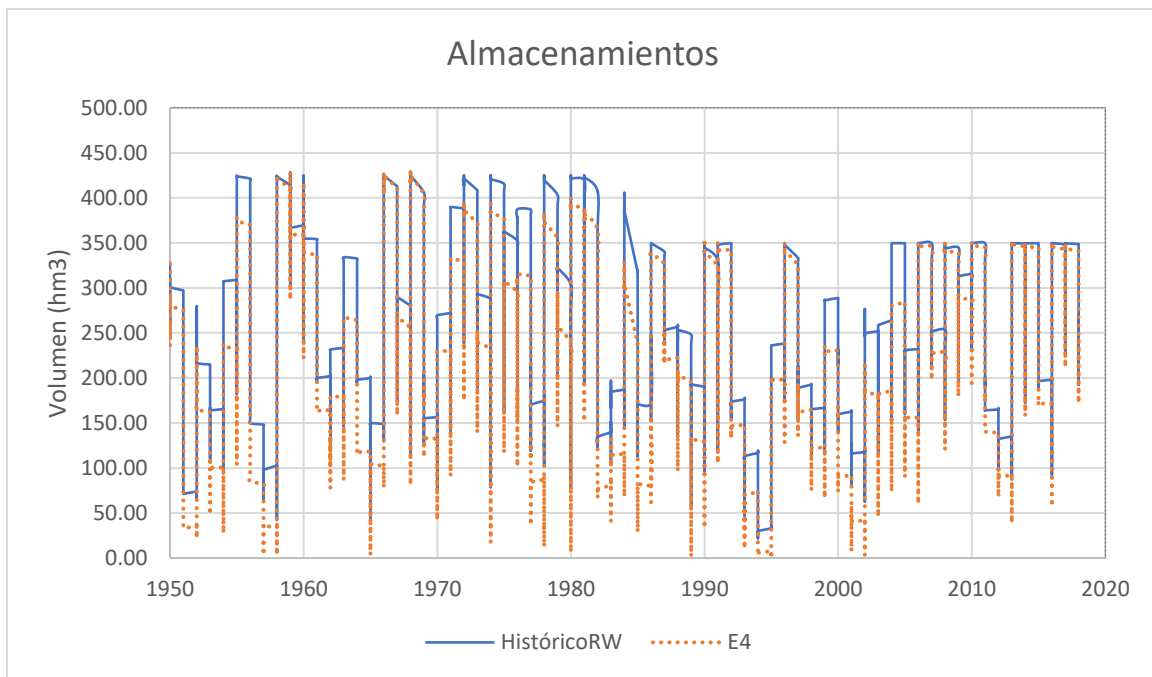


Figura 5.29. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E4.

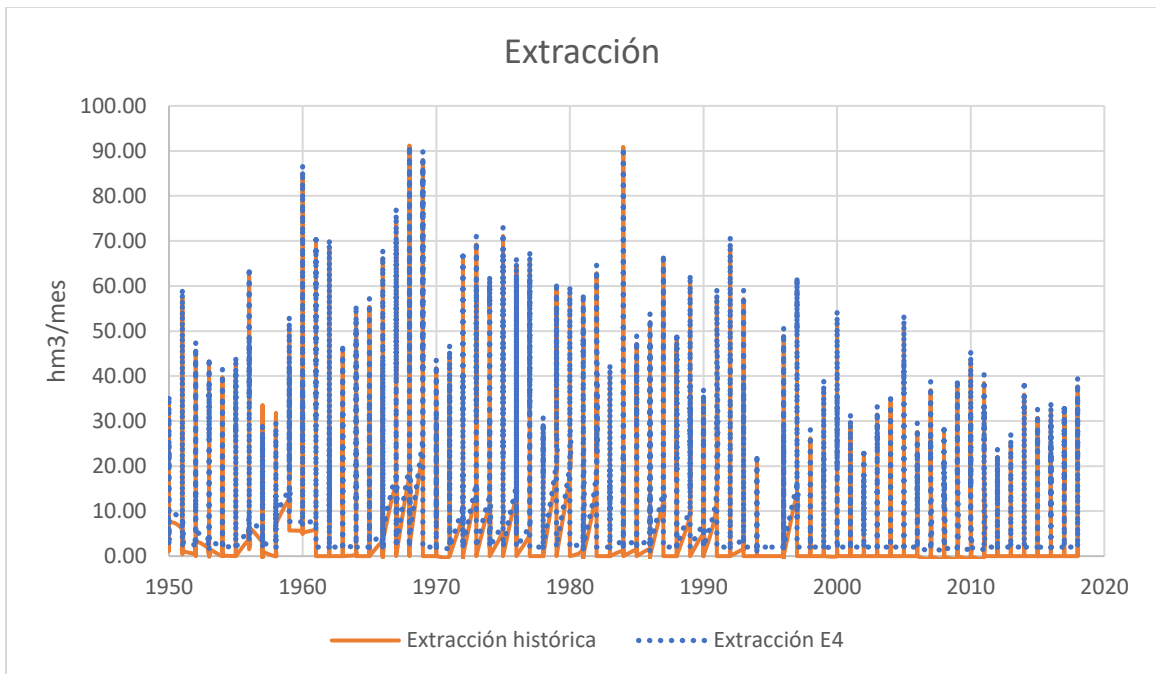


Figura 5.30. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E4.

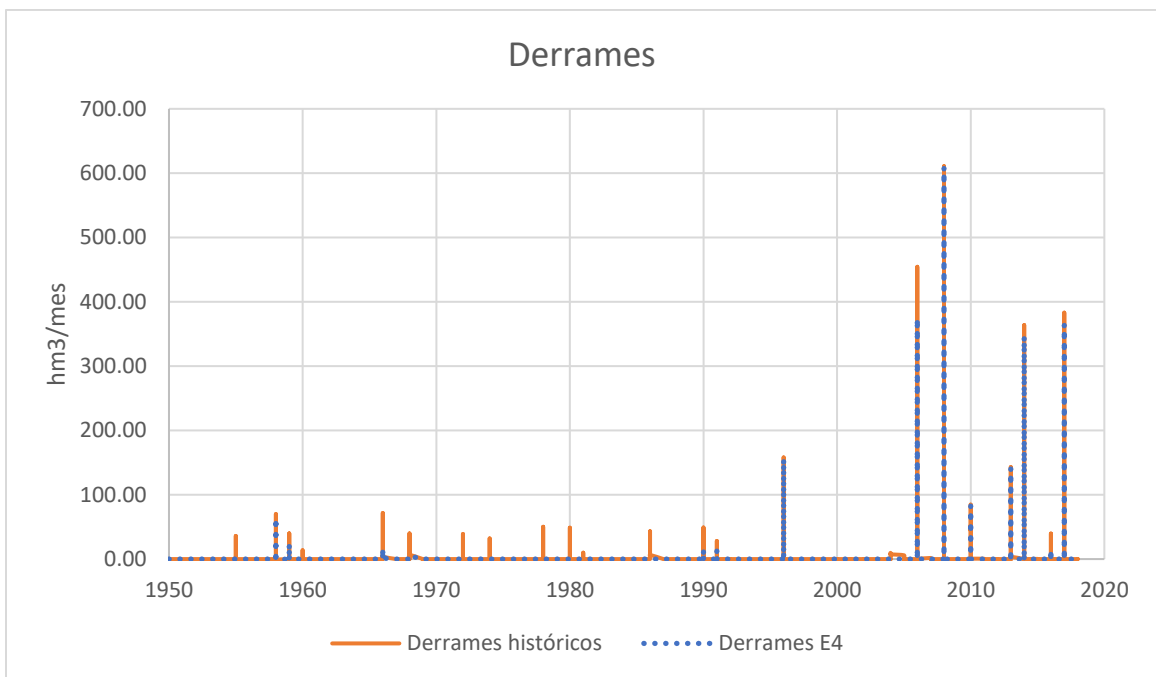


Figura 5.31. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E4.

5) Escenario E5

En el caso del escenario E5, el incremento realizado a la demanda fue de 30 hm³ anuales. En la Figura 5.32 se ve la disminución de los almacenamientos de manera significativa en varios años. En la Figura 5.33 se muestra el incremento en las extracciones y en la Figura 5.34 la disminución en el número de derrames y en su volumen.

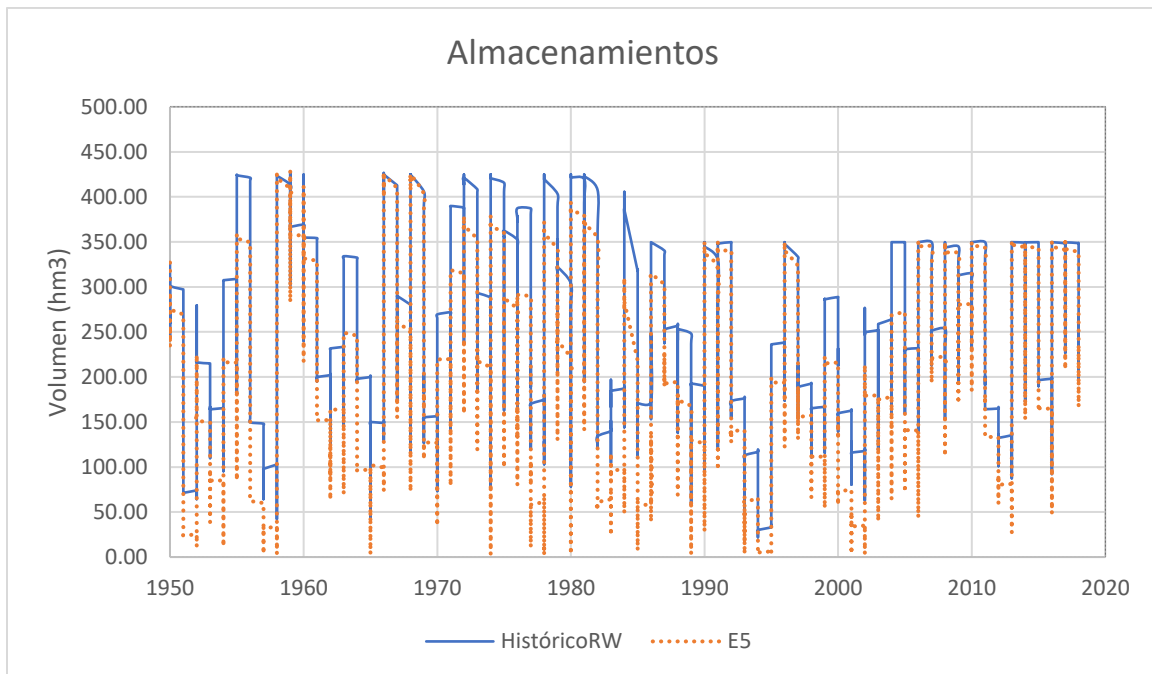


Figura 5.32. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E5.

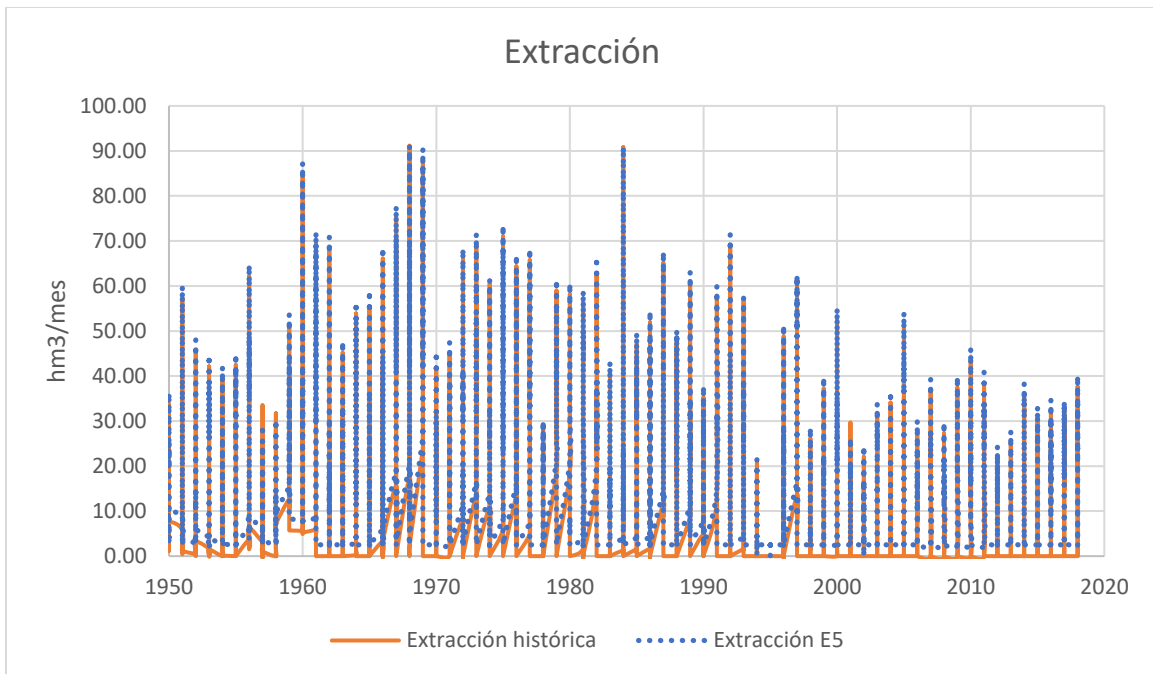


Figura 5.33. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E5.

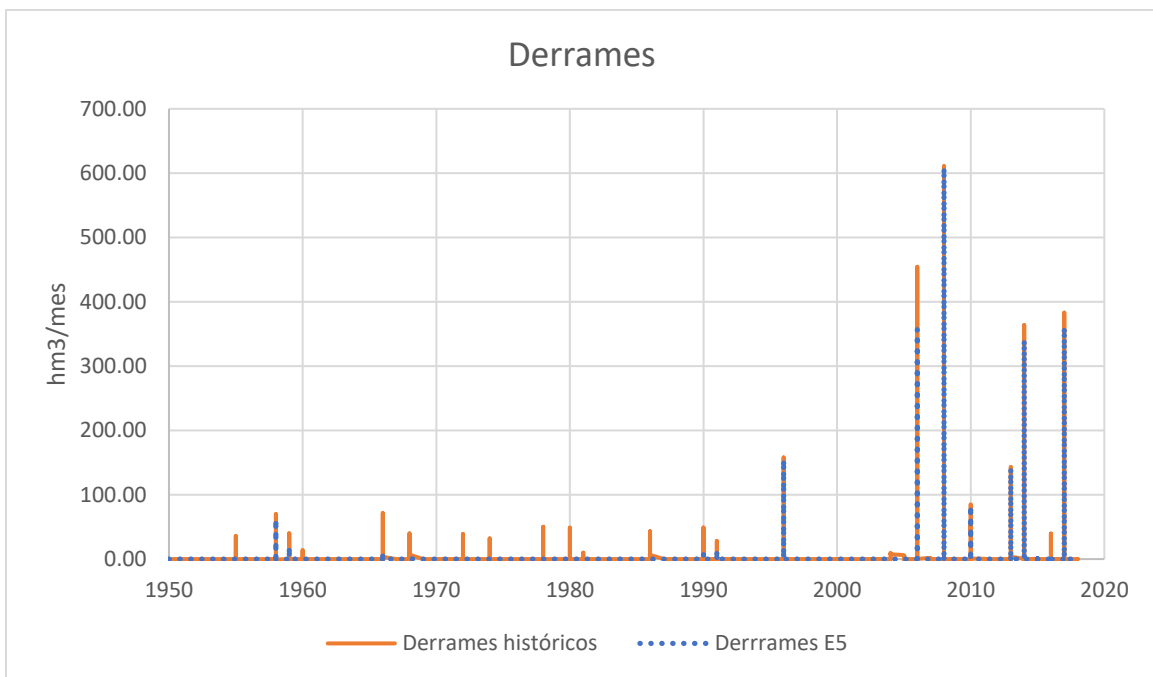


Figura 5.34. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E5.

6) Escenario E6

En el escenario E6 se realizó un incremento a la demanda de 36 hm³ anuales (3 hm³ mensuales). Al extraer este volumen, los almacenamientos se ven disminuidos de manera significativa y los años en los que la presa se encuentra al nivel del NAMINO se ven incrementados, lo cual se puede observar en la Figura 5.35. En la Figura 5.36 y la Figura 5.37 se muestra el impacto del incremento de este volumen en las extracciones y derrames, respectivamente.

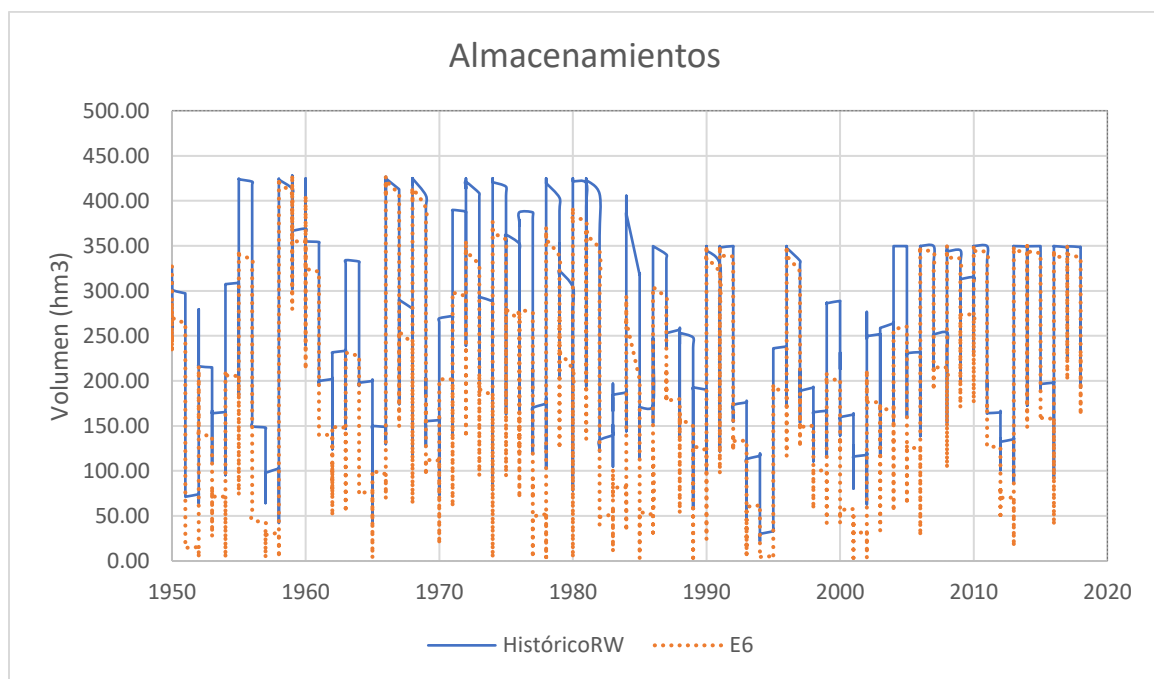


Figura 5.35. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E6.

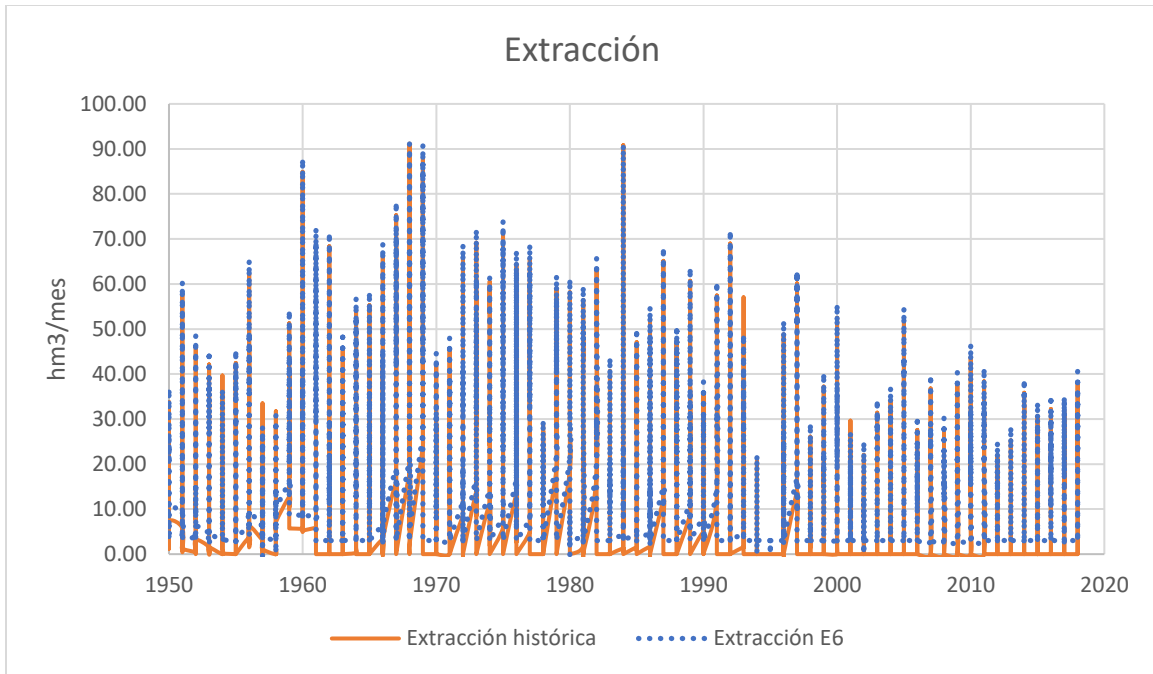


Figura 5.36. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E6.

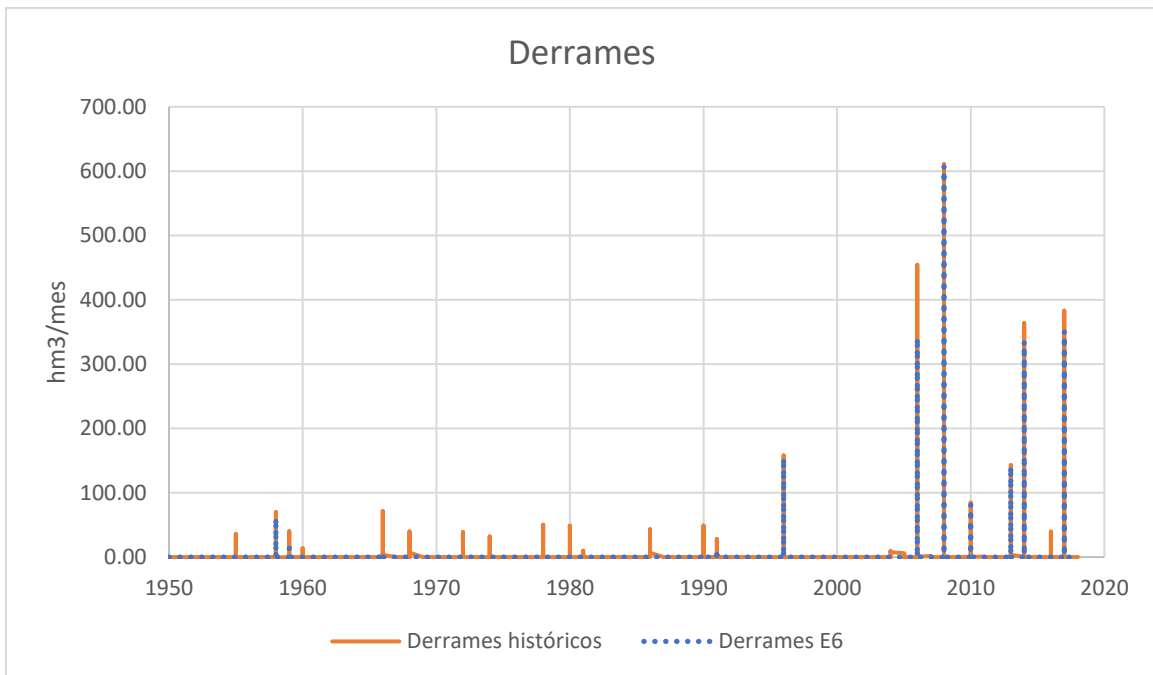


Figura 5.37. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E6.

7) Escenario E7

Para el caso del escenario E7, se incrementó la demanda en 42 hm³ anuales (3.5 hm³ mensuales), siendo este volumen el total requerido para el abastecimiento de agua para uso público urbano en la región. En la Figura 5.38 se muestra el impacto que se tendría en los almacenamientos si se extrajera el volumen total demandado. Los almacenamientos son menores a los históricos en volúmenes significativos y el número de años en los que los niveles llegan al NAMINO se ve incrementado. En la Figura 5.39 se observa el aumento en las extracciones y en la Figura 5.40 la disminución en los derrames.

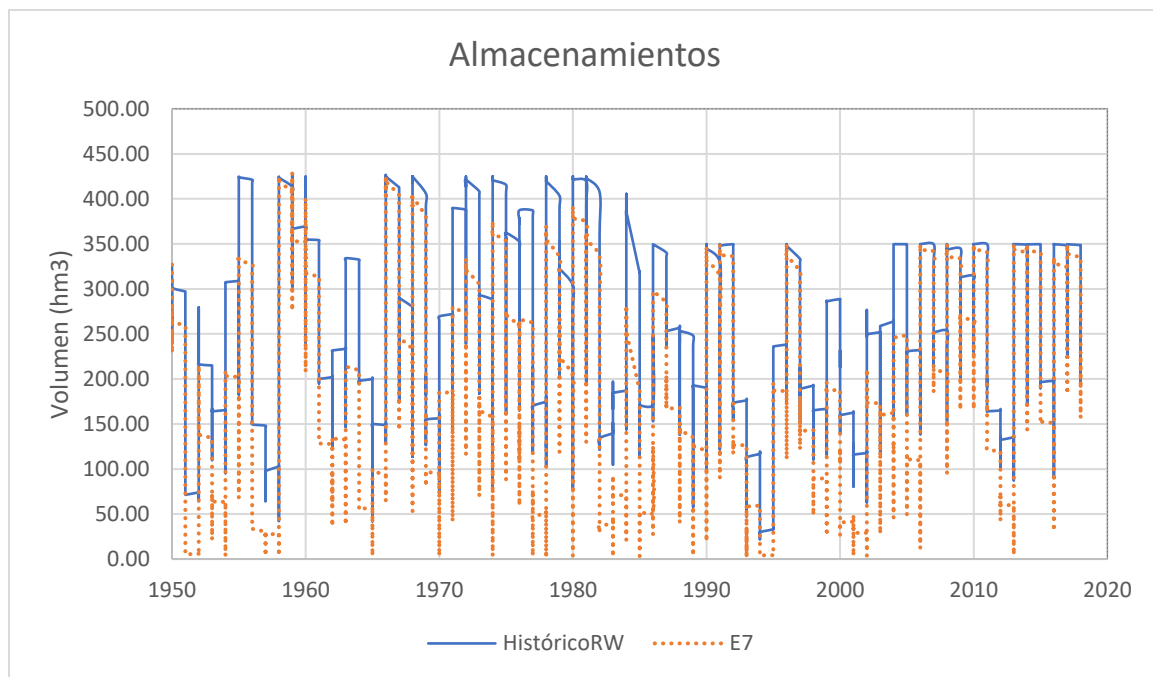


Figura 5.38. Comparación de los volúmenes de almacenamiento del escenario histórico y los obtenidos en la simulación del escenario E7.

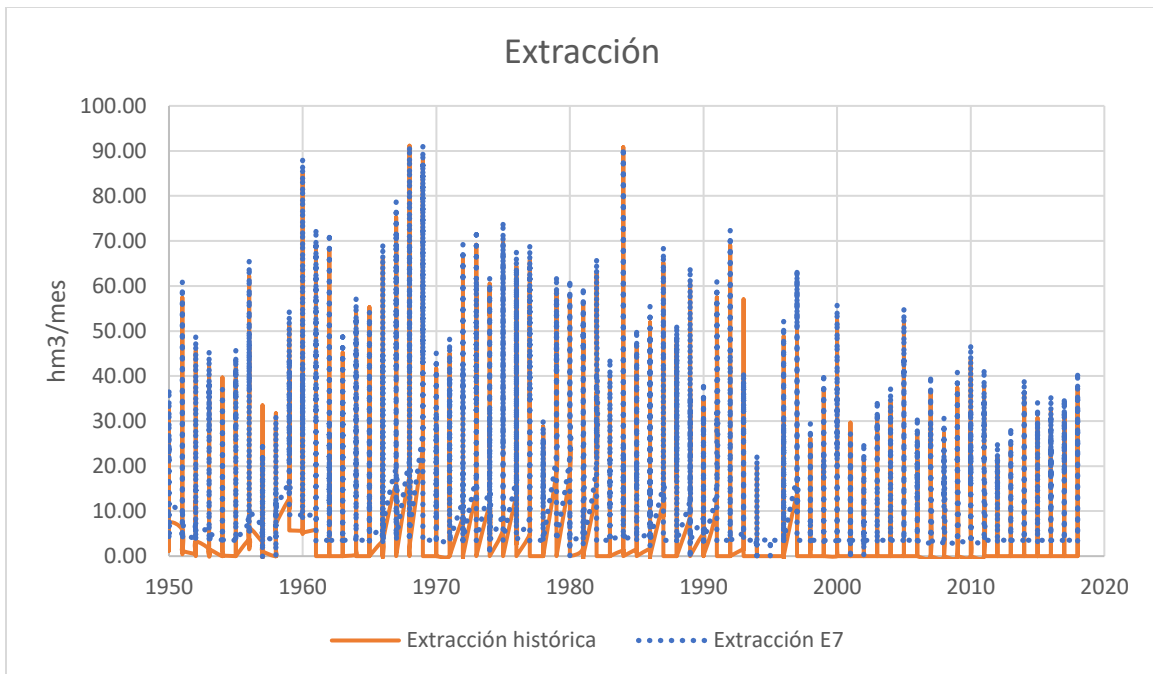


Figura 5.39. Comparación de los volúmenes mensuales de extracción del escenario histórico y los simulados en el escenario E7.

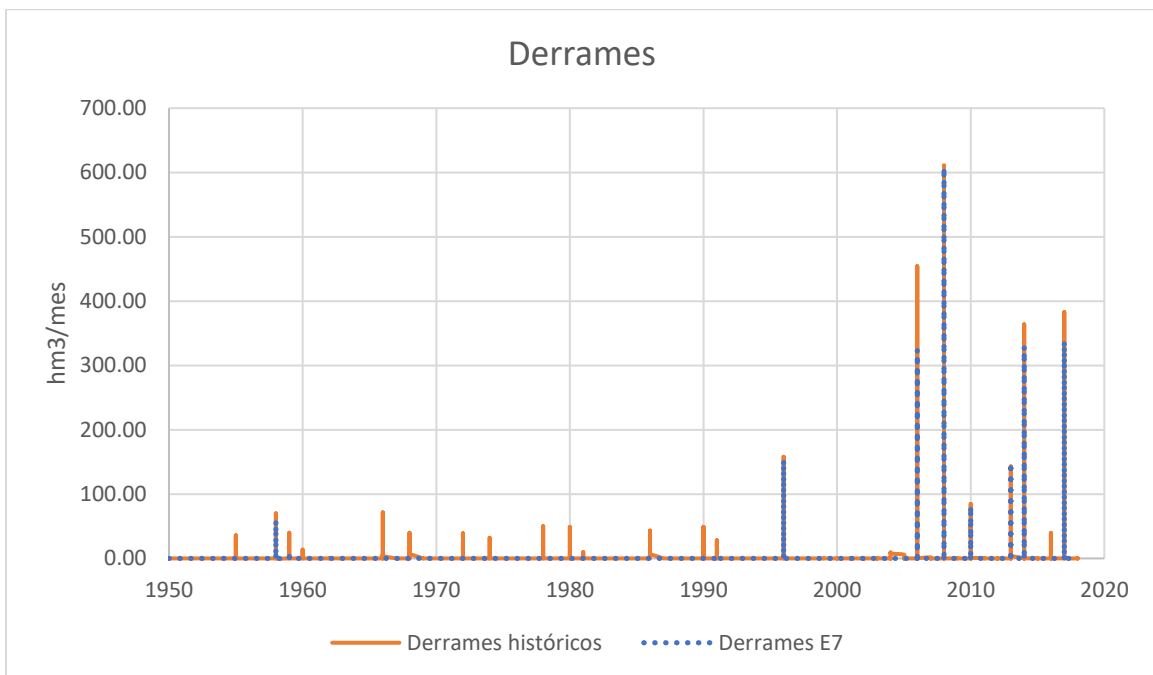


Figura 5.40. Comparación de los volúmenes mensuales derramados en el escenario histórico y los simulados en el escenario E7.

6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se totalizaron los volúmenes demandados, extraídos y derramados para los escenarios históricos y simulados. Se realizó el análisis del déficit, siendo este la diferencia entre el volumen demandado y el extraído en cada escenario simulado. Se estimó el déficit promedio mensual y anual, y el volumen de déficit total. Adicional, se estimó la cantidad de meses y años en los que se presentó un déficit mayor a 0.5 hm³. En la Tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos en el análisis.

Tabla 6.1. Tabla resumen de resultados (Déficit, demanda, extracciones y derrames) para cada escenario simulado.

	Histórico	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Meses con déficit	-	0	4	7	12	23	33	44
Años con déficit	-	0	4	5	8	14	18	20
Déficit mensual promedio (hm³)	-	-0.0086	-0.0282	-0.0924	-0.1925	-0.3866	-0.6176	-0.8643
Déficit anual promedio (hm³)	-	-0.1037	-0.3384	-1.1092	-2.3103	-4.6389	-7.4107	-10.3712
Déficit total (hm³)	-	-7.15	-23.35	-76.53	-159.41	-320.08	-511.34	-715.61
Demanda anual(hm³)	-	219.94	226.02	232.10	238.18	244.26	250.35	256.43
Demanda total (hm³)	-	14955.99	15369.49	15782.99	16196.49	16609.99	17023.49	17436.99
Extracción anual promedio (hm³)	210.76	216.65	222.41	227.63	232.42	236.09	239.31	242.34
Extracción total (hm³)	14542.49	14948.84	15346.14	15706.46	16037.08	16289.91	16512.15	16721.38
Derrames totales (hm³)	3623.15	3327.43	3030.80	2815.09	2657.45	2548.68	2446.67	2347.54
Almacenamiento medio anual (hm³)	237.78	229.16	219.68	209.23	195.90	185.30	176.69	168.92

El impacto que tiene la extracción en cada escenario se incrementa conforme la demanda aumenta. Entre mayor es la demanda, la extracción es mayor, sin embargo, disminuye la capacidad de la presa para abastecer la totalidad del volumen demandado, lo que significa un déficit mayor. La extracción y el déficit son las variables que permiten evaluar de mejor manera la afectación en cada escenario. En la Figura 6.1 se muestra como la diferencia entre la demanda y la extracción en

cada escenario se va incrementando en los escenarios con mayor demanda. En la Figura 6.2 se presentan los déficits medios anuales para cada escenario.

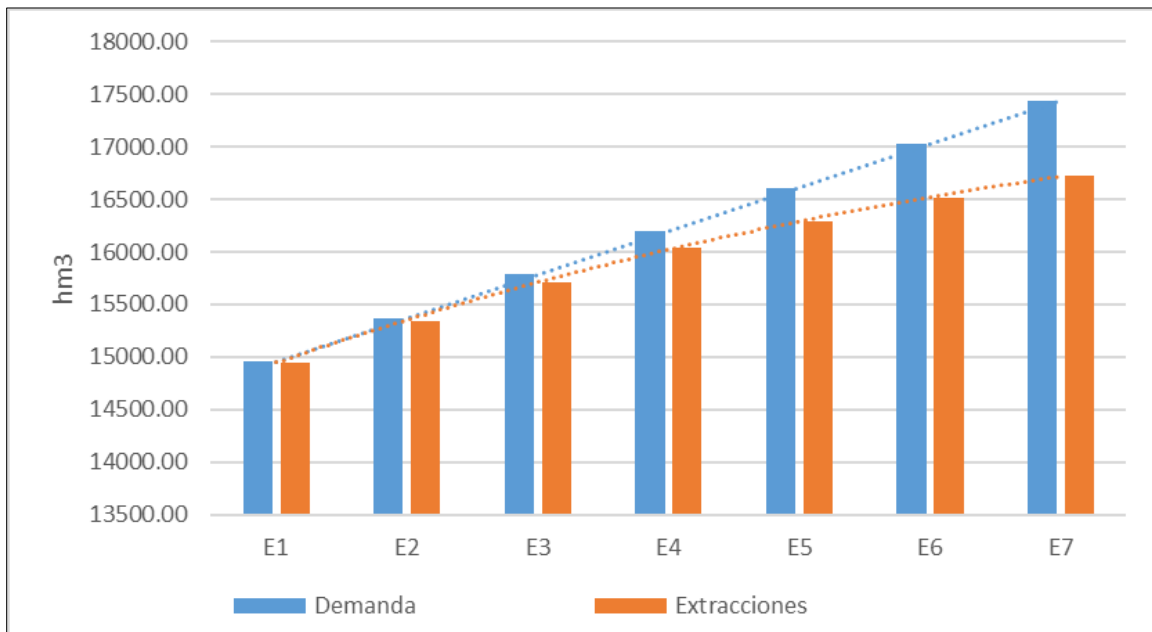


Figura 6.1. Comparación de volúmenes totales demandados y de extracción en cada escenario.

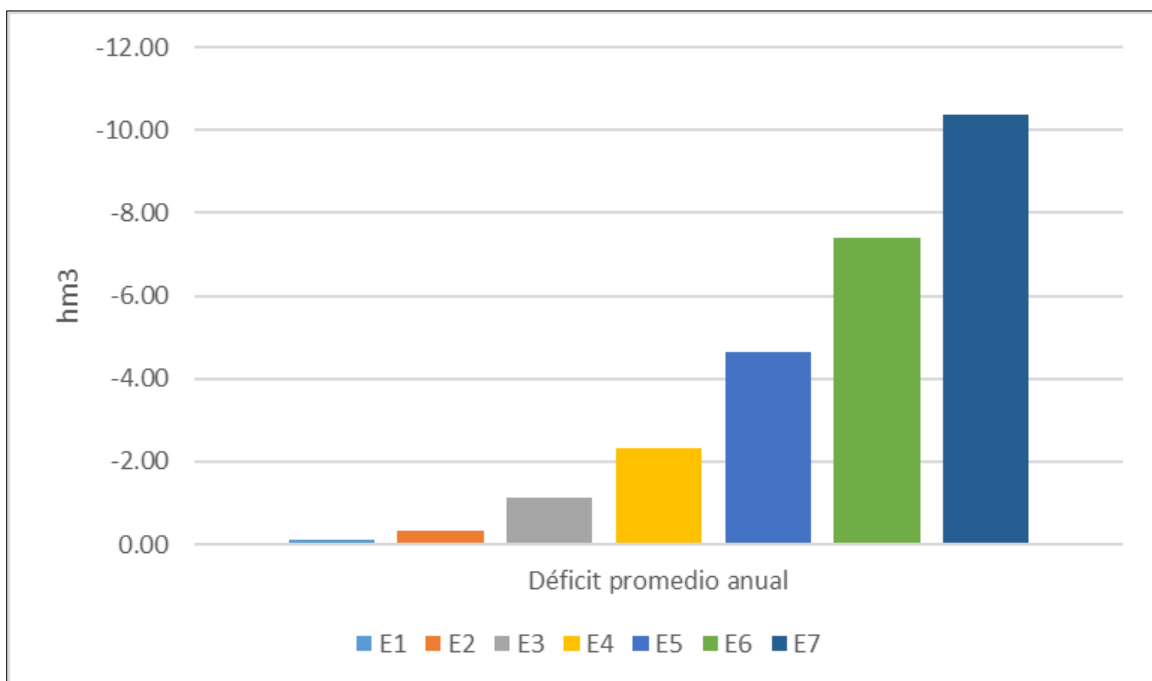


Figura 6.2. Déficit promedio anual en cada escenario simulado.

Para evaluar el impacto generado en cada escenario y definir un volumen adecuado de extracción se utilizaron dos criterios de análisis: (1) las extracciones y (2) el déficit medio anual. En el primer caso, las extracciones son muy similares a la demanda en los primeros tres escenarios, y presentan una mayor diferencia en los últimos tres escenarios. Se observa una similitud de comportamiento en las extracciones entre los escenarios E1, E2 y E3, al igual que entre los escenarios E5, E6 y E7. A su vez, existe una diferencia de comportamiento entre ambos grupos, siendo el escenario 4 el punto de inflexión para ambos, lo cual se puede observar en la Figura 6.3. Las afectaciones que presentan los primeros escenarios se pueden considerar como moderadas, mientras que las ocasionadas por el segundo grupo de escenarios serían consideradas como significativas.

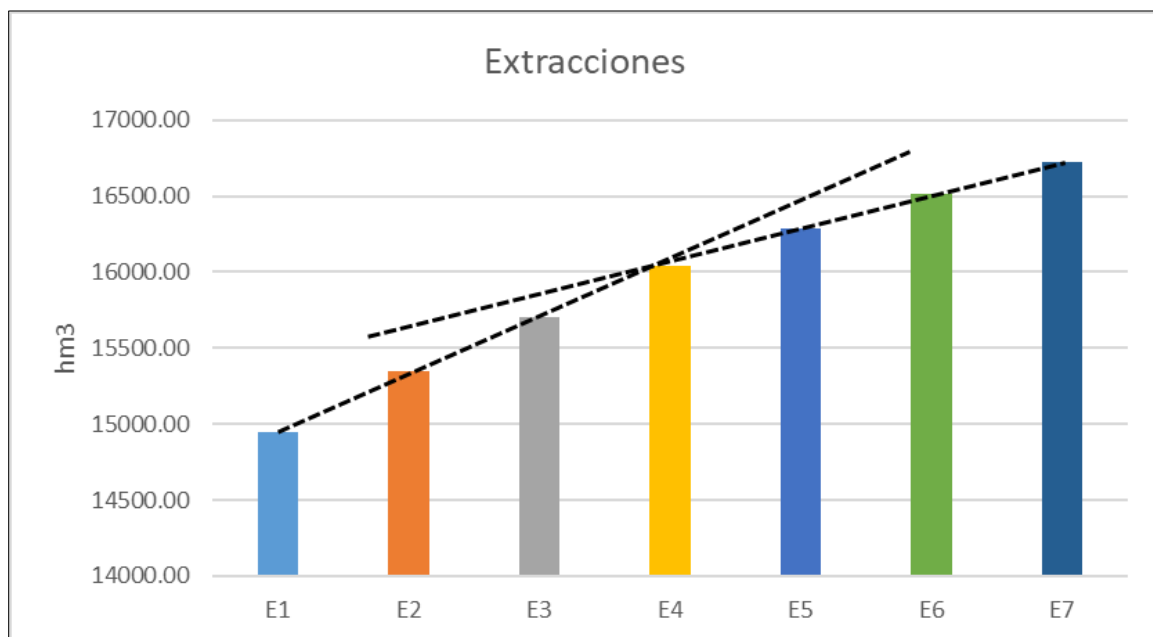


Figura 6.3. Análisis del comportamiento de las extracciones totales.

Para el caso del déficit, el comportamiento de los escenarios se divide en tres grupos como se observa en la Figura 6.4. En el primer grupo se encuentran los escenarios E1 y E2, donde el déficit medio anual es bajo, menor a 0.5 hm^3 , considerándose afectaciones mínimas. En el segundo grupo se encuentran los escenarios E3 y E4, siendo 2.31 hm^3 anuales el déficit mayor en estos escenarios. Por esto, las afectaciones ocasionadas por las políticas de extracción de ambos

escenarios son moderadas. En estos dos grupos, el incremento en el déficit entre escenario y escenario es menor a 1.2 hm^3 . Para el caso del grupo 3, en el cual se encuentran los escenarios E5, E6 y E7, el incremento en el déficit entre escenario y escenario supera los 2.3 hm^3 . El rango de los déficits para estos escenarios se encuentra entre 4.64 hm^3 (E5) y 10.37 hm^3 (E7), por lo que se prevén afectaciones significativas en estos escenarios.

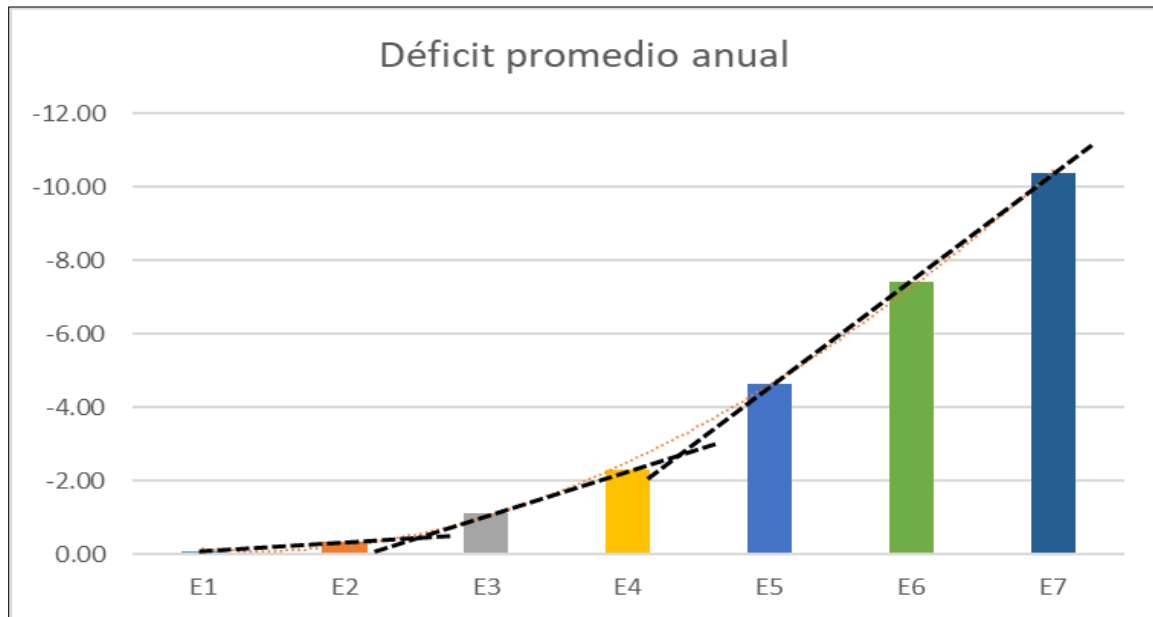


Figura 6.4. Análisis del comportamiento del déficit medio anual.

En la Tabla 6.2 se muestran las afectaciones consideradas en cada escenario según ambos criterios de análisis. El escenario E4 se visualiza como la frontera entre las afectaciones, presentándose afectaciones significativas a partir del escenario E5.

Tabla 6.2. Afectaciones generadas en cada escenario de simulación.

	Vol. Adicional (hm^3)		Afectaciones	
	Demanda	Extracción	Extracciones	Déficit
E1	6.00	5.89	Moderada	Mínima
E2	12.00	11.65	Moderada	Mínima
E3	18.00	16.87	Moderada	Moderada
E4	24.00	21.66	Moderada	Moderada
E5	30.00	25.32	Significativo	Significativo
E6	36.00	28.55	Significativo	Significativo
E7	42.00	31.58	Mayor	Mayor

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El incremento en las extracciones históricas de la presa Francisco I. Madero, para poder obtener un volumen para abastecimiento público urbano genera afectaciones en el sistema en diferente grado, dependiendo la extracción, reduciendo los almacenamientos de la presa, manteniendo sus niveles periódicamente bajos y aminorando los derrames. El agua de la presa está destinada para uso agrícola y recreativo, por lo que, en caso de haber alguna afectación, estos usuarios serían los principales afectados.

Es posible extraer un volumen anual de hasta 12 hm³ teniendo afectaciones mínimas. Las afectaciones moderadas se presentan en un rango de extracción de 12 hm³ a 22 hm³, al superarse esta extracción, las afectaciones se consideran significativas.

Para abastecer a la región de agua para uso público, se requiere un volumen anual de 42 hm³. Si se extrae un volumen anual máximo de 22 hm³, como se presenta en el escenario E4, se puede cubrir la mitad del volumen que demanda la población, con afectaciones moderadas a los otros usos, por lo que este escenario presenta varias alternativas de solución.

La primera alternativa es extraer 21 hm³ anuales de la presa, y el resto obtenerlo de agua subterránea, como actualmente se realiza. Si se mezclan estos volúmenes, las concentraciones de arsénico presente en el agua subterránea disminuirían del orden de un 50%, lo cual mejoraría la calidad del agua abastecida y disminuiría el déficit existente en el acuífero.

Otra alternativa es, de igual manera, realizar la mezcla de agua superficial y agua subterránea, pero de manera proporcional a las concentraciones de arsénico presentes en cada localidad, realizando distintas combinaciones que permitan mejorar la calidad en la medida requerida.

También se puede realizar un recorte en las localidades a abastecer, tomando en cuenta la población y ubicación de la localidad y la calidad del agua con la que son abastecidas. En este caso es necesario considerar que más de la mitad de la demanda (25 hm³ aproximadamente) corresponden a las ciudades de Delicias y Meoqui.

Es posible extraer más de 22 hm³, pero esto generaría afectaciones significativas en el sistema, las cuales sería necesario valorar, considerando el impacto social y económico.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda evaluar las alternativas propuestas y el impacto que generan, de manera técnica, jurídica, económica y social, con el fin de poder cuantificar los beneficios de estas, establecer un criterio para la toma de decisiones y realizar las acciones pertinentes para su ejecución.

También se recomienda continuar con esta investigación, evaluando la posibilidad de incrementar el volumen de agua superficial abastecido, con la incorporación de la presa La Boquilla al sistema, para poder abastecer a la población, de ser posible en su totalidad con agua superficial. Esto permitiría abastecer a la población con agua de mejor calidad y disminuir el déficit del acuífero Meoqui-Delicias.

Es recomendable realizar una valoración de más alternativas de solución, que faciliten el abastecimiento de agua superficial para uso público urbano, como la compra de concesiones agrícolas, intercambio de volúmenes de agua superficial por agua tratada para riego, entre otras.

8. REFERENCIAS

- Badii, M. H., Landeros, J., & Cerna, E. (2008). *El recurso de agua y sustentabilidad (Water resource and sustainability)*. *International Journal of Good Conscience* (Vol. 3). Recuperado de www.daenajournal.org
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Sistema de Seguridad en Presas. Recuperado de <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Meoqui-Delicias (0831), Estado de Chihuahua. México: Subdirección General Técnica. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103592/DR_0831.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. 4. Datos Básicos Para Proyectos De Agua Potable Y Alcantarillado. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015c). NUM3RAGUA MÉXICO 2015. México. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/NUMERAGUA2015.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero Meoqui-Delicias, clave 0831, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. Recuperado el 6 de Mayo de 2018, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404480&fecha=19/08/2015
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2018). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. Recuperado el 7 de Mayo de 2018, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018
- Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y., & Herrera-Peraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, III(1). Recuperado de <http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v3n1/data/PresenciadeArsenicoenelAcuiferoMeoquiDelicias.pdf>
- Gobierno del Estado de Chihuahua (GECH.) (2017). Plan Estatal de Desarrollo 2017-2021. Chihuahua, Chih.: Gobierno del Estado de Chihuahua. Recuperado de http://www.chihuahua.gob.mx/planestatal/PLAN_ESTATAL_DE_DESARROLLO.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). Carta climática escala 1:1000,000.

INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Censo de población y vivienda 2010. INEGI.

Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS). (2011). PROGRAMA SECTORIAL 2011-2016 EL AGUA DE CHIHUAHUA. Chihuahua: Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua. Recuperado de http://chihuahua.gob.mx/atach2/sf/uploads/indtfisc/progSER2010-2016/ProgSec_JuntaCentral.pdf

Núñez-López, D., Muñoz-Robles, carlos, Reyes-Gómez, V., Velasco-Velasco, I., & Gadsden-Esparza, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia*, 41(3), 253–262. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v41n3/1405-3195-agro-41-03-253.pdf>

Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO). (2019). Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores. Recuperado de <http://www.pigoo.gob.mx/Estado>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. *Diario Oficial de La Federación*, 27 de Marzo.

Secretaría de Innovación y Desarrollo Económico (SIDE). (2017). Programa Sectorial de Innovación y Desarrollo Económico 2017-2021. Chihuahua, Chihuahua: Secretaría de Innovación y Desarrollo Económico. Recuperado de <http://www.chihuahua.com.mx/ProgramaSectorial.pdf>

Silva-Hidalgo, H. (2010). *Modelo Matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

Silva-Hidalgo, H. (2018). *Estudio de prefactibilidad para la evaluación socioeconómica del proyecto: Acueducto y líneas de interconexión a red primaria de distribución de agua superficial proveniente de la presa Fco. I. Madero a varias localidades ubicadas en el acuífero Meoqui-Delicias*. Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2010). 3er informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Recuperado de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR3_Facts_and_Figures_SP.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Localidades

Municipio	Localidad	Longitud	Latitud	Altitud	Población	POI
Delicias	Delicias	-105.47111110000	28.19333333000	1171	118071	SI
Meoqui	Pedro Meoqui	-105.48222220000	28.26777778000	1150	22574	NO
Meoqui	Lázaro Cárdenas	-105.62361110000	28.38972222000	1202	8704	SI
Rosales	Santa Cruz de Rosales	-105.55444440000	28.18694444000	1180	5570	NO
Delicias	Colonia Revolución	-105.44361110000	28.24166667000	1180	3995	NO
Rosales	Congregación Ortiz	-105.51916670000	28.25388889000	1150	2620	NO
Delicias	Colonia Campesina	-105.52666670000	28.14027778000	1190	2365	SI
Rosales	El Molino	-105.53916670000	28.16611111000	1180	2191	SI
Meoqui	Estación Consuelo	-105.59555560000	28.33166667000	1187	1981	SI
Julimes	Julimes	-105.43055560000	28.42305556000	1120	1795	SI
Delicias	Colonia Terrazas	-105.46805560000	28.23750000000	1154	1602	SI
Delicias	Colonia Abraham González (La Quemada)	-105.40750000000	28.20666667000	1210	1404	SI
Meoqui	Colonia Felipe Ángeles	-105.51305560000	28.38555556000	1153	1254	SI
Rosales	Kilómetro Noventa y Nueve	-105.58000000000	28.12694444000	1204	1092	SI
Meoqui	Guadalupe Victoria	-105.43055560000	28.33083333000	1128	1045	SI
Meoqui	Los García	-105.42777780000	28.35527778000	1121	890	SI
Meoqui	Las Puentes	-105.44888890000	28.29666667000	1140	829	SI
Rosales	Ex-Hacienda Delicias	-105.52888890000	28.18611111000	1171	774	SI
Rosales	Barranco Blanco	-105.61166670000	28.43805556000	1191	748	SI
Julimes	La Regina	-105.45166670000	28.41333333000	1111	739	SI
Delicias	Colonia Morelos (Cuatro Vientos)	-105.39361110000	28.23638889000	1191	687	SI
Rosales	Salón de Actos (Ampliación Cuarenta y Siete)	-105.54861110000	28.49750000000	1160	651	SI
Rosales	La Garita	-105.58111110000	28.14583333000	1189	642	SI
Meoqui	El Torreón	-105.41416670000	28.32583333000	1130	616	SI
Delicias	Colonia Vicente Guerrero	-105.42861110000	28.19777778000	1200	604	SI
Julimes	Colonia San José	-105.44027780000	28.38361111000	1120	509	SI
Julimes	Colonia Esperanza	-105.45444440000	28.44722222000	1105	509	SI
Meoqui	Nuevo San Lucas	-105.56861110000	28.35722222000	1161	485	SI
Meoqui	Loreto	-105.43861110000	28.31222222000	1131	479	SI
Meoqui	Colonia Francisco Portillo (Los Jáquez)	-105.45055560000	28.26472222000	1146	436	SI
Meoqui	Potrero del Llano	-105.54444440000	28.45555556000	1170	394	SI
Rosales	Loma Linda	-105.55333330000	28.23000000000	1179	379	SI
Rosales	Orinda	-105.56500000000	28.26500000000	1178	349	SI

Municipio	Localidad	Longitud	Latitud	Altitud	Población	POI
Julimes	Hacienda Humboldt (Ejido Julimes)	-105.41722220000	28.37750000000	1120	344	SI
Meoqui	Nuevo Loreto	-105.40166670000	28.27388889000	1181	329	SI
Rosales	Santa Rita de Casia (Ampliación Cuarenta y Dos)	-105.59944440000	28.45583333000	1187	326	SI
Meoqui	Gran Morelos (Los Cisneros)	-105.45888890000	28.28805556000	1139	296	SI
Delicias	Cadete Agustín Melgar [Unidad Habitacional]	-105.50750000000	28.14833333000	1201	287	NO
Julimes	Labor Nueva	-105.45694440000	28.4772222000	1110	262	SI
Delicias	Colonia Cuauhtémoc	-105.39722220000	28.26944444000	1164	260	SI
Meoqui	Lomas del Consuelo	-105.46388890000	28.31527778000	1139	258	SI
Meoqui	Colonia Emiliano Zapata (La Chávez)	-105.61083330000	28.37166667000	1190	226	NO
Rosales	Agua Nueva	-105.50055560000	28.21277778000	1156	206	SI
Julimes	Arenillas	-105.38222220000	28.32333333000	1126	195	SI
Delicias	Colonia Francisco I. Madero (La Gomeña)	-105.43055560000	28.24805556000	1180	185	SI
Meoqui	Colonia Diez de Mayo (Las Cotorras)	-105.55805560000	28.42444444000	1180	183	SI
Meoqui	La Escuadra	-105.54611110000	28.38916667000	1163	182	NO
Julimes	La Boquilla	-105.45305560000	28.48916667000	1107	174	SI
Meoqui	Colonia Progreso (Zona de Bombeo)	-105.48583330000	28.35055556000	1140	162	SI
Meoqui	Ampliación Gran Morelos	-105.46472220000	28.29138889000	1140	159	NO
Julimes	El Carrizo	-105.42750000000	28.48194444000	1109	132	SI
Julimes	El Gramal	-105.39750000000	28.34861111000	1123	127	SI
Rosales	San Valentín	-105.50611110000	28.21611111000	1157	118	NO
Meoqui	Colonia Dieciocho de Marzo	-105.37722220000	28.27111111000	1179	74	NO
Meoqui	Las Malvinas	-105.54555560000	28.41500000000	1173	67	NO
Meoqui	Las Carolinas	-105.56833330000	28.39000000000	1170	57	SI
Meoqui	El Alto	-105.45500000000	28.29833333000	1140	46	NO
Rosales	Rancho Gallegos	-105.58388890000	28.14055556000	1191	41	NO
Meoqui	El Ranchito	-105.40722220000	28.33916667000	1123	39	SI
Rosales	Villa Santa Cruz	-105.56777780000	28.17388889000	1180	35	NO
Meoqui	Buenavista	-105.56027780000	28.28500000000	1163	31	SI
Delicias	Los Solís	-105.38583330000	28.26444444000	1160	29	NO
Rosales	Las Parcelas (Nuevo Amanecer)	-105.57250000000	28.44722222000	1167	26	NO
Meoqui	La Chiripa	-105.52500000000	28.38972222000	1160	24	NO
Meoqui	Carrasco	-105.59361110000	28.36472222000	1174	23	NO
Rosales	Comunidad el Mirador	-105.58444440000	28.48944444000	1180	21	NO
Rosales	Nueve Milpas	-105.52138890000	28.26694444000	1150	20	NO

Municipio	Localidad	Longitud	Latitud	Altitud	Población	POI
Meoqui	San José	-105.55638890000	28.40222222000	1168	19	NO
Meoqui	Rancho de Aguilar	-105.55777780000	28.39000000000	1166	19	NO
Meoqui	La Escuelita	-105.58222220000	28.35277778000	1166	19	NO
Delicias	Villa Campo Real	-105.48972220000	28.22388889000	1150	18	NO
Rosales	Rancho los Chávez	-105.50277780000	28.22888889000	1152	18	NO
Julimes	El Rinconerío	-105.43694440000	28.46611111000	1100	18	NO
Meoqui	Ninguno	-105.60638890000	28.36750000000	1185	17	NO
Meoqui	Nueve Milpas	-105.51694440000	28.26722222000	1150	16	NO
Meoqui	Los Mata	-105.47638890000	28.29166667000	1143	16	NO
Meoqui	Arenívar	-105.46861110000	28.28388889000	1142	15	NO
Meoqui	Ninguno	-105.47111110000	28.45055556000	1124	15	NO
Meoqui	La Piedad	-105.49916670000	28.41750000000	1165	14	NO
Meoqui	Granja la Norteña	-105.50861110000	28.25444444000	1150	14	NO
Delicias	Rancho el Carmen	-105.40000000000	28.26361111000	1167	14	NO
Delicias	Las Peñas	-105.45472220000	28.25611111000	1166	14	NO
Rosales	Rancho Reyes	-105.54000000000	28.47527778000	1147	14	NO
Meoqui	El Escondido	-105.58000000000	28.36888889000	1170	13	NO
Meoqui	La Esperanza	-105.50333330000	28.41833333000	1168	13	NO
Delicias	Rancho Reyes López	-105.38166670000	28.23722222000	1180	13	NO
Meoqui	Los Martínez	-105.60305560000	28.37027778000	1181	12	NO
Meoqui	Las Nieves	-105.54555560000	28.39361111000	1164	12	NO
Meoqui	Rancho Paraíso	-105.50638890000	28.25500000000	1150	12	NO
Meoqui	La Gaviota	-105.47083330000	28.28333333000	1143	12	NO
Meoqui	Rancho Pérez	-105.48500000000	28.35444444000	1141	12	NO
Meoqui	San José	-105.46833330000	28.33666667000	1140	12	NO
Delicias	Residencial Campestre del Desierto	-105.52638890000	28.17250000000	1190	12	NO
Meoqui	Las Granjas [Emporio Nogalero]	-105.62361110000	28.37166667000	1209	11	NO
Meoqui	Rancho los González	-105.53055560000	28.39888889000	1163	11	NO
Meoqui	La Chiripa	-105.47583330000	28.24944444000	1149	11	NO
Meoqui	Ranchito Mata	-105.49361110000	28.25861111000	1149	11	NO
Meoqui	Ninguno	-105.54555560000	28.31694444000	1147	11	NO
Meoqui	Ninguno	-105.43555560000	28.35722222000	1131	11	NO
Delicias	José María Durán	-105.39805560000	28.23583333000	1202	11	NO
Delicias	Los Jiménez	-105.50972220000	28.13555556000	1189	11	NO
Rosales	Granja Dennys	-105.53833330000	28.18638889000	1174	11	NO
Julimes	La Tórtola	-105.42111110000	28.39555556000	1110	11	NO
Meoqui	Lote Ciento Noventa	-105.54555560000	28.39972222000	1166	10	NO
Meoqui	El Roco	-105.54555560000	28.45861111000	1161	10	NO
Meoqui	Santo Niño	-105.53222220000	28.38055556000	1156	10	NO

Municipio	Localidad	Longitud	Latitud	Altitud	Población	POI
Meoqui	Ninguno	-105.54444440000	28.33361111000	1149	10	NO
Meoqui	Granja la Aurora	-105.49722220000	28.27416667000	1147	10	NO
Meoqui	San José	-105.47222220000	28.27888889000	1145	10	NO
Meoqui	Los Guerreros	-105.49750000000	28.30638889000	1140	10	NO
Delicias	San Isidro	-105.47388890000	28.21638889000	1161	10	NO
Rosales	El Gallo	-105.58083330000	28.15611111000	1182	10	NO
Rosales	Los Chávez	-105.50527780000	28.23194444000	1152	10	NO
Rosales	Rancho Reyes	-105.54611110000	28.48555556000	1151	10	NO

CURRICULUM VITAE

Ingeniero civil, egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), en el año 2015. En el año 2016, comenzó a laborar en el Consejo de Cuenca del Río Bravo, donde fungió como Técnico Operativo, encargado de la supervisión de proyectos, revisión de propuestas técnicas y económicas, elaboración de estudios, entre otras actividades. En el año 2018, ingresó a la Maestría en Ingeniería en Hidrología, en la Facultad de Ingeniería de la UACH, en donde actualmente es candidato a grado.

Dentro de sus publicaciones se encuentra su tesis de licenciatura "Análisis del comportamiento hidráulico del río Conchos desde la presa Luis L. León a la confluencia con el río Bravo, en el estado de Chihuahua." (mayo, 2017). El resumen "Identificación de incremento de temperatura mediante análisis estadístico de series de tiempo, en la región árida en el estado de Chihuahua" (Reunión Anual UGM 2019). Y la presente investigación como tesis de posgrado, "Potencial de abastecimiento público con agua superficial, en la región Meoqui-Delicias" (enero, 2020).

Domicilio Permanente: Árbol de las sedas #19105, Lomas de Montecarlo
Chihuahua, Chihuahua. C.P. 31183

Esta tesis fue mecanografiada por Claudia Alejandra Reaza Villalobos.